

Comenzamos a trabajar en estrellas masivas pobres en metales para obtener prescripciones empíricas de sus propiedades físicas que pudieran implementarse en los modelos evolutivos. Estos, a su vez, proporcionarían estimaciones más realistas de la retroalimentación de estrellas masivas en poblaciones estelares a medio y alto desplazamiento al rojo, z . Diez años más tarde, esta línea es uno de los frentes punteros en el campo de estrellas masivas: las inminentes observaciones de galaxias en la infancia del Universo con el JWST, la detección de galaxias cercanas con intensa emisión en H α 1640 y la demografía de agujeros negros detectada por los observatorios de ondas gravitatorias, han traído a las estrellas masivas de baja metalicidad al primer plano. El campo está experimentando una revolución que se potenciará con la llegada del ELT y de futuras misiones visible-UV en el espacio.



Miriam García García
Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)
mgg@cab.inta-csic.es

Artemio Herrero Davó
Instituto de Astrofísica de Canarias /
Universidad de La Laguna
ahd@iac.es

PARA EMPEZAR, UN BREVE CONTEXTO

Desde su nacimiento, las estrellas masivas liberan gran cantidad de energía mecánica e ionizante al medio interestelar y lo enriquecen con nuevos metales en escalas de tiempo cortas. Su final está asociado a fenómenos altamente energéticos, supernovas (SN) y estallidos de rayos- γ (GRBs), que señalizan la formación estelar reciente hasta grandes distancias y siembran el Cosmos con agujeros negros y estrellas de neutrones. Son así grandes dinamizadoras de la evolución de las galaxias y el Universo, papel que comenzó durante el periodo de re-ionización con las primeras estrellas, posiblemente muy masivas y fuente de un intenso campo de fotones ultravioletas (UV).

Cuantificar el retorno multifacético de las estrellas masivas a las galaxias huéspedes requiere modelos evolutivos con predicciones precisas para sus temperaturas, luminosidades y distribuciones espectrales de energía a lo largo de su vida. También requiere predecir sus finales en términos de SN, GRB y resto compacto. Estos cálculos entran en los modelos de síntesis de poblaciones y quimiodinámica de galaxias, que a su vez alimentan las simulaciones cosmológicas. Todo ello debe sustentarse sobre estudios de estrellas masivas individuales en entornos con condiciones semejantes a las del Universo en épocas pasadas, siendo la escasez de metales la característica más determinante.

La evolución de dos estrellas con igual masa inicial pero diferente metalicidad será muy distinta debido a sus vientos estelares, flujos de masa impulsados por presión de radiación sobre iones metálicos. La pérdida de masa crece con la metalicidad, afecta al interior estelar y determina el tamaño final del núcleo, el tipo de SN y el resto compacto. Es pues fundamental constreñir la evolución y vientos de las estrellas masivas pobres en metales (EMPM) para proporcionar buenas prescripciones empíricas que permitan interpretar el Universo a alto z . El estándar actual lo constituyen las estrellas masivas de la Pequeña Nube de Magallanes (SMC). Sin embargo su metalicidad, $\sim 1/5$ Solar, no es representativa del Universo primitivo, ni siquiera de la metalicidad en el máximo de formación estelar a $z=2$ con $1/10$ Solar [1].

MÁS QUE LA CONEXIÓN CON EL UNIVERSO PRIMITIVO

INTENTANDO EXTENDER LA FRONTERA DE BAJA METALICIDAD

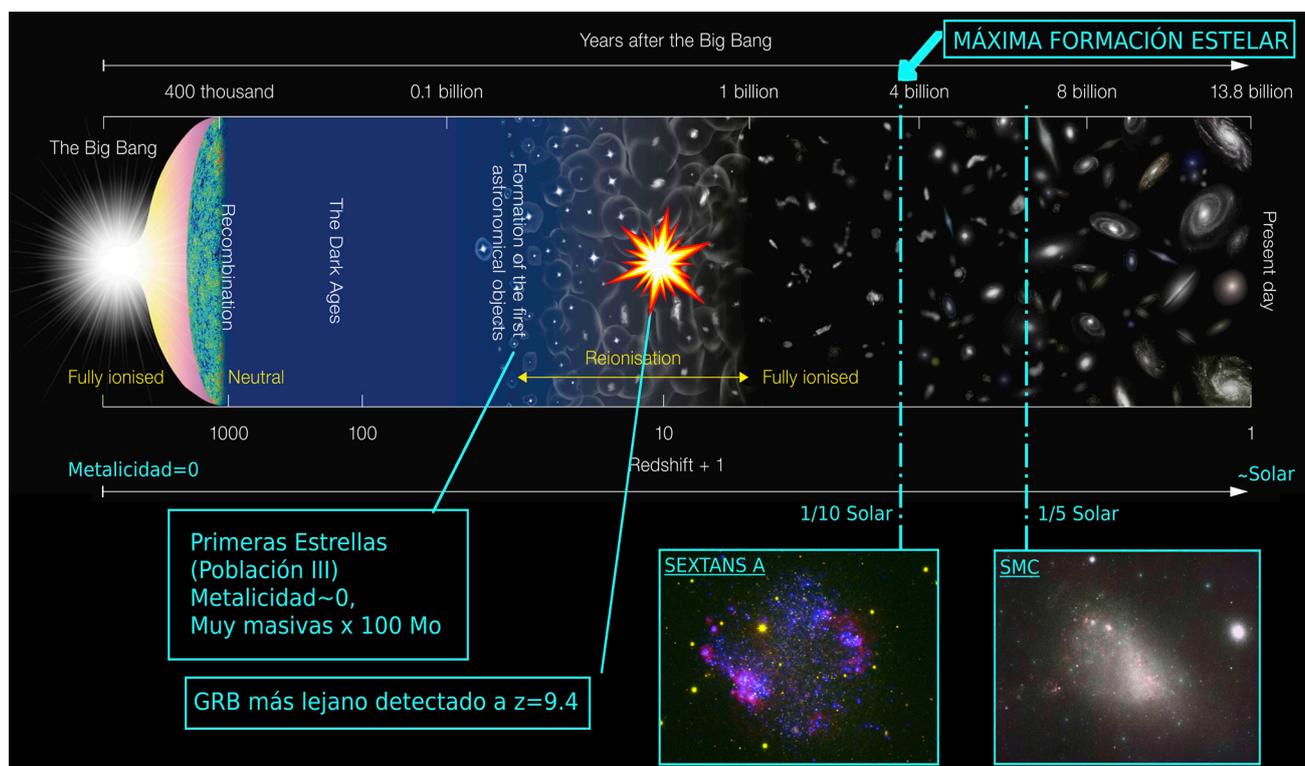
La puesta en marcha de GTC y el acceso de España al Very Large Telescope (VLT) propició que explorásemos galaxias del Grupo Local con metalicidad inferior a la de la SMC. Comenzamos con la más cercana, IC1613, a ~ 750 Kpc, donde estudios de regiones HII señalaban un contenido en Oxígeno de $1/7$ Solar. Pronto surgieron dudas sobre la dependencia del viento con la metalicidad: junto a una conocida Wolf-Rayet (WR) de Oxígeno [2], descubrimos una estrella O con un viento demasiado fuerte para su metalicidad [3] y una variable luminosa azul (LBV), con altas pérdidas de masa [4]; otros grupos encontraron posteriormente resultados similares en estrellas O [5].

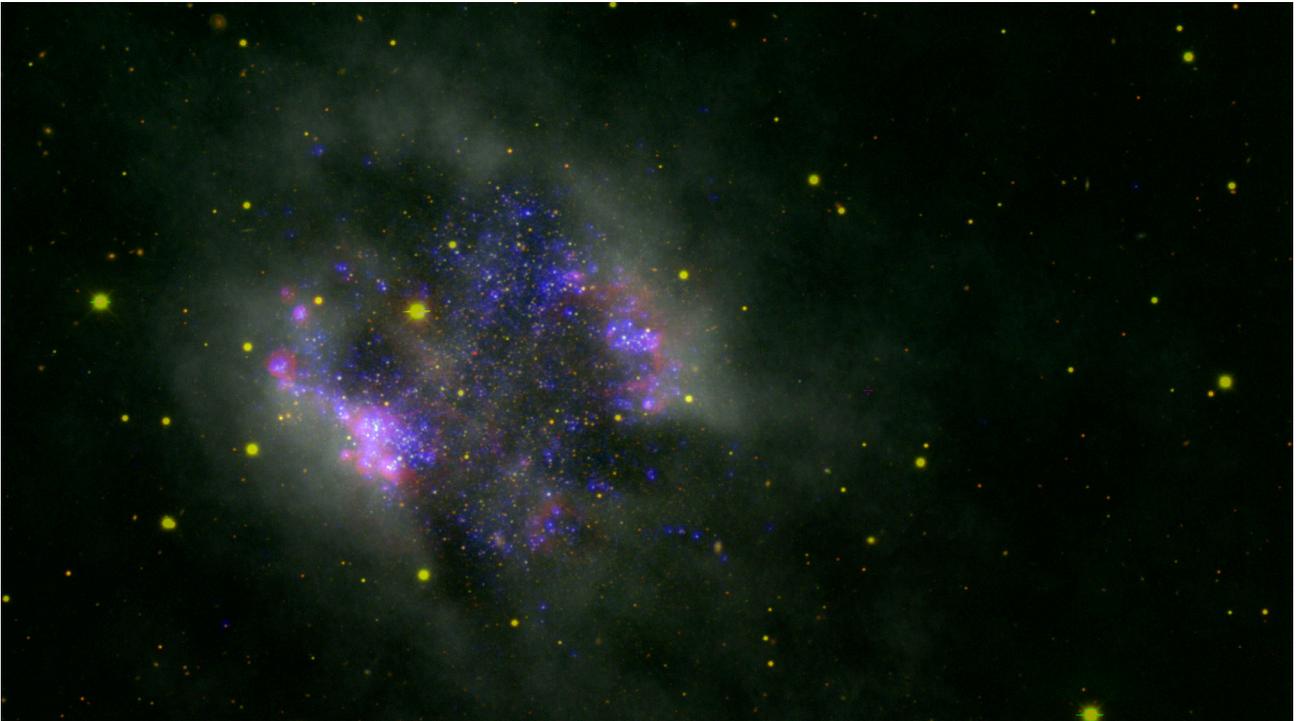
Con Hubble Space Telescope (HST) obtuvimos espectros UV, más sensibles a los vientos estelares que los espectros en el rango visible, que aportaron nueva información sobre la metalicidad de IC1613 [6]. El contenido de Hierro, principal portador del viento, resultó ser similar o superior al de la SMC¹. No habíamos alcanzado el régimen de baja metalicidad.

AMPLIANDO LOS LÍMITES

Comenzamos así a trabajar en Sextans A, una galaxia irregular con abundancias nebulares de Oxígeno de $1/10$ Solar y $[\alpha/Fe]=0$. Pero con un precio: localizada en un filamento a punto de ser acretado por el Grupo Local, Sextans A se encuentra al doble de distancia que IC1613, 1.3 Mpc. Obtuvimos los primeros espectros de estrellas masivas con

El contenido en metales del Universo ha aumentado de manera continuada desde la explosión de las primeras supernovas hasta la actualidad. La metalicidad de la SMC, aproximadamente $1/5$ Solar, es similar a la metalicidad promedio del Universo a $z=1$. Sextans A nos permite dar un salto atrás en el tiempo de unos tres mil millones de años. Su metalicidad, $1/10$ Solar, se asemeja a la de $z=2$, una época muy interesante dado que corresponde al máximo de formación estelar del Universo. Esquema de la evolución del Universo adaptado de <https://www.eso.org/public/images/eso1620a/>, crédito NAOJ.





La galaxia irregular enana Sextans A. En esta composición de colores rojo codifica la imagen tomada con el filtro estrecho $H\alpha$, verde codifica la banda-V y azul la imagen UV. También se ha superpuesto la distribución de Hidrógeno atómico neutro en blanco. Sextans A contiene varias zonas de formación estelar señalizadas con grandes estructuras de HII, y las múltiples detecciones UV indican que es rica en estrellas masivas. Nuestro equipo ha confirmado muchas de esas candidatas mediante espectroscopía con GTC, demostrando la presencia de estrellas masivas también en las afueras de la galaxia.

GTC [7] y confirmamos su bajo contenido en Hierro con HST [8]. Después siguieron cuatro campañas de observación con GTC, que han resultado en unas 100 estrellas OB con el potencial de constituir el nuevo referente para el Universo a z intermedio. Es la única muestra de EMPM resueltas con metalicidad inferior a la SMC, y ya ha suscitado gran interés en la comunidad internacional. Constituye el núcleo de la sección de baja metalicidad de ULLYSES [9], un ambicioso programa para crear una librería espectral de referencia para estudiar la formación estelar a lo largo de la historia del Universo.

Las EMPM detectadas en Sextans A permiten un primer análisis de los mecanismos de formación estelar en una galaxia irregular enana pobre en metales, con contenido moderado de H I, y sin pruebas sólidas de la presencia de gas molecular. Nuestro censo es aún incompleto, pero las estrellas más jóvenes y masivas

hasta el momento se encuentran aisladas en las afueras de la galaxia [10], donde la densidad de Hidrógeno roza el mínimo aceptado para la formación estelar. Este hallazgo estimula preguntas sobre la densidad de gas mínima para formar estrellas, o si se pueden formar a partir de H I como indican simulaciones a baja metalicidad, y abre el debate de la importancia relativa de diversos factores ambientales (metalicidad, tasa local de formación estelar, reserva de gas).

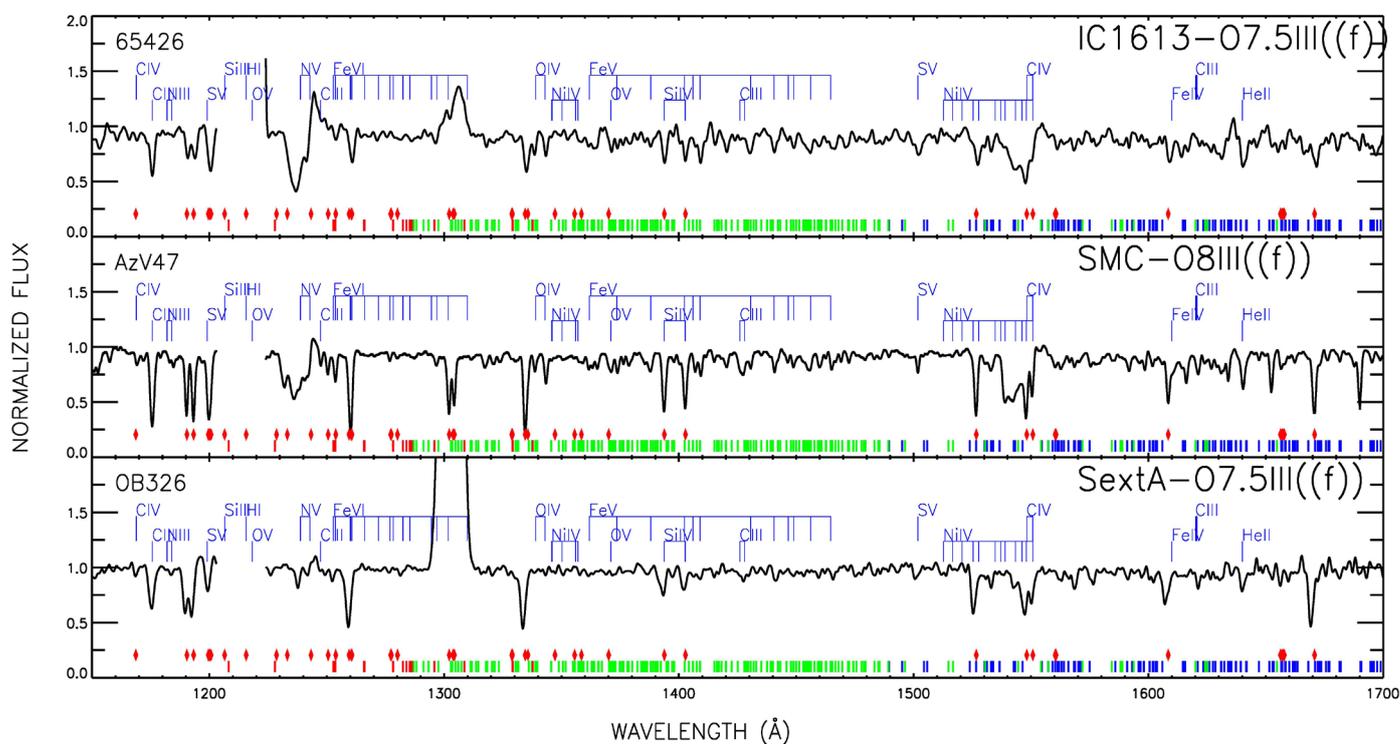
También emerge la pregunta de si existen estrellas muy masivas en Sextans A. Sin metales que ayuden a enfriar el gas, las nubes se fragmentarían en masas mayores, dando lugar a estrellas más masivas. Pendiente de reconciliar este supuesto con los modelos detallados de formación estelar, esto sugiere que las primeras estrellas del Universo (población III) pudieron tener cientos de masas solares. Las estrellas resueltas más masivas que se conocen, con

unas 150–200 M_{\odot} [11], se encuentran en el corazón de la Nebulosa de la Tarántula y son moderadamente pobres en metales (2/5 Solar). Esperaríamos pues encontrar estrellas comparables en Sextans A, lo que no ha ocurrido aún, aunque a esta distancia la resolución espacial de la instrumentación actual dificulta el estudio de regiones análogas a la Tarántula. La masa estelar máxima que encontremos en Sextans A proporcionará un nuevo punto de baja metalicidad que será fundamental para reconstruir la IMF de las primeras estrellas.

LAS NUEVAS PERSPECTIVAS

En paralelo, los modelos teóricos de estrellas masivas también han avanzado. Por un lado, los modelos de evolución estelar han vuelto a dar protagonismo a la evolución química homogénea (CHE). Con

una rotación suficientemente rápida los procesos de mezcla rompen el gradiente químico en el interior, y los productos de reacciones nucleares salen a la superficie. Las estrellas con CHE tendrán temperaturas mayores que las de la secuencia principal de edad cero, aumentando la producción de fotones ionizantes. Por su estructura interna, las EMPM pueden entrar en el canal CHE con velocidades de rotación moderadamente altas y, al no experimentar vientos fuertes que retiren el momento angular, las conservarán. Ello implica una mayor incidencia de la CHE en galaxias de baja metalicidad. Algunos modelos predicen para las estrellas más masivas y muy pobres en metales un régimen especial CHE de temperaturas y luminosidades altísimas (estrellas TWUIN) [12], con una copiosa producción de fotones ionizantes de Hell.



Comparación de los espectros UV que obtuvimos con el espectrógrafo COS a bordo del Hubble Space Telescope para estrellas-O en IC1613 y Sextans A, y una estrella de temperatura efectiva y luminosidad similares en la SMC. Las líneas verdes en la parte inferior de cada panel marcan una miríada de transiciones de átomos del grupo de Hierro que bajan el nivel del continuo de flujo y pueden usarse para constreñir el contenido en metales. El continuo entre 1350 y 1500 Å es más plano según bajamos en la figura, lo que define una secuencia de metalicidad decreciente. Figura tomada de [8].

La existencia de estrellas TWUIN y de estrellas muy masivas ($>200 M_{\odot}$) modificaría significativamente el presupuesto de fotones ionizantes de regiones de formación estelar a lo largo de toda la historia del Universo. Ayudaría también a explicar la emisión nebulosa de Helix 1640 y Helix 4686 detectada en IZw18 [13] y otras galaxias cercanas ($z < 0.01$) extremadamente pobres en metales [14]. Sin embargo, no todos los códigos de evolución estelar predicen el canal CHE o TWUIN, por diferencias en la implementación de los procesos de convección, rotación, mezcla, inflación, campos magnéticos y *overshooting*. Es crítico pues confirmar espectroscópicamente la existencia o no de estrellas CHE y estrellas TWUIN en galaxias de baja metalicidad y, de existir, acotar su frecuencia. Nuestro censo en Sextans A cuenta con candidatos para su seguimiento, pero aún no hemos confirmado ningún ejemplar.

Por otro lado, se están abriendo nuevas perspectivas con los modelos de evolución de sistemas binarios, una línea poco explorada en el pasado por disponer de una estadística limitada de sistemas y suponer un formidable reto computacional. En la última década se había aceptado que la mayoría de las estrellas masivas nace en sistemas binarios y que muchas de ellas interactuarán con su compañera [15], pero la relevancia de las binarias masivas ha quedado rotundamente constatada con la puesta en marcha de los observatorios de ondas gravitatorias.

La primera detección (GW150914) reveló la fusión de dos agujeros negros con unas $30 M_{\odot}$ cada uno, excediendo la predicción máxima de todos los modelos de evolución estelar [16]. Este sistema inmediatamente sugiere un bajo contenido en metales para que los consiguientes vientos débiles permitan a las estrellas mantener gran parte de su masa hasta el final. Se torna pues, fundamental, modelar binarias de alta masa y baja metalicidad. GW150914 también impuso restricciones a la configuración orbital y a la interacción de las estrellas antes de su colapso. Estrellas que permanezcan dentro de su lóbulo de Roche y eviten la formación de una envoltura común, serán más propensas a formar agujeros negros masivos. Se invoca nuevamente el canal evolutivo CHE que soluciona la necesidad del régimen de baja metalicidad y de que la estrella se mantenga compacta [17].

La demografía de agujeros negros que LIGO está dibujando supone un increíble estímulo para los estudios de binarias masivas. Observaciones actuales indican que fases evolutivas post-secuencia principal como supergigantes rojas, LBVs y WRs podrían también alcanzarse por evolución en sistemas binarios o por fusión estelar [18]. La interacción binaria podría retirar completamente la capa más exterior de la estrella donante, exponiendo un núcleo caliente cuyo espectro podría asemejarse al de una WR [19]. Esta interacción cobra especial relevancia a baja metalicidad, al proporcionar un mecanismo adicional de pérdida de masa. Por ejemplo, podría explicar las SN-Ic con líneas anchas asociadas a GRBs largos, detectadas en galaxias pobres en metales [20].

HACIA EL FUTURO

Como espectroscopistas estamos en una posición privilegiada para realizar nuevos descubrimientos y acotar los modelos: confirmando (o no) estos nuevos tipos de objetos, encontrando las frecuencias relativas de las diferentes fases evolutivas, determinando parámetros estelares y del viento, midiendo abundancias químicas, y caracterizando sistemas binarios.

Un avance significativo requerirá espectroscopía de estrellas con magnitud $V \sim 20-21$ con resolución intermedia ($R \sim 5000$) y buena razón señal a ruido en el rango visible, junto con espectroscopía UV para estudiar sus vientos y una alta resolución espacial. Todo ello con tiempos de exposición ágiles que permitan observaciones multi-época para caracterizar sistemas binarios. Estamos avanzando en producir censos, realizar análisis individuales y localizar buenos candidatos para estudios exhaustivos, pero tales observaciones con grandes muestras son aún inviables.

El Telescopio Europeo Extremadamente Grande (ELT) pronto romperá este bloqueo. Su gran poder colector alcanzará las estrellas masivas hasta la secuencia principal en todo el Grupo Local. HARMONI resolverá las regiones de formación estelar más densas de las galaxias de baja metalicidad, lo que nos permitirá ir a la caza de las estrellas muy masivas. La caracterización exhaustiva que planeamos para el resto de población masiva será posible gracias a espectrógrafos multi-objeto tipo MOSAIC.

Con la puesta en marcha de ELT sólo quedará por caracterizar un aspecto, aunque fundamental, de las EMPM: sus vientos. Para ello se necesitará un telescopio con capacidad UV y, al menos, 4 m de diámetro. Tal telescopio podría materializarse en la próxima gran misión de NASA: dos de los cuatro conceptos de misiones propuestos para el *Decadal survey* iniciado en 2016, LUVUOIR y HabEx, contemplan la puesta en órbita de un telescopio de gran diámetro y capacidades UV.

En definitiva, estamos presenciando una revolución en el campo de estrellas masivas que la instrumentación disponible a corto y medio plazo alimentará de manera exponencial. La conjunción de nuevos hallazgos y avances paralelos en los modelos de síntesis de poblaciones y evolución de galaxias van a cambiar sin duda nuestra visión e interpretación de la historia del Universo, desde el Grupo Local a la época de la re-ionización.

NOTA

¹ La razón de abundancias de elementos α (cuyo principal representante es el Oxígeno) frente al Hierro ($[\alpha/\text{Fe}]$) se desvía frecuentemente de la Solar según la historia de formación estelar de una galaxia. Además, los átomos de Oxígeno pueden depositarse en granos de polvo en las regiones HII, resultando en abundancias nebulares inferiores al contenido real. Ambos efectos suelen ignorarse en estudios de galaxias lejanas, cuyos únicos diagnósticos de metalicidad son las líneas fuertes de Oxígeno, pero pueden tener un alto impacto en la interpretación de la población subyacente.

REFERENCIAS (POR ORDEN DE USO)

- [1] Madau, P., & Dickinson, M. 2014, ARA&A, 52, 415
- [2] Dodorico, S. & Rosa, M. 1982, A&A, 105, 410
- [3] Herrero, A., Garcia, M., Puls, J., et al. 2012, A&A, 543, A85
- [4] Herrero, A., Garcia, M., Uytterhoeven, K., et al. 2010, A&A, 513, A70
- [5] Tramper, F., Sana, H., de Koter, A., Kaper, L., & Ramírez-Agudelo, O. H. 2014, A&A, 572, AA36
- [6] Garcia, M., Herrero, A., Najarro, F., Lennon, D. J., & Urbaneja, M. A. 2014, ApJ, 788, 64
- [7] Camacho, I., Garcia, M., Herrero, A., & Simón-Díaz, S. 2016, A&A, 585, A82
- [8] Garcia, M., Herrero, A., Najarro, F., et al. 2017, The Lives and Death-Throes of Massive Stars, 329, 313
- [9] <https://ulyses.stsci.edu/>
- [10] Garcia, M., Herrero, A., Najarro, F., Camacho, I., & Lorenzo, M. 2019, MNRAS, 484, 422
- [11] Crowther, P. A., Caballero-Nieves, S. M., Bostroem, K. A., et al. 2016, MNRAS, 458, 624
- [12] Szécsi, D., Langer, N., Yoon, S.-C., et al. 2015, A&A, 581, A15
- [13] Kehrig, C., Vílchez, J. M., Pérez-Montero, E., et al. 2015, ApJL, 801, L28
- [14] Senchyna, P., Stark, D. P., Charlot, S., et al. 2021, MNRAS, 503, 6112.
- [15] Sana, H., de Mink, S. E., de Koter, A., et al. 2012, Science, 337, 444
- [16] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T. D., et al. 2016, Physical Review Letters, 116, 241102
- [17] de Mink, S. E. & Mandel, I. 2016, MNRAS, 460, 3545
- [18] Beasor, E. R., Davies, B., Smith, N., et al. 2020, MNRAS, 492, 5994
- [19] Götzberg, Y., de Mink, S. E., Groh, J. H., et al. 2018, A&A, 615, A78
- [20] Modjaz, M., Bianco, F. B., Siwek, M., et al. 2020, ApJ, 892, 153