

# Entendiendo el fenómeno *born-again* en nebulosas planetarias.

M.C. Janis Berenice Rodríguez González

Tutor: Dr. Jesús A. Toalá

10 de junio de 2021

## 1. Introducción

Las nebulosas planetarias (NPs) representan una de las etapas finales de evolución del medio circunestelar de estrellas de baja masa e intermedia ( $1 M_{\odot} \lesssim M_i \lesssim 8 M_{\odot}$ ). Estas estrellas pueden perder más de la mitad de su masa inicial durante la fase conocida como rama asintótica de las gigantes (AGB por sus siglas en inglés) en donde experimentan vientos lentos y densos ( $\dot{M}_{AGB} \lesssim 10^{-5} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$ ,  $v_{AGB} = 20 \text{ km s}^{-1}$ ; Ramstedt et al., 2020). Finalmente, al evolucionar en una estrella post-AGB desarrollan un viento rápido ( $v_{\infty} = 500\text{--}4000 \text{ km s}^{-1}$ ; Guerrero & De Marco, 2013) que barre y comprime el material previamente eyectado. Como consecuencia de su evolución, la estrella central desarrolla un fuerte flujo UV que fotoioniza el material, creando una NP (Kwok et al., 1978).

Existen una gran variedad de morfologías de NPs que requieren mecanismos de formación más complejos que el descrito arriba. Desde hace algunas décadas, Balick (1987) propuso el llamado modelo generalizado de vientos que sugiere que la pérdida de masa durante la fase AGB o post-AGB debería ser asimétrica. Entre las propuestas más destacadas se encuentran las eyecciones bipolares de masa (jets), rotación estelar y campos magnéticos (ver la revisión presentada por Zijlstra, 2015). Sin embargo, es aceptado que el escenario binario podría explicar la mayoría de las morfologías en NPs (García-Segura et al., 2020; Zou et al., 2020).

En casos muy excepcionales las estrellas centrales de NPs pueden experimentar lo que se conoce como un pulso térmico muy tardío (VLTP por sus siglas en inglés; Iben et al., 1983). El VLTP ocurre cuando la combustión termonuclear de H en la envoltura estelar ha producido una capa de He con la masa crítica para encender su fusión en C y O (Lawlor & MacDonald, 2006; Miller Bertolami et al., 2006). Como resultado la estrella aumentará su tamaño lo que ocasionará que su temperatura efectiva ( $T_{\text{ef}}$ ) disminuya, es decir se enfría y, por lo tanto, regresa al lugar reservado de las estrellas AGB en el diagrama Hertzsprung-Russell (HR). Como resultado de la explosión termonuclear, el material procesado (pobre en H y rico en C) se expande dentro de la NP vieja (formando una NP de doble capa; ver Guerrero et al., 2018). A partir de ahí, la estrella repetirá su evolución hacia la traza post-AGB por una segunda ocasión (ver Fig. 1). Por tanto, a las estrellas que experimentan este proceso se les conoce como nacidas de nuevo (en inglés *born-again*).

En la actualidad se han identificado muy pocas NPs *born-again* (ver Guerrero et al., 2018; Gvaramadze et al., 2020; Toalá et al., 2019), entre ellas, A 30, A 58 (V 605 Aql), A 78, HuBi 1, NGC 40 y el Objeto Sakurai (V 4334 Sgr). Todas ellas presentan una estructura de doble capa con la nebulosa vieja rica en H y una estructura interna resultado de la eyecta del VLTP con abundancias atípicas pobres en H (e.g., Guerrero & Manchado, 1996). Además las NPs *born-again* presentan altos flujos infrarrojos (IR) como consecuencia de la producción de polvo rico en C (Cohen et al., 1977). Es importante notar que sus estrellas progenitoras son estrellas pobres en H, clasificadas como del tipo [WR] ricas en C o simplemente etiquetadas como [WC]<sup>1</sup>.

Las NPs *born-again* son entonces eslabones importantes en la evolución de estrellas de baja masa, la producción de polvo en ambientes únicos y la formación de estrellas del tipo [WC].

---

<sup>1</sup>Para diferenciar a las estrellas centrales de NP tipo WR de las estrellas WR masivas se usan corchetes (e.g., Crowther et al., 1998).

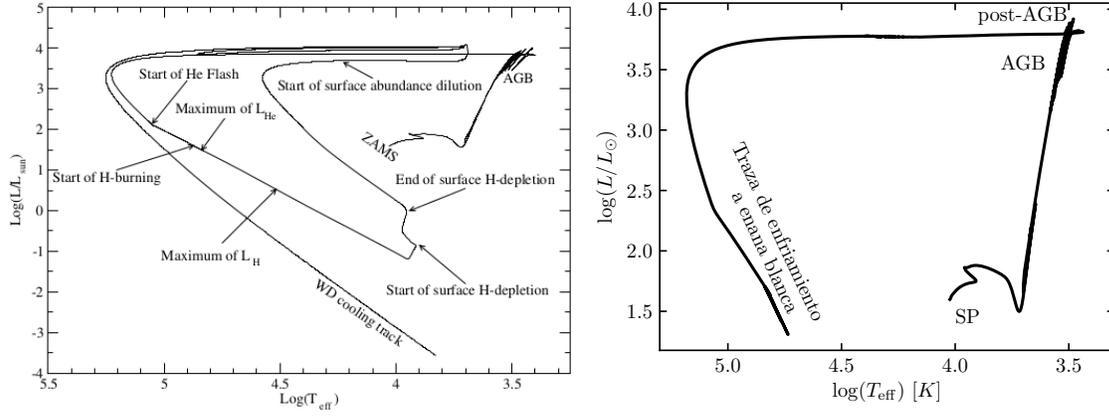


Figura 1: Comparación de las trazas evolutivas en el diagrama HR de una estrella que experimenta un VLTP (panel izquierdo) y una que no lo experimenta (panel derecho). El panel izquierdo corresponde a una traza evolutiva para una estrella de masa inicial de  $2.5 M_{\odot}$  que experimenta un VLTP obtenido de Miller Bertolami et al. (2006). En el panel derecho mostramos una traza evolutiva para una estrella de  $2 M_{\odot}$  obtenido con el código de evolución estelar MESA (ver Sección 3). En ambos paneles se señalan las diferentes etapas de vida de una estrella pasando por la secuencia principal (SP), la fase de AGB y post-AGB. En ambos casos la estrella se convierte en una enana blanca.

## 2. Estado del arte

En 1996 se reportó que la estrella variable V4334 Sgr, descubierta por el astrónomo amateur Yukio Sakurai, experimentó cambios significativos en brillo. Esta redujo su magnitud de 12.5 a principios de Enero de 1995 a 16 mag en 1996 (Duerbeck et al., 1996; Nakano et al., 1996). Actualmente se sabe que esta estrella está asociada a la NP G010.4+04.4 y se conoce simplemente como el Objeto Sakurai. Durante años ha sido una de las NPs *born-again* más estudiadas debido a los cambios dramáticos en química, luminosidad y temperatura (ver panel izquierdo de la Fig. 2). Evans et al. (2020) recientemente demostró que el material eyectado durante el VLTP se ha enfriado de  $\sim 1000$  a  $\sim 180$  K en los últimos 20 años creando un cascarón de polvo con masa que ha pasado de  $10^{-10}$  a  $10^{-5} M_{\odot}$ .

Sin embargo, el Objeto Sakurai no es la única NP *born-again* que ha experimentado cambios significativos en los últimos años. Guerrero et al. (2018) mostraron que la estrella central de la NP HuBi1 redujo su brillo un factor de 10,000 entre 1971 y 2017 (ver panel derecho de la Fig. 2). Por otro lado, la expansión del material pobre en H en la NP A58, la cual experimentó su VLTP hace  $\sim 100$  años, ha permitido observar su estrella central por primera vez (Clayton et al., 2013).

Estas observaciones demuestran que [podemos usar a las NPs \*born-again\* como laboratorios de evolución estelar, física de plasmas, producción de polvo en ambientes pobres en H y la formación de estrellas \[WC\] en escalas de tiempo humanos.](#)

### 2.1. Modelos de Evolución Estelar

En la literatura existen algunos trabajos que estudian la evolución de estrellas que experimentan un VLTP. Entre ellos queremos destacar los trabajos de Herwing et al. (1999), Lawlor & MacDonald (2006), Miller Bertolami et al. (2006) y Miller & Althaus (2007). En dichos trabajos se exploran diversos modelos variando la longitud de mezclado entre diferentes capas dentro de la estrella, la eficiencia del mezclado (la teoría de mezclado o MLT por sus siglas en inglés), la masa inicial y la metalicidad. En particular, Miller & Althaus (2007) demostraron con modelos relativamente sencillos en 1D que la evolución del Objeto Sakurai puede ser explicada con la MLT.

Los parámetros que se han explorado hasta el momento son limitados, considerando la gran cantidad de

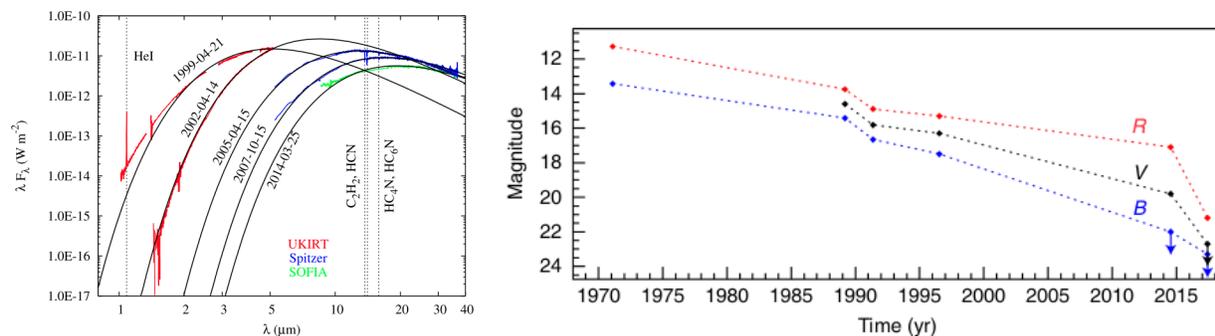


Figura 2: Izquierda: Evolución temporal de las propiedades IR de la eyecta pobre en H del Objeto Sakurai (V 4334 Sgr) reportada en Evans et al. (2020). Derecha: Evolución de la fotometría de la estrella central de HuBi 1 en las bandas  $B$ ,  $V$  y  $R$  reportada en Guerrero et al. (2018).

variables que están involucradas en la evolución estelar. Además, existe un problema de consistencia entre los modelos existentes en la literatura. Parece que el tiempo de la duración del fenómeno *born-again* no es consistente entre los diferentes trabajos usando diferentes códigos de evolución estelar. Lawlor & MacDonald (2006) encuentra que el fenómeno *born-again* tiene una duración de unas pocas centenas de años mientras que Herwing et al. (1999) encuentra un tiempo de algunas decenas de años. Miller Bertolami et al. (2006) encuentran que dependiendo de la longitud de mezclado ( $\alpha_{\text{MLT}}$ ) y la eficiencia de mezclado ( $\beta_{\text{MLT}}$ ) que se use en los cálculos numéricos tendrá consecuencias en la duración de la fase *born-again*. Miller Bertolami et al. (2006) encuentran que el rango de tiempo para la etapa de *born-again* se encuentra entre 20 y 400 años.

Sin embargo, aún no se comprende muy bien como afectan otros parámetros a la duración del fenómeno. Por ejemplo, la receta de pérdida de masa adoptada durante la etapa AGB. Además, la evolución temporal de algunos modelos durante el VLTP es tan pequeña que es comparable con los tiempos de las reacciones nucleares que dominan el interior de la estrella. Causando que el tiempo de la duración del VLTP dependa del tiempo numérico.

## 2.2. Escenario simple *versus* binario

En contraste con los modelos de evolución estelar descritos arriba, las NPs *born-again* presentan algunas características que parecen sugerir que albergan sistemas binarios como progenitores. Por ejemplo, observaciones ópticas e IR obtenidas con el Hubble Space Telescope (HST) y el telescopio Gemini han demostrado que la morfología de la eyecta pobre en H alrededor de las estrellas de A 30, A 58, A 78 y el Objeto Sakurai tiene una morfología bipolar, formada por un disco y un par de jets (ver por ejemplo la Fig. 3; Clayton et al., 2013; Fang et al., 2014; Hinkle & Joyce, 2014). Además, Wesson et al. (2018) demostraron que entre las NPs con el *factor de discrepancia de abundancias* más grandes se encuentra la NP *born-again* A 30 sugiriendo que alberga un sistema binario. Sin embargo, el resultado más controversial durante una década ha sido relacionado con las abundancias.

Lau et al. (2011) compararon las abundancias del material pobre en H de A 30 y A 58 obtenidas por Wesson et al. (2003, 2008) con las predicciones de los modelos de evolución estelar (descritos en la sección anterior). Ellos encontraron que mientras los modelos de evolución estelar predicen un cociente de masas de  $C/O > 1$ , las abundancias obtenidas de las observaciones reportan valores en el rango de  $C/O \approx 0.06\text{--}0.30$ . Lau et al. (2011) sugirieron entonces que las NP *born-again* se podrían explicar mucho mejor adoptando un escenario binario, en donde la producción y eyección del material pobre en H era debida a un evento tipo *nova*. En su tabla 1, Lau et al. (2011) presentan las predicciones del cociente de  $C/O$  de modelos de explosiones de nova y estos resultan en valores alrededor de 0.05–0.60, más consistente con el valor obtenido de observaciones ópticas.

¿En dónde se encuentra el C faltante? En las secciones anteriores hemos mencionado que después de experimentar el VLTP la estrella regresa a la región del diagrama HR designada para las estrellas AGB (ver Fig. 1), reduciendo su temperatura efectiva por debajo de  $10^4$  K. Esto permite la formación de polvo y moléculas a partir de la eyecta pobre en H y rica en C.

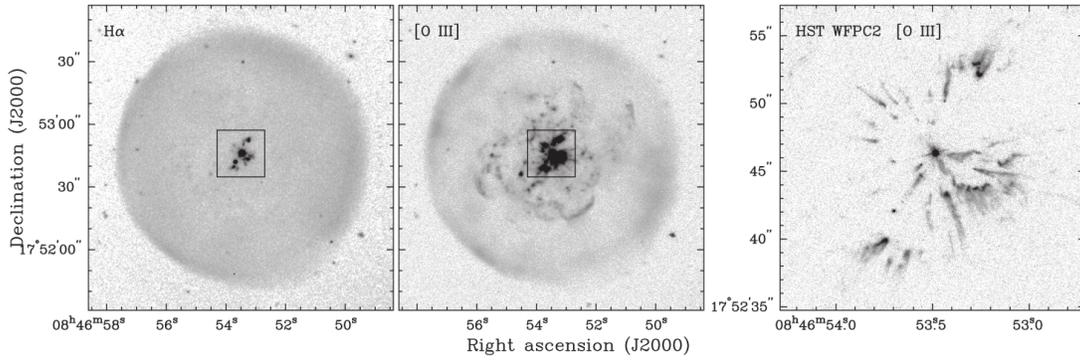


Figura 3: Imágenes ópticas de A30. Los paneles izquierdo y central muestran imágenes obtenidas con los filtros de  $H\alpha$  y  $[O III]$  tomadas con el KPNO Mayall de 4 m. El panel derecho muestra la estructura interna de A30 tomada con el filtro  $[O III]$  del HST usando la cámara WFPC2. El cuadro pequeño en los paneles izquierdo y central corresponden al campo observado con el HST. Imagen tomada de Guerrero et al. (2012).

Los 20 años de evolución de post-VLTP del Objeto Sakurai han demostrado que el material eyectado durante el evento *born-again* forma polvo rico en C casi inmediatamente. Este proceso es incitado por la alta metalicidad de este material (Evans et al., 2020). Polvo rico en carbono así como moléculas complejas ha sido detectado en las capas internas de las NPs *born-gain* (Borkowski et al., 1994; Clayton et al., 2013; Cohen & Barlow, 1974; Cohen et al., 1977; Toalá et al., 2019).

Recientemente, nuestro grupo presentó el estudio más completo de la caracterización de polvo en las NPs *born-again* A30 y A78 en Toalá et al. (2021a). Nuestras observaciones demuestran que el polvo rico en C (carbono amorfo, grafito y PAHs) coexiste con el material pobre en H y el gas caliente emisor en rayos X (Guerrero et al., 2012; Toalá et al., 2015) con distancias de hasta 40–50 arcsec de la estrella central (Fig. 4 panel izquierdo). Usando el código de transferencia radiativa Cloudy (Ferland et al., 2017) pudimos reproducir las observaciones ópticas e IR de A30 para estudiar el gas ionizado y el polvo presente en esta nebulosa.

Para lograr un buen ajuste fue necesario utilizar un espectro detallado de la atmósfera de la estrella central de A30 producido con el código de atmósferas estelares PoWR<sup>2</sup>. Además se adoptaron abundancias de la eyecta *born-again* reportadas en la literatura (Guerrero & Manchado, 1996; Wesson et al., 2003). Adoptamos una distribución de material de doble capa con densidades y factores de llenado  $n$  y  $\epsilon$  (ver panel central de la Fig. 4), respectivamente. Nuestro modelo Cloudy es capaz de reproducir las propiedades físicas ( $n_e$  y  $T_e$ ) así como las propiedades IR obtenidas de diferentes telescopios. En el panel derecho de la Fig. 4 mostramos nuestro mejor ajuste a la fotometría IR en donde la estructura interior del modelo es un disco.

Nuestro mejor modelo resultó en una masa total de gas  $M_{\text{gas}} = 4.41_{-0.14}^{+0.55} \times 10^{-3} M_{\odot}$  con el 35 % de masa en el cascaron externo. La masa total de polvo  $M_{\text{polvo}} = 3.20_{-2.20}^{+3.21} \times 10^{-3} M_{\odot}$  con un 95 % en la cascaro externa. Entonces, la masa total que corresponde a la masa eyectada durante el VLTP en A30 es de  $M_{\text{TOT}} = 7.61_{-2.20}^{+3.76} \times 10^{-3} M_{\odot}$ . (Los errores en los estimados dependen de diferentes valores como el error en la distancia, error en el flujo de  $H\alpha$  y la suposición de granos porosos con vacío entre el 10 y 90 %.)

Tomando en cuenta tanto la masa de C y O en el gas como la masa de C en el polvo, encontramos que  $C/O > 1.7\text{--}5.1$ . Con esto, hemos demostrado que la eyecta pobre en H de A30 es consistente con un escenario de evolución *born-again* en contraste con el escenario binario propuesto por Lau et al. (2011). Además, hemos demostrado que [una caracterización detallada tanto de las propiedades nebulares como del polvo rico en C nos ayudará a destejer el origen de las nebulosas \*born-again\*.](#)

<sup>2</sup><http://www.astro.physik.uni-potsdam.de/~wrh/PoWR/powrgrid1.php>

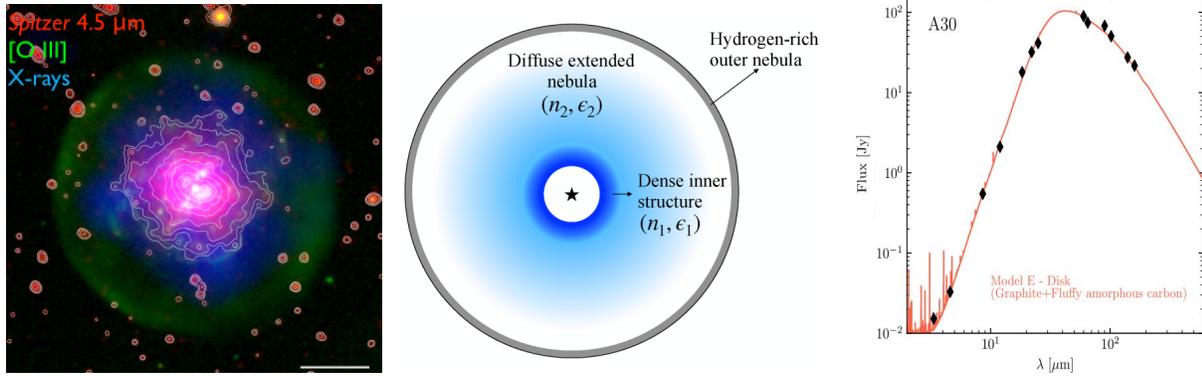


Figura 4: Izquierda: Imagen de colores de A 30. Rojo, verde y azul representan la emisión de Spitzer  $4.5 \mu\text{m}$ , [O III] y rayos X suaves (0.3–0.5 keV) detectados con XMM-Newton, respectivamente. Centro: Esquema usado para modelar las propiedades de A 30 en Cloudy. Derecha: Fotometría IR de A 30 (diamantes negros) y el mejor modelo obtenido con Cloudy (línea naranja). Imágenes tomadas de Toalá et al. (2021a).

### 3. Objetivos

Con este proyecto queremos profundizar nuestro entendimiento del fenómeno *born-again* en NPs atacándolo desde ángulos observacionales y teóricos. Tomando en cuenta la literatura actual descrita en los trabajos citados arriba, es necesario producir modelos de evolución estelar modernos creados con computadoras poderosas para resolver el problema de la resolución temporal. Así mismo, caracterizaremos las propiedades ópticas de NPs *born-again* así como la presencia de polvo rico en C. En consecuencia, nuestros objetivos son:

- Creación de modelos de evolución estelar con herramientas modernas tomando en cuenta el escenario *born-again* y el binario.
- Simulaciones radiativo-hidrodinámicas de la formación y evolución de NPs *born-again*.
- Caracterización de las NPs *born-again* con observaciones ópticas e IR.
- Búsqueda de nuevos candidatos de NPs *born-again*.

### 4. Metodología

A continuación se describe la metodología a seguir para realizar los objetivos presentados en la sección anterior.

#### 4.1. Modelos de evolución estelar

Para poder realizar este trabajo haremos uso del código de evolución estelar público *Modules of Experiments of Stellar Evolution* (MESA; Paxton et al., 2010)<sup>3</sup>. MESA nos permite estudiar la evolución de una estrella modificando diversos parámetros físicos como la masa inicial ( $M_i$ ), la velocidad de rotación ( $v_{\text{rot}}$ ), tasa de pérdida de masa ( $\dot{M}$ ) en diferentes etapas evolutivas, entre otros. A diferencia de otros códigos de evolución estelar, MESA se encuentra paralelizado, lo que nos permite reducir el tiempo de cómputo<sup>4</sup> y por lo tanto correr un gran número de modelos. MESA tiene la ventaja que ha sido y sigue siendo construido por usuarios alrededor del mundo de manera colaborativa. Está diseñado de manera modular, así que los usuarios que modifiquen ciertas rutinas las comparten con el resto de la red MESA para su implementación y prueba.

Usaremos MESA para crear dos grids de modelos de evolución estelar: 1) modelos de evolución de estrellas sencillas que produzcan un evento *born-again* y 2) modelos de estrellas binarias que produzcan un evento tipo

<sup>3</sup><http://mesa.sourceforge.net/>

<sup>4</sup>Un modelo típico de evolución estelar de una estrella con masa inicial de  $1.5 M_{\odot}$  tarda 6 h en realizar los cálculos de la ZAMS hasta la traza de enfriamiento de enana blanca en 4 procesadores.

nova. En total tendremos grids con más de 300 modelos de evolución estelar que nos permitirán aportar luz a la discusión sobre el escenario *born-again* contra el escenario nova que se explicó en la sección anterior. También se explorará el impacto que tienen las diferentes recetas empíricas de los parámetros del viento ( $\dot{M}$  y  $v_\infty$ ) en la producción del evento *born-again*. Por ejemplo, para la fase AGB exploraremos las diferentes recetas de  $\dot{M}$  propuestas en la literatura (e.g., Blöcker, 1995; Reimers, 1975; Schröder & Cuntz, 2005).

Así mismo, exploraremos las diferencias que producen variando los parámetros de la MLT. La longitud de mezclado  $\alpha_{\text{MLT}}$  y la eficiencia  $\beta_{\text{MLT}}$  nos ayudarán a restringir la duración del evento *born-again* en nuestro grid y evaluar los estimados reportados por diferentes autores que varía de algunas decenas a centenas de años.

De igual manera, MESA posee un módulo que permite calcular modelos de evolución estelar de sistemas binarios. El modulo permite modificar los parámetros de la evolución de cada una de las estrellas como objetos independientes. Para este segundo grid tomaremos en cuenta, a parte de los parámetros descritos arriba, la separación entre las componentes, excentricidad y cociente de masas.

Cada modelo nos dará un archivo de salida que nos permite caracterizar la estructura física y química de la estrella en cada paso de tiempo. Nuestro objetivo es estudiar las abundancias justo después del evento *born-again* o el evento nova (en el caso de sistemas binarios) que compararemos directamente con las observaciones. Lau et al. (2011) concluyó que los parámetros indispensables para evaluar si se trata de un escenario binario (o no) son el cociente C/O y la abundancia de Ne. El segundo grid de modelos binarios nos servirán como un mecanismo de control.

Como objetivo final de esta parte del proyecto, pondremos todos los modelos obtenidos en un repositorio público. Esta será la primera vez que se crea un repositorio público de modelos de evolución estelar que experimentan el fenómeno *born-again*.

#### 4.2. Simulaciones radiativo-hidrodinámicas de la formación y evolución de NPs *born-again*

Como resultado de correr los grid de modelos MESA, tendremos una visión detallada de cómo varían los parámetros estelares ( $L$ ,  $T_{\text{ef}}$ ,  $R$  y  $M$ ) así como los parámetros del viento estelar ( $\dot{M}$  y  $v_{\text{rot}}$ ) en función del tiempo. Usaremos dichos modelos evolutivos como parámetros de entrada en el código radiativo-hidrodinámico presentado por Arthur (2012) y Toalá & Arthur (2011) para simular la creación y evolución de NPs *born-again*.

El código resuelve las ecuaciones de la hidrodinámica en 1D en simetría esférica y en 2D en simetría cilíndrica. Incluye un tratamiento detallado de la transferencia radiativa así como la opción de incluir conducción térmica o no. El código se ha usado con éxito para estudiar la formación de burbujas calientes que emiten rayos X de NPs, regiones H II y nebulosas Wolf-Rayet (ver Toalá & Arthur, 2016, 2018, y referencias ahí citadas).

Hasta la fecha no existen muchos modelos numéricos que estudien la formación de NPs *born-again*. Fang et al. (2014) presentaron simulaciones para reproducir la morfología y explicar la fenomenología experimentada por los grumos pobres en H en las NPs *born-again* A 30 y A 78. Mientras que muy recientemente, Toalá et al. (2021b) presentaron simulaciones radiativo-hidrodinámicas para estudiar la formación y evolución de la NP *born-again* HuBi 1. Sin embargo, ninguno de estos trabajos sigue la evolución detallada de los parámetros estelares producidos por la estrella. En ambos trabajos se toma una aproximación de vientos constantes para diferentes fases.

Como objetivo final de esta parte del proyecto es presentar los primeros modelos numéricos de la formación y evolución de NPs *born-again* siguiendo a detalle modelos de evolución estelar modernos, además de extender el impacto que tienen los sistemas binarios en la producción de material pobre en H dentro de NPs.

#### 4.3. Observaciones modernas

Los trabajos espectroscópicos que se encuentran en la literatura sobre las NPs *born-again* se basan en observaciones obtenidas con rendija larga que proporcionan una concepción observacional incompleta. Por ejemplo, observaciones de alta resolución de A 78 pueden resolver estructuras con velocidades de entre 50 y 200 km s<sup>-1</sup> (Meaburn et al., 1998), pero es incierto si la eyección ecuatorial de sus anillos rotos son co-planares, si existe variación en la extinción espacialmente, condiciones físicas y las abundancias químicas dentro de los nudos internos. Para obtener una visión completa de estas características es necesario obtener múltiples observaciones incluyendo

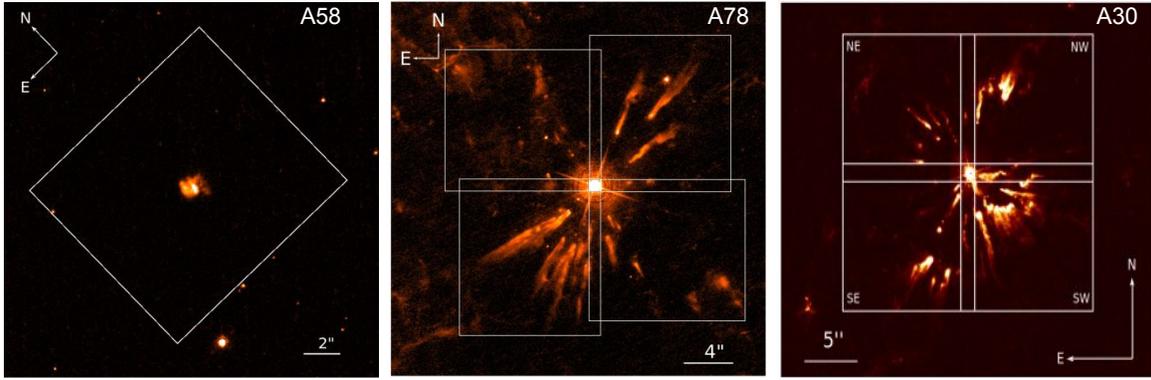


Figura 5: Imágenes obtenidas en el filtro [O III] con el HST de las NPs *born-again* A 58, A 78 y A 30. Los recuadros representan los apuntados para las observaciones MEGARA GTC. Las observaciones de A 58 y A 78 han sido concedidas en el semestre 2021A mientras que las observaciones de A 30 han sido solicitadas recientemente (Semestre 2021B).

imágenes de filtro delgado y espectros con diferentes orientaciones. Una campaña observacional que incluya todas estas observaciones sería demandante aún para un sólo objeto.

Este problema se puede solucionar con la instrumentación moderna disponible. En particular, con observaciones de espectroscopía de campo integral. Uno de los instrumentos punteros es el Multi-Espectrógrafo de Alta Resolución para Astronomía (MEGARA) (Gil de Paz et al., 2018) montado en el Gran Telescopio de Canarias (GTC; La Palma, España). MEGARA obtiene datos en el rango óptico de 4600 a 9300 Å con una resolución espectral de 3 Å y una resolución espacial de  $\sim 0.2$  arcsec.

Nuestro grupo ha sido galardonado en el semestre 2021A con observaciones Categoría B de MEGARA GTC de las NPs *born-again* A 58 y A 78 (PI: M.A. Guerrero). Un solo apuntado es necesario para observar A 58 (Fig. 5 panel izquierdo) pero 4 apuntados se requirieron para A 78 (Fig. 5 panel central). Nuestros objetivos son: i) estudiar la morfo-cinemática de la ejecta pobre en H en estas NPs usando las líneas de [N II] y [O III], ii) crear mapas de extinción de alta resolución usando los mapas de  $H\alpha$  y  $H\beta$ , iii) crear mapas de las líneas de recombinación de C y O para mapear las variaciones del cociente C/O y iv) estimar mapas del *factor de discrepancia de abundancias*. Las observaciones MEGARA GTC resultarán en estudios sin precedentes de estas NPs *born-again*.

De igual manera, en el semestre 2021B hemos enviado una propuesta para hacer un estudio similar de A 30. Los resultados de las evaluaciones serán públicos en unas semanas.

#### 4.4. Búsqueda de nuevos candidatos de NPs *born-again*

No existen más de 10 NPs caracterizadas como del tipo *born-again* (ver Sección 1), así que incrementar este número es crítico para poder estudiar las propiedades observacionales de estos objetos como una muestra representativa. Además, queremos comprender los caminos evolutivos experimentados por sus estrellas progenitoras en la producción del VLTP. Esto solo se puede lograr identificando nuevos candidatos, caracterizando las propiedades de la ejecta y las de sus estrellas progenitoras simultáneamente.

Hasta la fecha, sabemos que las NPs *born-again* comparten algunas características: 1) tienen estrellas centrales del tipo [WC], 2) presentan estructuras de doble capa y 3) la emisión IR de su capa interna está dominada por polvo rico en C. Así pues, para comenzar la búsqueda crearemos una lista de NPs con estrellas centrales tipo [WC] listadas en el catálogo de Weidmann et al. (2020) que será correlacionado con el catálogo de flujos IR presentado en Muthumariappan & Parthasarathy (2020). Se seleccionarán NPs con *colores* IR similares a las NPs *born-again* conocidas.

Para esta parte del proyecto explotaremos el archivo del telescopio espacial Spitzer disponible en el NASA IPAC

Infrared Science Archive<sup>5</sup>. Estamos interesados en las observaciones obtenidas con el Spitzer *Infrared Spectrograph* (IRS Houck et al., 2004) que provee una resolución espectral de  $R \approx 100\text{--}600$  y una resolución espacial de  $1.8\text{--}5.1$  arcsec dependiendo del modo de la observación. Las observaciones IRS cubren el rango espectral de  $5\text{--}38 \mu\text{m}$ .

Extraeremos perfiles radiales de las observaciones IRS de diferentes líneas de emisión ([Ar II]  $6.99 \mu\text{m}$ , [Ar III]  $8.99 \mu\text{m}$ , [Ne II]  $12.81 \mu\text{m}$  y [S IV]  $10.51 \mu\text{m}$ ) así como de líneas moleculares de PAHs (a  $6.3$ ,  $7.7$ ,  $8.6$  y  $11.3 \mu\text{m}$ ). Nuestro objetivo es identificar aquellas NPs con perfiles moleculares de PAHs que sean internos a las de las líneas de ionización.

Para confirmar nuestros candidatos a NPs *born-again* necesitamos espectros ópticos extraídos de los grupos ricos en polvo carbonaceo. Para ello se buscará en los archivos de los telescopios del grupo de Telescopios Isaac Newton (que incluye el William Herschel Telescope, Isaac Newton Telescope y el Jacobus Kapteyn Telescope) y en el archivo público de la ESO<sup>6</sup>. Para aquellos casos en que no existan observaciones disponibles, escribiremos propuestas de observación.

## 5. Cronograma

### Primer semestre

- Elaborar y presentar el ante proyecto.
- Búsqueda y familiarización de literatura que describa el fenómeno *born-again* en NPs, incluyendo trabajos observacionales y teóricos.
- Participar en la preparación de una propuesta de observación para la nebulosa *born-again* A30 con el instrumento MEGARA montado en el GTC.
- Asistir a las conferencias de evolución estelar organizadas por Online Meetings on Evolved Stars and Systems (O-MESS)<sup>7</sup>.

### Segundo semestre

- Búsqueda de NPs observadas con Spitzer con posible emisión de moléculas ricas en carbono en sus interiores como posibles candidatos a NPs *born-again*. Comenzar con la reducción de datos usando el software CUBISM.
- Familiarización con el código MESA.
- Asistir a la escuela de verano 2021 de MESA del 9 al 20 de Agosto. La cual será en línea.
- Conferencia en línea APN8 - Asymmetrical Post-Main-Sequence Nebulae 8 - The Shaping of the Circumstellar Matter del 4 al 8 de octubre.

### Tercer semestre

- Completar la reducción de datos obtenidos con Spitzer de NPs candidatas a ser NPs *born-again*. Comenzar a escribir un artículo con los resultados.
- Comenzar a correr modelos con el código de evolución estelar MESA para estudiar la producción del evento *born-again*. Se planea correr un grid de modelos variando la masa inicial, velocidad de rotación, metalicidad y longitud de mezcla.
- Buscar posibles congresos a los que asistir.

### Cuarto semestre

- Preparación de un artículo con los resultados de modelos MESA obtenidos para estrellas sencillas.
- Preparar artículo con los resultados de los posibles candidatos a NPs *born-again*
- Crear modelos para reproducir y estudiar el fenómeno *born-again* considerando el escenario binario.
- Comenzar un modelo de fotoionización con Cloudy que incluya polvo y gas para caracterizar la NPs A58 y A78. Comparar con observaciones GTC MEGARA.

<sup>5</sup><https://irsa.ipac.caltech.edu/frontpage/>

<sup>6</sup><http://archive.eso.org/cms.html>

<sup>7</sup><http://www.astro.physik.uni-potsdam.de/~o-mess/>

### Quinto semestre

- Preparar artículo con los resultados de los modelos considerando el escenario binario.
- Comenzar simulaciones radiativo-hidrodinámicas de la formación y evolución de NPs *born-again* tomando en cuenta los modelos de evolución estelar MESA obtenidos durante esta tesis.

### Sexto semestre

- Publicación de las simulaciones radiativo-hidrodinámicas de la formación y evolución de NPs *born-again*.
- Publicación del modelo Cloudy de las NPs A 58 y A 78.
- Buscar posibles congresos para presentar resultados obtenidos hasta el momento.

### Séptimo semestre

- Escribir la tesis.

### Octavo semestre

- Defender la tesis.

## 6. Índice tentativo de la tesis

- Capítulo 1: Introducción
- Capítulo 2: Comprendiendo el fenómeno *born-again* - modelos
- Capítulo 3: Caracterización de NPs *born-again* - observaciones
- Capítulo 4: Discusión
- Capítulo 5: Conclusiones
- Capítulo 6: Trabajo a futuro

## 7. Bibliografía básica

- Evans A. et al., 2020, MNRAS, 493, 1277  
Guerrero M. A. et al., 2012, ApJ, 755, 129  
Hazard, C., Terlevich, R., Morton, D. et al. 1980, Nature 285, 463  
Herwig F., Blöcker T., Langer N., Driebe T., 1999, A&A, 349, L5  
Iben I., Kaler J. B., Truran J. W., Renzini A., 1983, ApJ, 264, 605  
Lawlor, T. M., & MacDonald, J. 2006, MNRAS, 371, 263  
Lau H. H. B., De Marco O., Liu X.-W., 2011, MNRAS, 410, 1870  
Miller Bertolami M. M., Althaus L. G., Serenelli A. M., Panei J. A., 2006, A&A, 449, 313  
Miller Bertolami, M. M., Althaus, L. G., Serenelli, A. M., & Panei, J. A. 2006, A&A, 449, 313  
Toalá, J.A., Jiménez-Hernandez, P., Rodríguez-González, J.B. et al. 2021, MNRAS, 5003, 1543  
Toalá, J.A., Lora, V., Montoro-Molina, B., Guerrero, M.A. & Esqueviel, A. 2021, MNRAS,

## Referencias

- Aller, L. H., & Czyzak, S. J. 1979, Ap&SS, 62, 397  
Arthur, S. J. 2012, MNRAS, 421, 1283  
Balick, B. 1987, AJ, 94, 671  
Blocker, T., 1995, A&A, 297, 727-738  
Borkowski, K. J., Harrington, J. P., Blair, W. P., et al. 1994, ApJ, 435, 722

Cerruti-Sola, M., & Perinotto, M. 1985, ApJ, 291, 237

Clayton, G. C., Bond, H. E., Long, L. A., et al. 2013, ApJ, 771, 130

Cohen M., Barlow M. J., 1974, ApJ, 193, 401

Cohen M., Hudson H. S., Odell S. L., Stein W. A., 1977, MNRAS, 181, 233

Crowther, P. A., De Marco, O., & Barlow, M. J. 1998, MNRAS, 296, 367

Duerbeck H. W., et al., 1996, IAU Circ., 6328, 1

Evans A. et al., 2020, MNRAS, 493, 1277

Fang, X., Guerrero, M. A., Marquez-Lugo, R. A., et al. 2014, ApJ, 797, 100

Ferland, G. J., et al., 2017, RMxAA, 53, 385

García-Segura, G., Taam, R. E., & Ricker, P. M. 2020, ApJ, 893, 150

Gil de Paz, A., Carrasco, E., Gallego, J., et al. 2018, Proc. SPIE, 10702, 1070217

Gómez-Llanos, V., Morisset, C., et al., 2020, MNRAS, 498, L82

Guerrero M. A. et al., 2012, ApJ, 755, 129

Guerrero M. A. et al., 2018, Nat. Astron., 2, 784

Guerrero, M. A. & De Marco, O. 2013, A&A, 553, A126

Guerrero, M. A. & Manchado, A. 1996, ApJ, 470, 711

Gvaramadze V. V., Kniazev A. Y., Gräfener G., Langer N., 2020, MNRAS, 492, 3316

Hazard, C., Terlevich, R., Morton, D. et al. 1980, Nature 285, 463

Herwig F., Blöcker T., Langer N., Driebe T., 1999, A&A, 349, L5

Hinkle, K. H. & Joyce, R. R. 2014, A&A, 785, 146

Houck, J. R., Roellig, T. L., van Cleve, J., et al. 2004, ApJSS, 154, 18

Iben I., Kaler J. B., Truran J. W., Renzini A., 1983, ApJ, 264, 605

Kwok, S., Purton, C. R., & Fitzgerald, P. M. 1978, ApJl, 219, L125

Lawlor, T. M., & MacDonald, J. 1999, AAS, 195, 4406L

Lawlor, T. M., & MacDonald, J. 2003, ApJ, 583, 913

Lawlor, T. M., & MacDonald, J. 2006, MNRAS, 371, 263

Lau H. H. B., De Marco O., Liu X.-W., 2011, MNRAS, 410, 1870

Livio, Mario & Truran, James W. 1994, ApJ, 425, 797L

Meaburn, J., López, J.A., Redman, M.P. 1998, 334, 670

Miller Bertolami M. M., Althaus L. G., Serenelli A. M., Panei J. A., 2006, A&A, 449, 313

Miller Bertolami M. M. & Althaus, L. G. 2006, MNRAS, 380, 763

Miller Bertolami, M. M. 2016, AA, 588, A25

Muthumariappan, C. & Parthasarathy, M. 2020, MNRAS, 493, 730

Nakano, S., Sakurai, Y., Hazen, M., et al. 1996, IAC Circ., 6322

Osterbrock, D. E., Ferland, G. J. (2006). *Astrophysics Of Gas Nebulae and Active Galactic Nuclei*. University science books.

Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., et al. 2010, *Astrophysics Source Code Library*. ascl:1010.083

Ramstedt, S., Vlemmings, W. H. T., Doan, L., et al. 2020, A&A, 640, A133

Reimers, D, 1975, "Problems in Stellar Atmospheres and Envelopes", Springer, Berlin

Schröder, K.-P. & Cuntz, M. 2005, ApJL, 630, L73

Toalá, J. A. & Arthur, S. J. 2011, ApJ, 737, 100

Toalá, J. A. & Arthur, S. J. 2016, MNRAS, 463, 4438

Toalá, J. A., Guerrero, M. A., Todt, H., et al. 2015, ApJ, 799, 67

Toalá, J. A. & Arthur, S. J. 2018, MNRAS, 478, 1218

Toalá, J.A., Ramos-Larios, G., Guerrero, M.A. & Todt, H. 2019, MNRAS, 485, 3360

Toalá, J.A., Jiménez-Hernandez, P., Rodríguez-González, J.B. et al. 2021, MNRAS, 5003, 1543

Toalá, J.A., Lora, V., Montoro-Molina, B., Guerrero, M.A. & Esqueviel, A. 2021, MNRAS, in press, arXiv:2103.11503

Weidmann, W.A., Mari, M.B., Schmidt, E.O. et al. 2020, A&A, 640, A10

Wesson, R., Jones, D., García-Rojas, J., et al. 2018, MNRAS, 480, 4589

Wesson R., Liu X.-W., Barlow M. J., 2003, MNRAS, 340, 253

Wesson R., Barlow M. J., Liu X.-W., Storey P. J., Ercolano B., De Marco O., 2008, MNRAS, 383, 1639

Zijlstra, A. A. 2015, RevMexAA, 51, 221

Zou, Y., Frank, A., Chen, Z., et al. 2020, MNRAS, 497, 2855