

Confrontación observacional de teorías de evolución de estrellas masivas

Nidia I. Morrell

Observatorio Las Campanas

Córdoba, 15 de septiembre de 2014

Virpi Niemelä, 1936-2006



¿Por qué son tan importantes las estrellas masivas?

- ▶ Dominan la evolución química y dinámica de las galaxias.
- ▶ Producen, desde su formación, cambios drásticos en el medio que las rodea.
- ▶ Sintetizan en sus interiores elementos pesados a partir de H y He.
- ▶ Entregan a su entorno enormes cantidades de masa y energía a través de sus vientos estelares y las formidables explosiones de supernova con que terminan sus vidas.
- ▶ Dominan la luz que nos llega de las galaxias lejanas, que no podemos resolver en estrellas.

¿Por qué son tan importantes las estrellas masivas?

- ▶ Dominan la evolución química y dinámica de las galaxias.
- ▶ Producen, desde su formación, cambios drásticos en el medio que las rodea.
- ▶ Sintetizan en sus interiores elementos pesados a partir de H y He.
- ▶ Entregan a su entorno enormes cantidades de masa y energía a través de sus vientos estelares y las formidables explosiones de supernova con que terminan sus vidas.
- ▶ Dominan la luz que nos llega de las galaxias lejanas, que no podemos resolver en estrellas.
- ▶ Se caracterizan por tener masas muy grandes, temperaturas muy altas y altas tasas de pérdida de masa.
- ▶ Son escasas: se forman en menor número y viven vidas cortas comparadas con las de las otras estrellas.

¿Cómo se lleva a cabo una confrontación?

Vamos a ver algunos ejemplos:

Groh et al. 2014, A&A, 564, A30 encuentran para un modelo de $60 M_{\odot}$, sin rotación, de metalicidad solar, la siguiente secuencia evolutiva de tipos espectrales:

O3I (ZAMS) → O4I → BSG → BHG →
→ hot-LBV (fin de la quema de H en el núcleo) →
→ cool-LBV (H en capa; comienza quema de He nuclear) →
→ WNL → WNE → WCE → WO (fin de quema de He nuclear y colapso).

Duración de las fases espectroscópicas (años):

O: 3.22×10^6 → BSG: 0.34×10^5 → BHG: 0.79×10^5 →
→ LBV: 2.35×10^5 → WN: 1.05×10^5 → WC: 2.57×10^5 →
→ WO: 3.80×10^4

Total: 4.08×10^6 años

Algunas pruebas que se pueden hacer:

- ▶ Comparar el número de estrellas WC respecto del número de estrellas WN en ambientes de distinta metalicidad, o el número de estrellas WO respecto de WC y WN.
- ▶ Comparar números relativos de distintas clases de estrellas masivas evolucionadas (WR, RSG, BSG, LBV) en ambientes de distinta metalicidad.
- ▶ Comparar el contenido de WR respecto del contenido de estrellas O en distintas asociaciones estelares.
- ▶ Comparar las masas evolutivas con las masas empíricas para estrellas O mediante estudios de binarias.
- ▶ Identificar y caracterizar progenitores de supernovas en imágenes previas a la explosión.

En todos estos casos la calidad de las muestras observadas es un punto crítico que mejora constantemente con las observaciones modernas y permite comparaciones más útiles.

Estrellas masivas en asociaciones de las Nubes de Magallanes

Nos propusimos comparar los números relativos de WR vs. O en asociaciones de las Nubes de Magallanes.

Los modelos de Ginebra predicen 0.02 para la Nube Menor y 0.05 para la Mayor (distinta metalicidad).

Elegimos dos asociaciones ricas en estrellas masivas:

LH-41 en la Nube Mayor (LMC)

NGC 346 en la Nube Menor (SMC)

Supusimos conocido el contenido de estrellas WR en ambas Nubes: 139 en LMC (134 en Breysacher et al. 1999 (BAT) + 5 descubiertas después; 12 en SMC (8 en Azzopardi & Breysacher 1979 + 4 posteriores descubrimientos) .

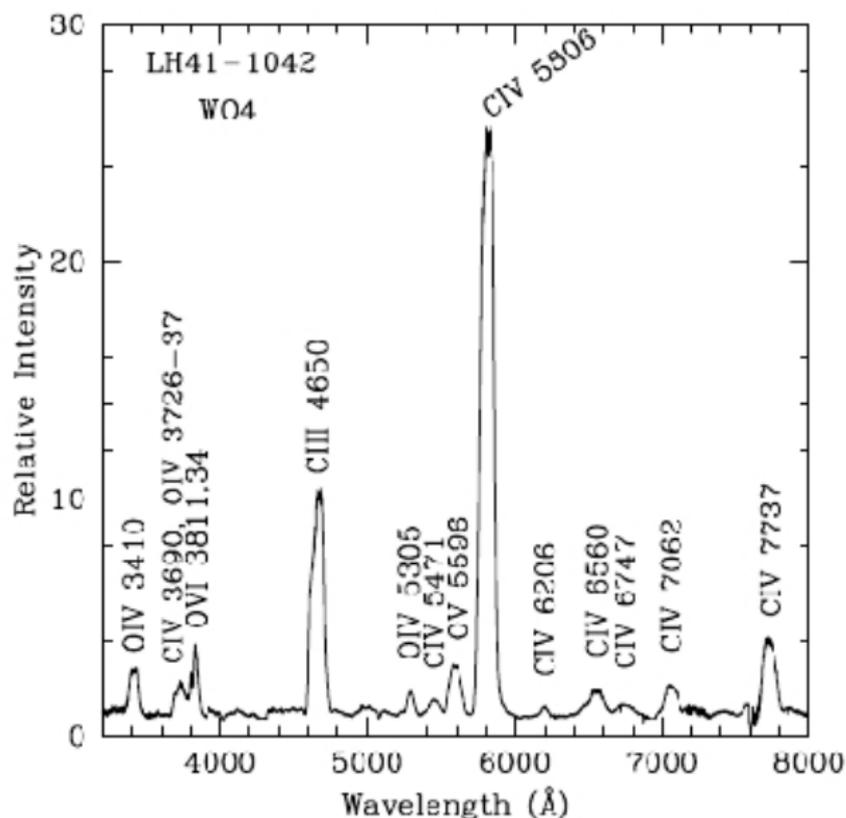
Comenzamos el relevamiento espectroscópico de todas las estrellas que, por su fotometría, podían ser de tipo O (muchas nunca antes observadas) en LH-41 y NGC 346.

Observamos en ambos telescopios Magallanes.



Foto: Yuri Beletsky

LH41-1042: WO4 y segunda WO encontrada en LMC

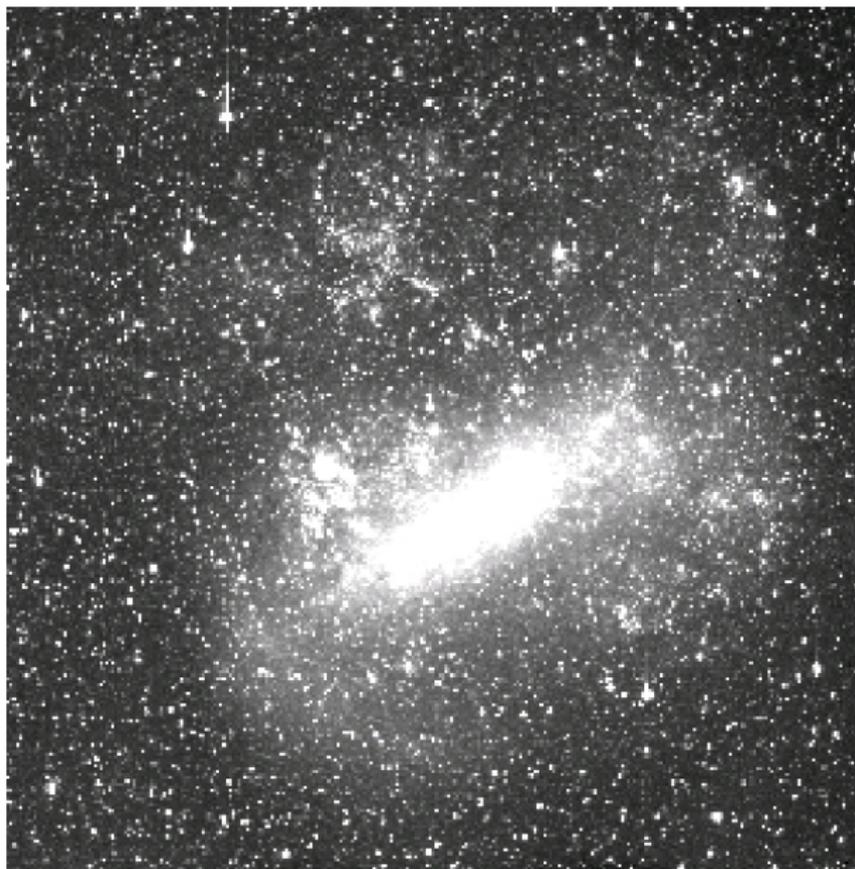


Debíamos antes identificar las WRs faltantes: Swope

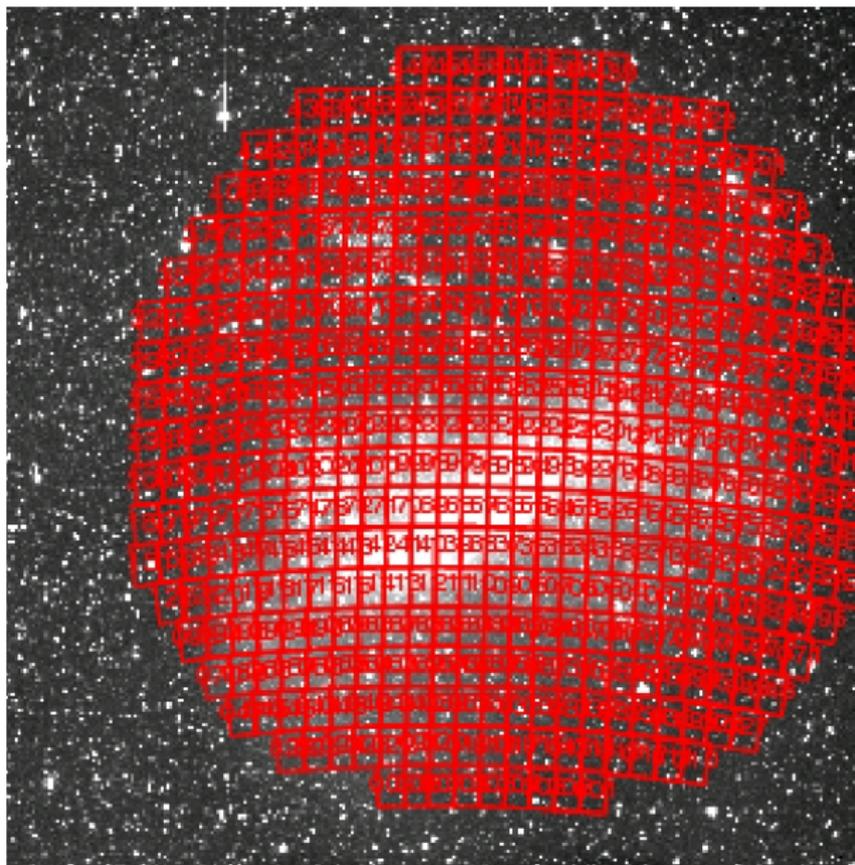


Foto: Yuri Beletsky

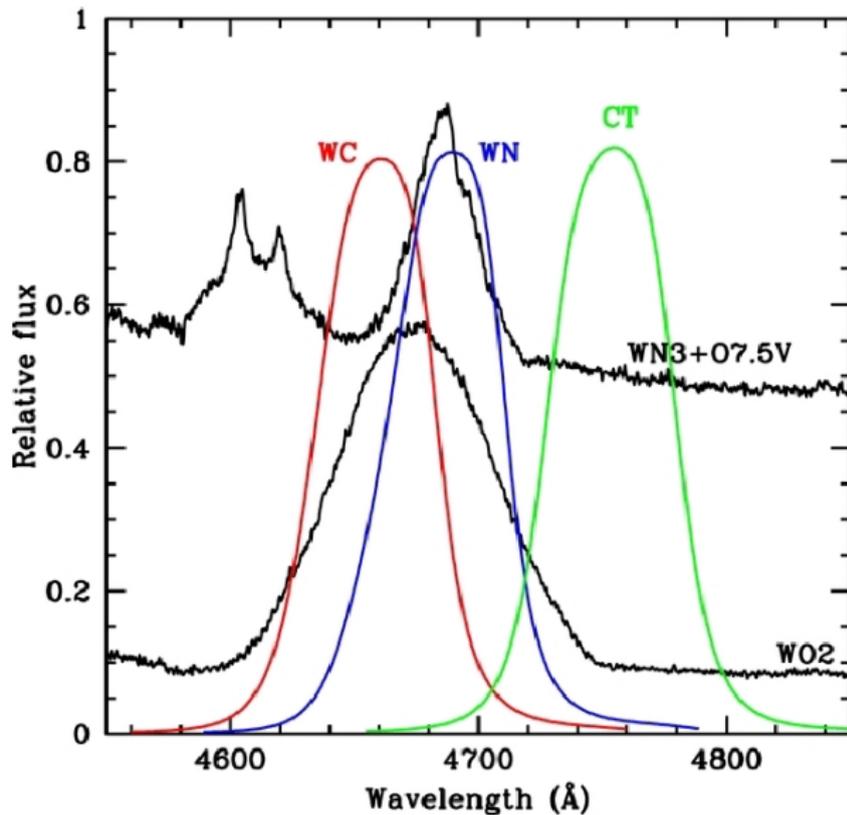
LMC



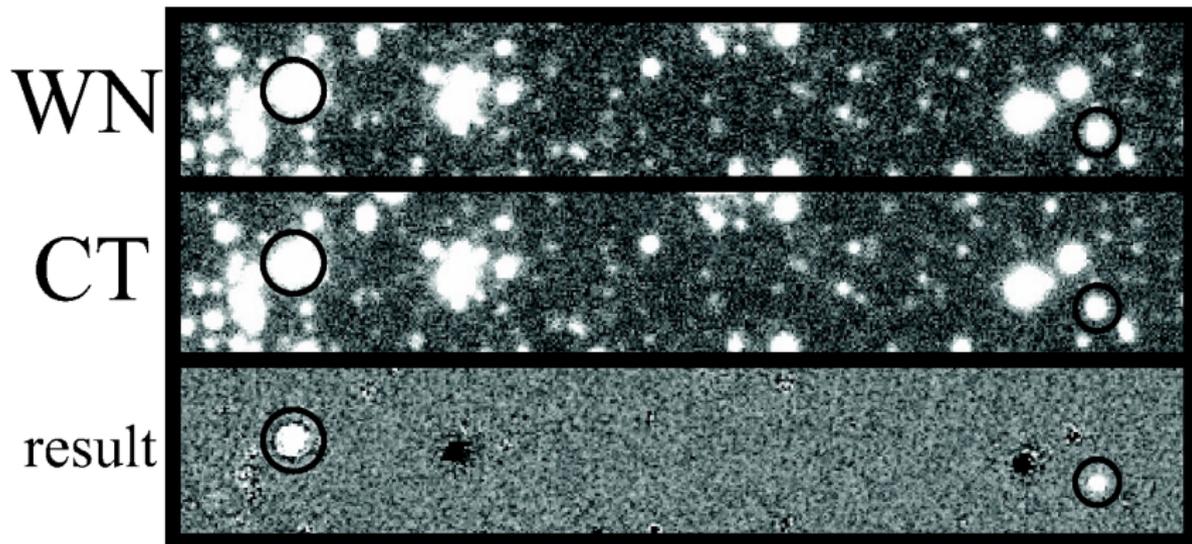
450 campos a observar en LMC (+330 en SMC)



Imágenes a través de filtros interferenciales



Dos WRs en SMC



SMC-WR6 (AzV 332 = Sk 108), $V = 12.3$

SMC-WR12, $V = 15.5$

Respectivamente, la WR más brillante y la más débil que se conocen en SMC.

Primeros resultados de la búsqueda de nuevas WRs en las Nubes de Magallanes

- ▶ Turno de 10 noches en Swope en Septiembre 2013.
- ▶ Observamos aproximadamente el 15% de los campos en ambas Nubes.
- ▶ Pudimos recuperar todas las WRs conocidas en las zonas observadas (119 en LMC y 12 en SMC).
- ▶ Aparecieron también varias Of (algunas nuevas) y Nebulosas Planetarias conocidas, que también tienen He II 4686 en emisión.
- ▶ Encontramos varias candidatas a nuevas WRs con diferentes niveles de significación.

Confirmación espectroscópica con Magallanes

- ▶ Confirmamos 9 nuevas WRs entre las candidatas (incremento de 6%).
- ▶ Encontramos dos nuevas estrellas magnéticas de la clase O8f?p y otras 5 nuevas estrellas Of.
- ▶ Las nuevas WR comprenden:

1 nueva WO (la tercera que se conoce en LMC)

2 binarias WN+O: WN3+O8-9 III y WN3+O7.5 V

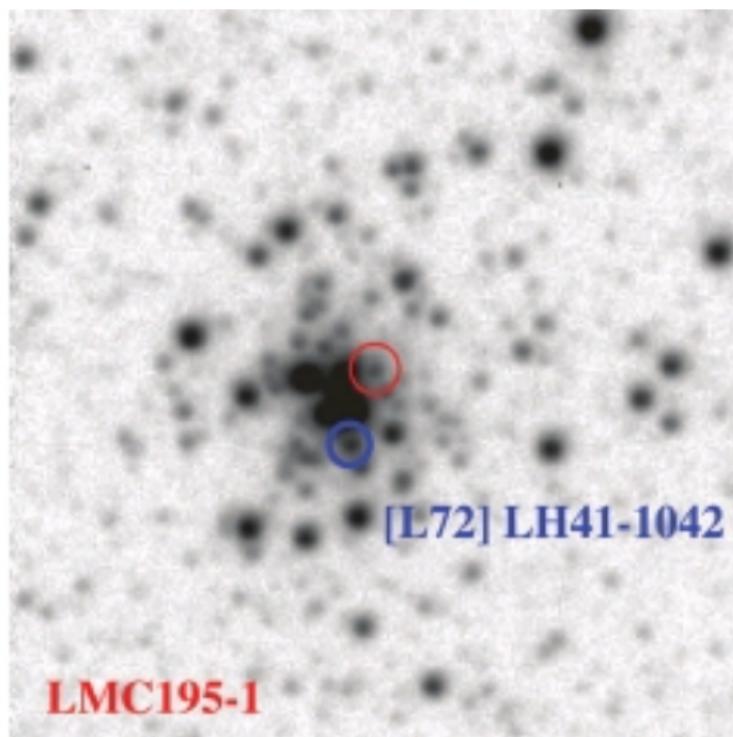
5 (tal vez 6) estrellas WN de una clase que aún no conocíamos y estamos tratando de investigar.

Por ahora las llamamos WN3+O3V.

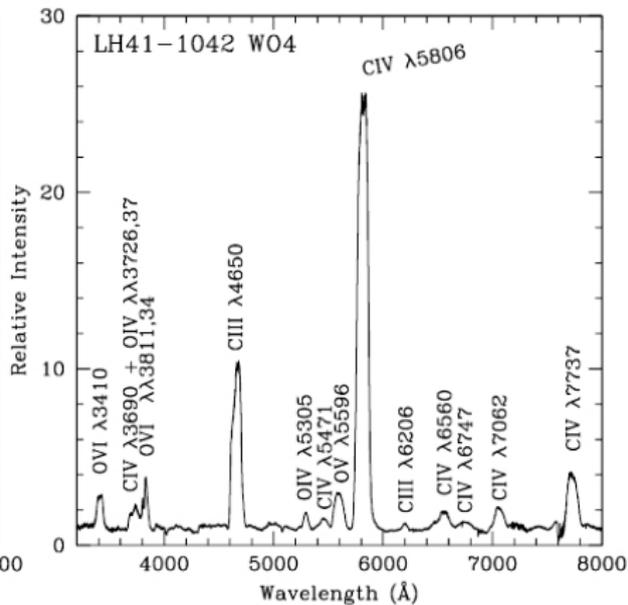
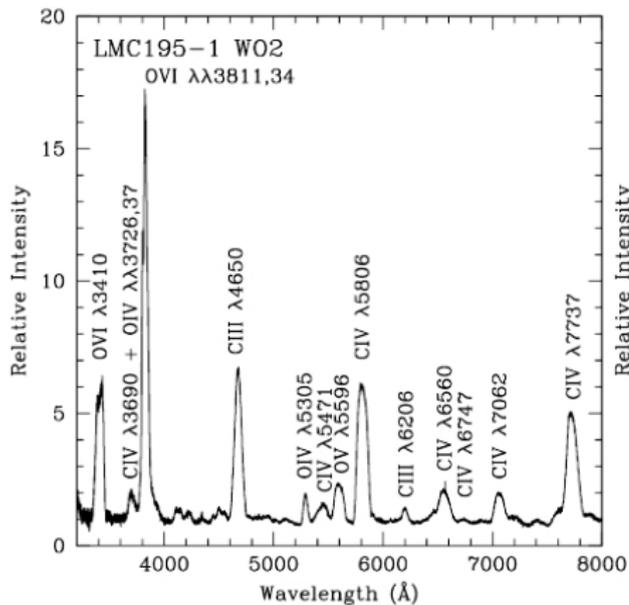
- ▶ Primeros resultados:

Massey, Neugent, Morrell, & Hillier 2014, ApJ, 788, 83.

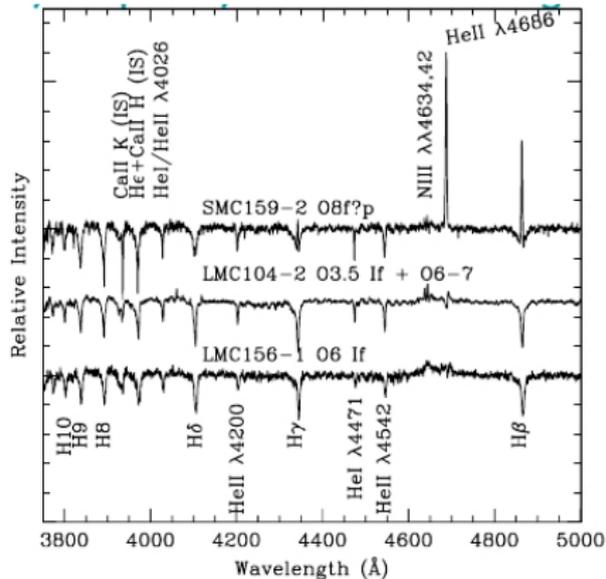
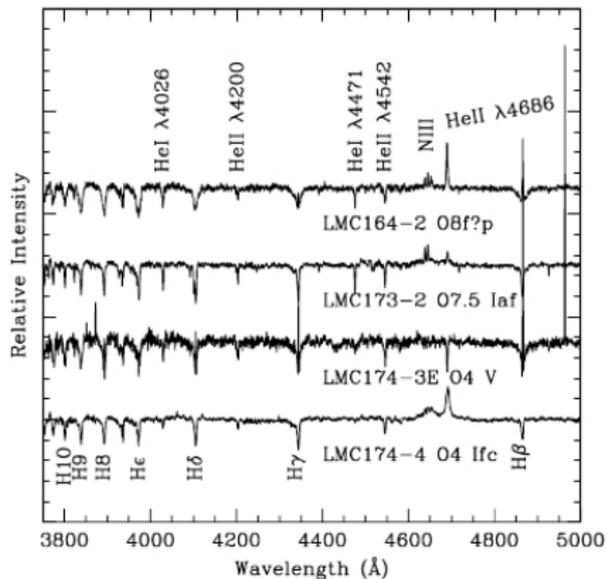
Otra WO en LH-41 a sólo 10" de la anterior



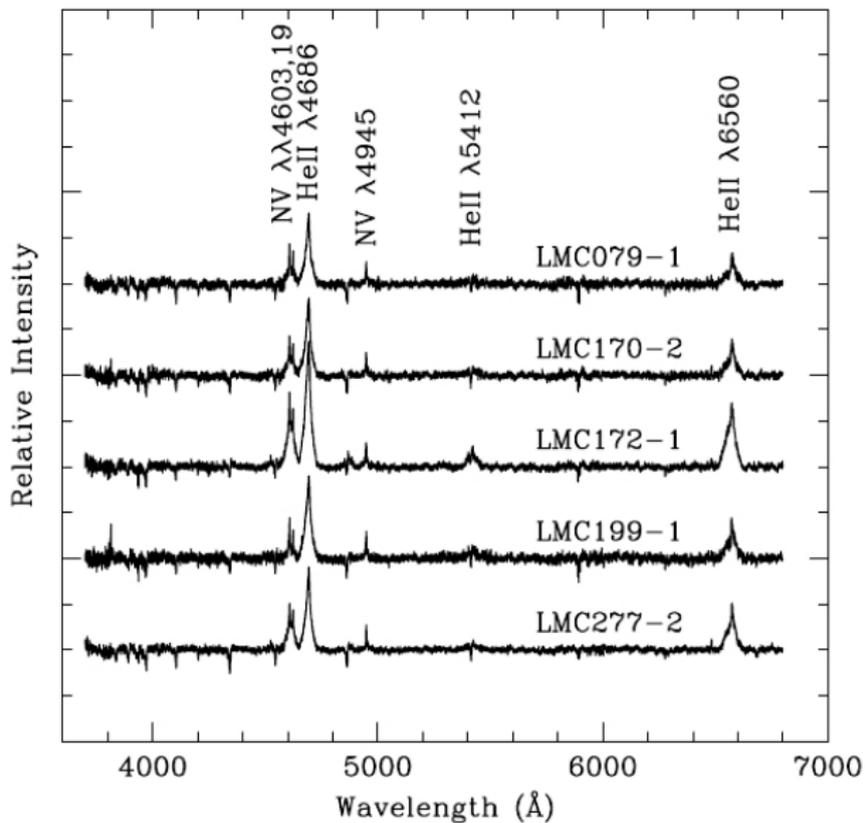
Dos WOs en LH-41



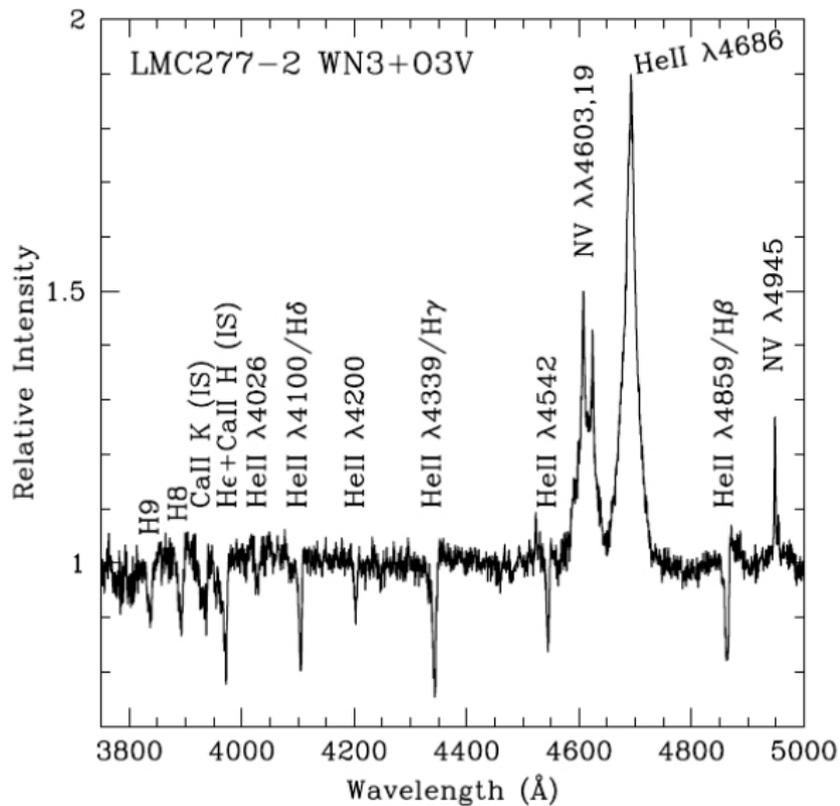
Nuevas estrellas Of, incluyendo 2 O8f?p



WN3+O3 V: ¿Una nueva clase?



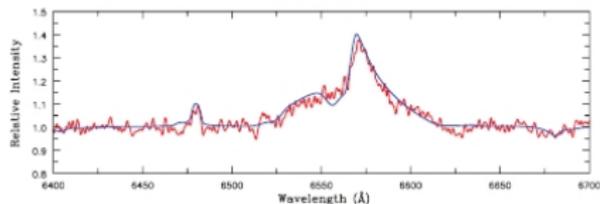
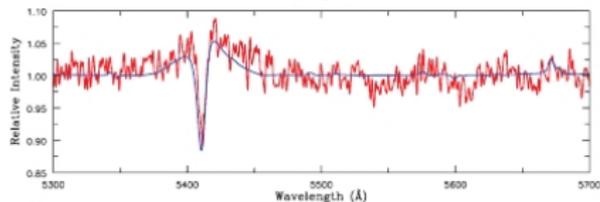
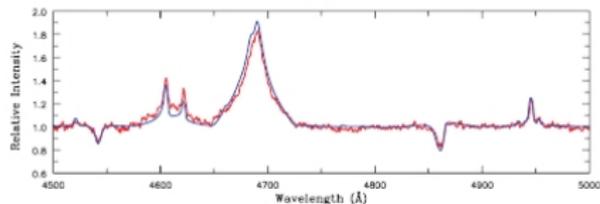
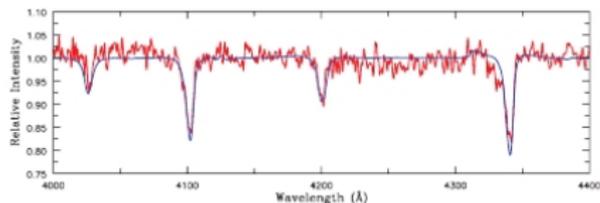
LMC277-2: WN3+O3V



Pensando en la naturaleza de las nuevas WN3+O3V

- ▶ Las estrellas O3V son poco comunes: alrededor de una docena en toda LMC fuera de 30 Dor.
- ▶ Según los modelos evolutivos una O3V vive $\sim 10^6$ años, mientras que se necesitan unos 3×10^6 años para formar una WN3.
- ▶ No apareció variación de velocidad radial en una segunda época espectroscópica.
- ▶ Las M_v de estas estrellas van de -2.3 a -3.1: son débiles. Una O3V sola tendría $M_v \sim -5.5$
- ▶ Pedimos ayuda a John Hillier para verificar si el espectro de emisión y absorción observado podría corresponder a un solo conjunto de parámetros físicos.

Modelo CMFGEN para una de las WN3+O3 V: LMC170-2



Parámetros

$$T_{eff} = 100000K$$

$$L = 4 \times 10^5 L_{\odot}$$

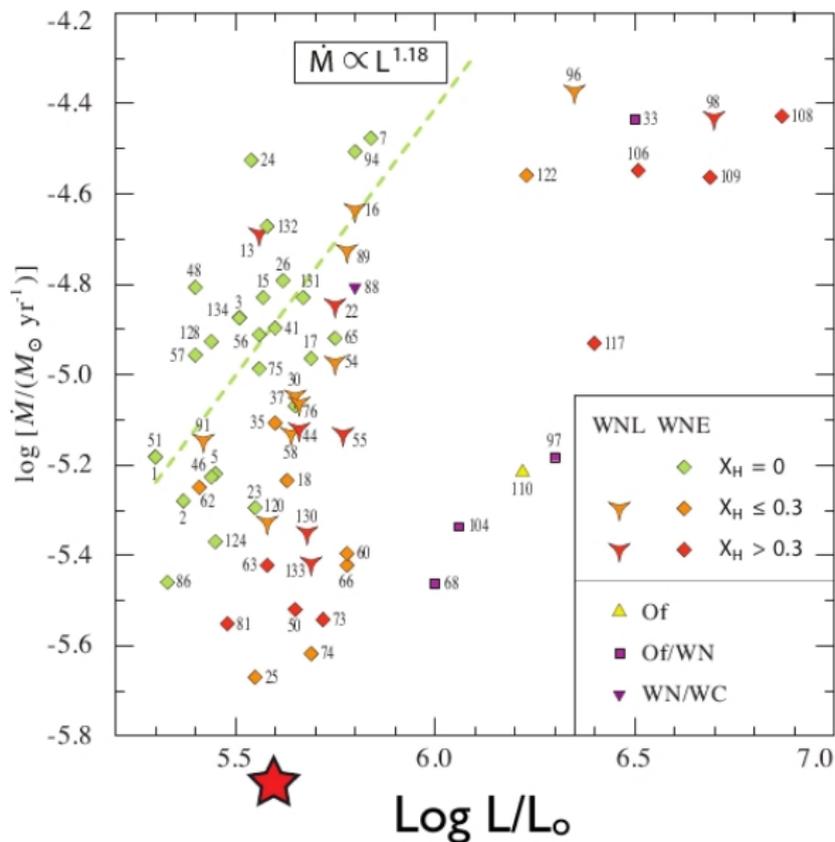
$$\text{He/H (en número)} = 1.0$$

$$N = 10.0 \times \text{solar}$$

$$C, O = 0.05 \times \text{solar}$$

Tasa de pérdida de masa:

$$1.2 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ año}^{-1}$$



Necesitamos más información para entender mejor

- ▶ Los datos de que disponemos no permiten definir bien T_{eff} : He II pero no He I, N V pero no N IV
- ▶ UV con HST: esperamos detectar Fe VI, VII y VIII y también líneas de resonancia del viento: N V $\lambda 1240$ y C IV $\lambda 1550$.
- ▶ Espectros en alta resolución (MIKE/Magallanes) de algunas de las WN3+O3 V para mejorar el modelado de los datos ópticos.
- ▶ Continuación del monitoreo en velocidad radial.

Confrontando masas evolutivas con masas Keplerianas

- ▶ La masa es el parámetro más importante para determinar las características de las estrellas y su evolución.
- ▶ Se pueden estimar masas a partir de modelos evolutivos y a partir de modelos de atmósferas.
- ▶ Es conocida la discrepancia entre masas espectroscópicas y evolutivas, e.g. Herrero et al. 1992 (A&A, 261, 209); Massey et al. 2005 (ApJ, 627, 477).
- ▶ La única manera empírica de determinar masas es a través del estudio de sistemas binarios eclipsantes de líneas dobles.

Binarias masivas en la Nube Mayor de Magallanes

Motivaciones:

- ▶ Determinar masas dinámicas para compararlas con las predicciones de los nuevos modelos evolutivos.
- ▶ Obtener una mejor definición del extremo superior de la relación Masa-Luminosidad.

Comenzamos con una búsqueda de binarias masivas en cúmulos estelares de la Galaxia, y de ambas Nubes de Magallanes.

Resultados parciales en:

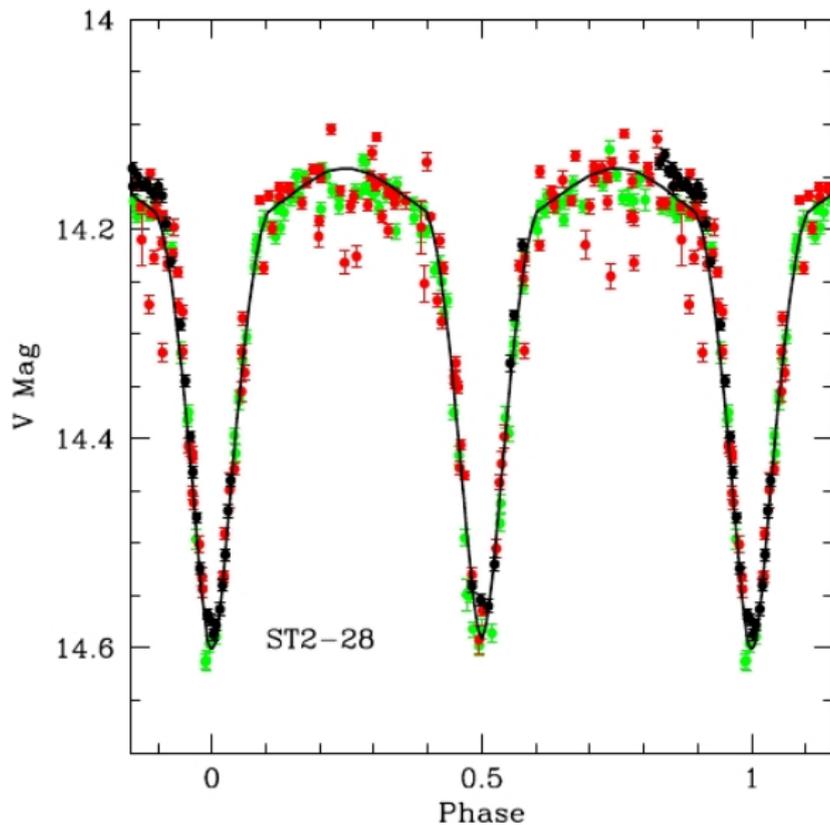
Massey, Morrell, Neugent, Penny, DeGioia-Eastwood, & Gies 2012, ApJ, 748, 96

Morrell, Massey, Neugent, Penny, & Gies 2014, ApJ, 789, 139

Método empleado:

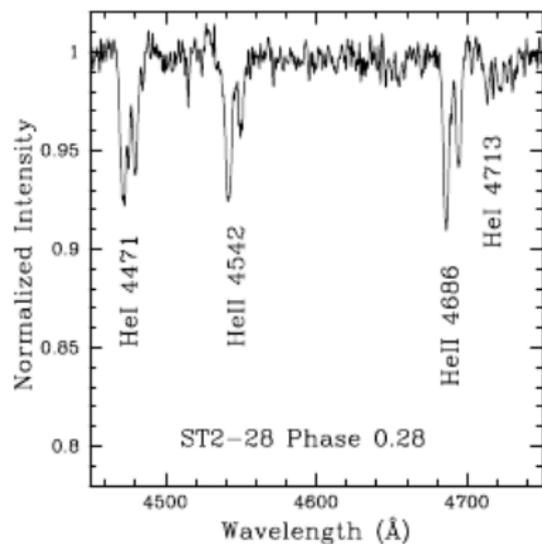
- ▶ Imágenes múltiples en banda V : detección de variables y obtención de curvas de luz.
- ▶ Confirmación de tipos espectrales O.
- ▶ Determinación de velocidades radiales en fases de cuadratura.
- ▶ Solución de curvas de velocidad radial: K_1 , K_2 , γ , $m_1 \sin^3(i)$, $m_2 \sin^3(i)$.
- ▶ Obtención de espectros individuales mediante deconvolución tomográfica.
- ▶ Determinación de T_{eff} y razones de flujo con FASTWIND (Puls et al. 2005).
- ▶ Análisis de curvas de luz (GENSYN, Mochnacki & Doughty 1972): R_1 , R_2 , i .

ST2-28 en LH 90, Curva de luz

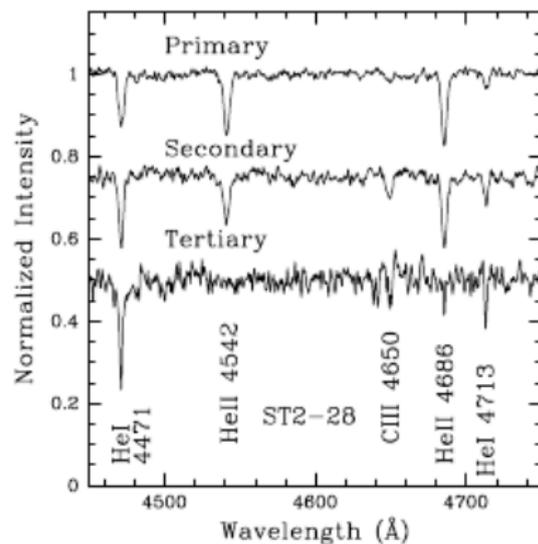


$$P = 2.764656 \pm 0.000010 \text{ d}; i = 85^\circ \pm 2^\circ$$

Espectro de ST2-28: O7V + O8V

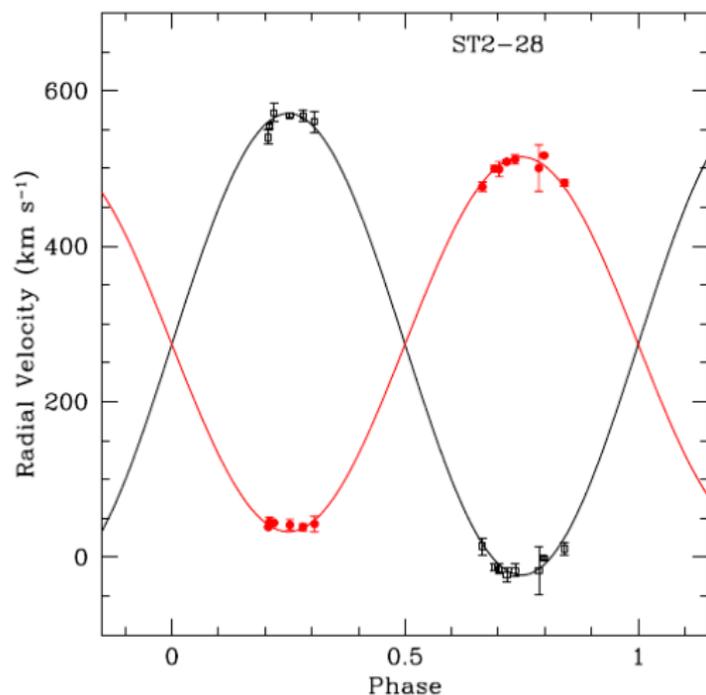


Observado



Reconstrucción tomográfica

Curva de velocidad radial de ST2-28



$$K_1 = 241.0 \pm 1.5 \text{ km s}^{-1}$$

$$K_2 = 297.0 \pm 1.9 \text{ km s}^{-1}$$

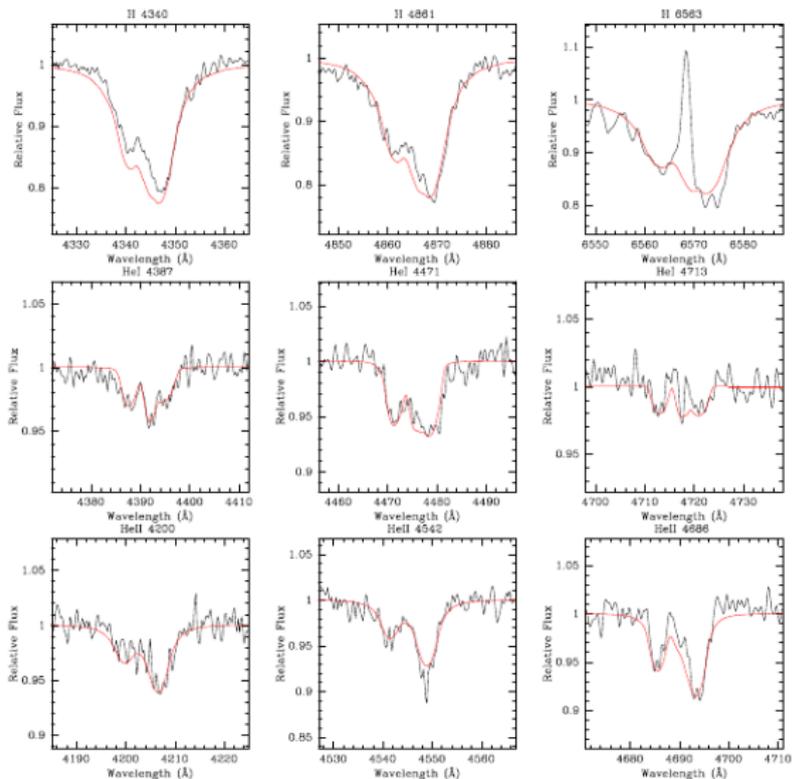
$$\gamma = 273.8 \pm 1.2 \text{ km s}^{-1}$$

Combinando con i :

$$M_1 = 24.9 \pm 0.2 M_{\odot}$$

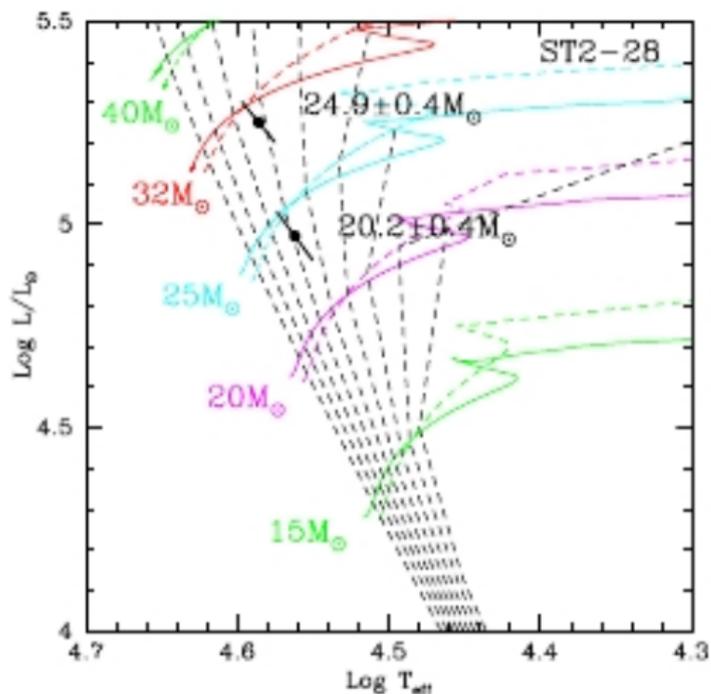
$$M_2 = 20.2 \pm 0.4 M_{\odot}$$

Modelado con FASTWIND del espectro de ST2-28



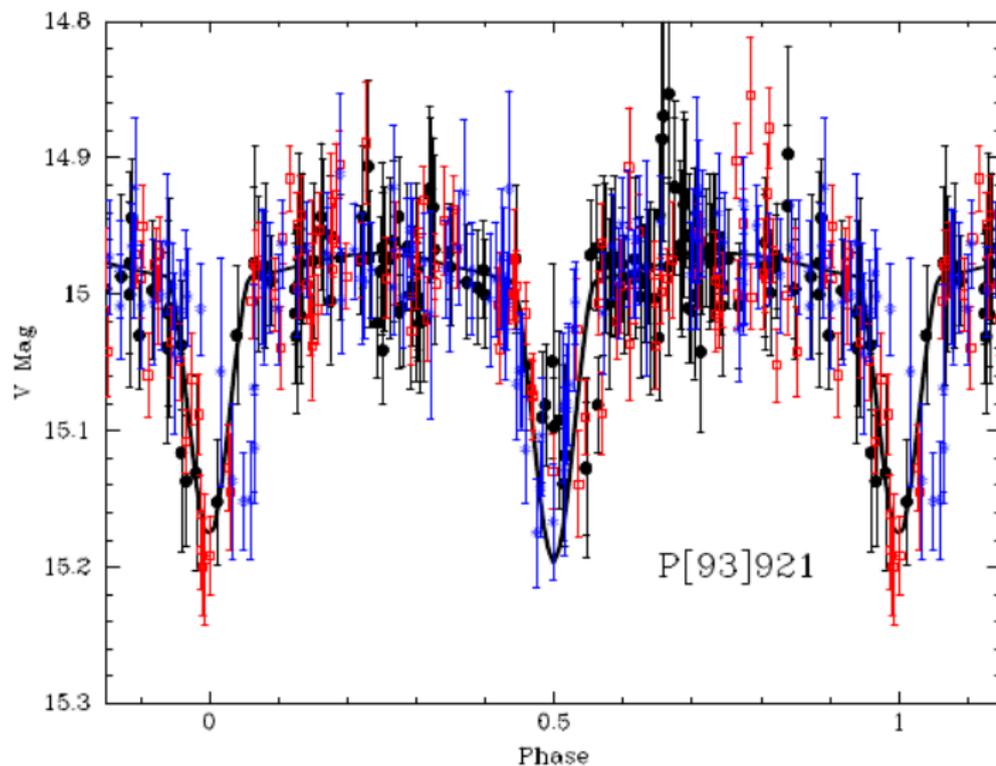
$$T_1 = 37000K, T_2 = 35800K, F_2/F_1 = 0.61 \pm 0.01$$

Las componentes de ST2-28 en el diagrama H-R teórico



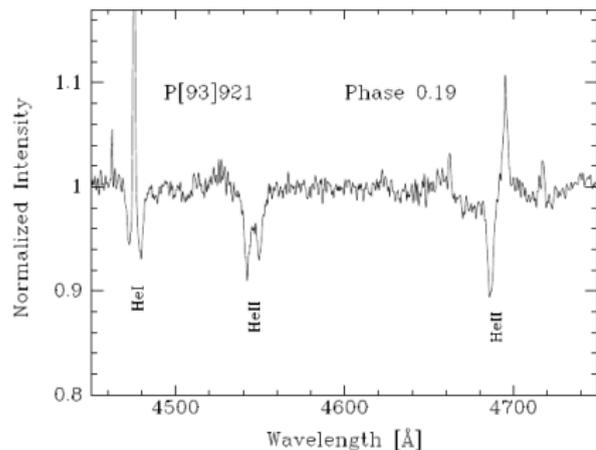
Modelos: Chomiennie & Meynet, 2011, comunicación privada

P921: Curva de luz

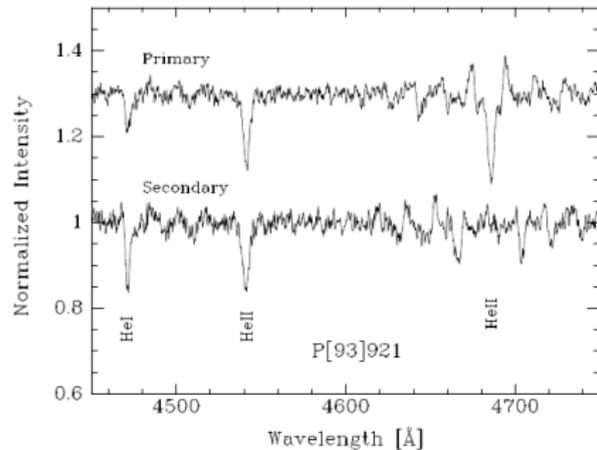


$$P = 2.389321 \pm 0.000002 \text{ d}; i = 76.5^\circ \pm 2^\circ$$

Espectro de P921: O5 Vz + O6.5 V-III

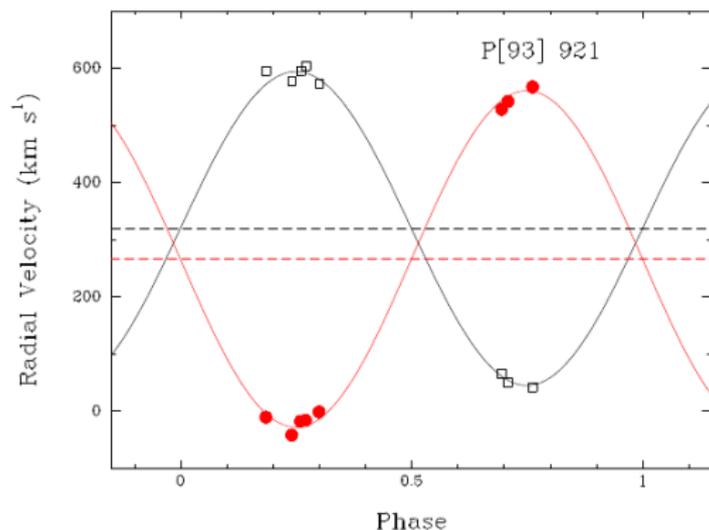


Observado



Reconstrucción tomográfica

Curva de velocidad radial de P921



$$K_1 = 274.5 \pm 2.4 \text{ km s}^{-1}$$

$$K_2 = 294.5 \pm 2.4 \text{ km s}^{-1}$$

$$\gamma_1 = 319.3 \pm 2.3 \text{ km s}^{-1}$$

$$\gamma_2 = 265.8 \pm 2.4 \text{ km s}^{-1}$$

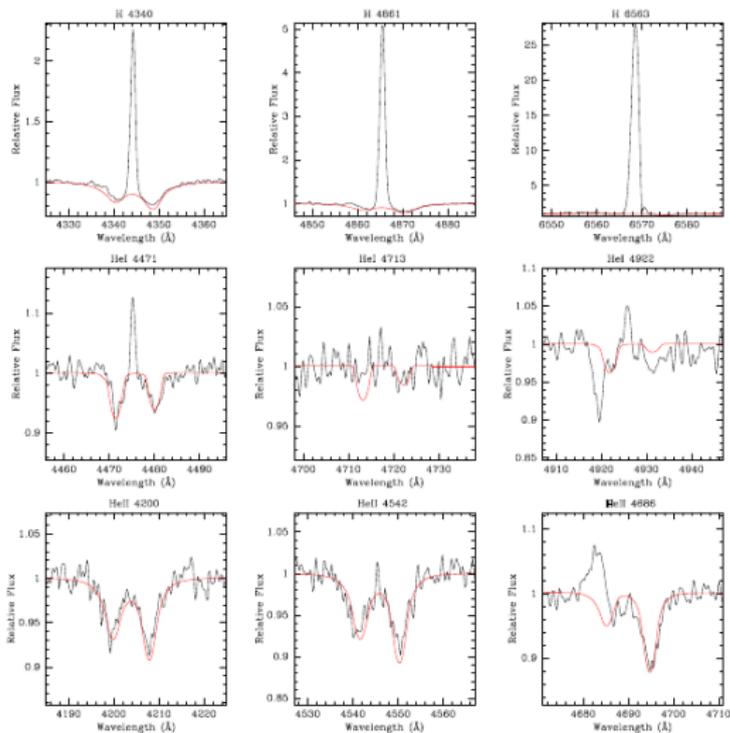
Combinando con i :

$$M_1 = 25.7 \pm 0.6 M_{\odot}$$

$$M_2 = 23.9 \pm 0.6 M_{\odot}$$

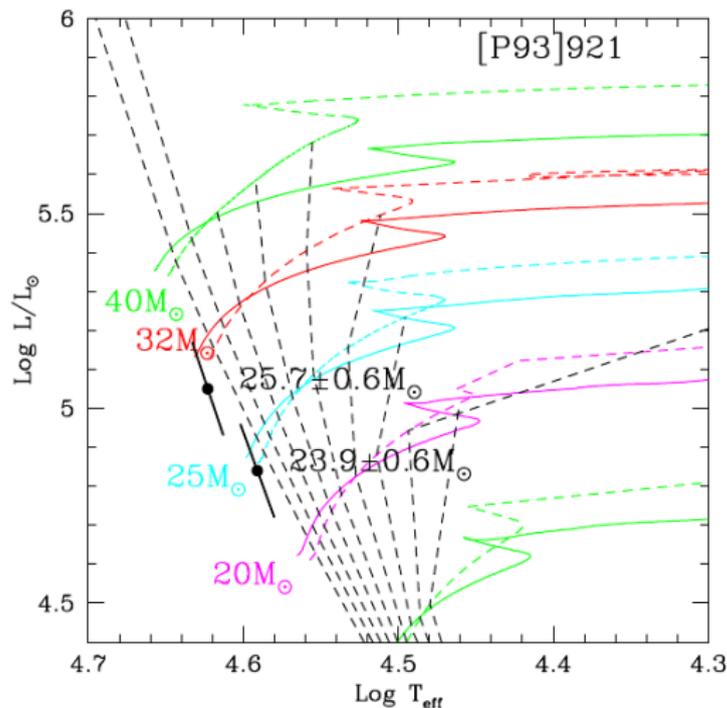
Modelado con FASTWIND del espectro de P921

- 37 -



$$T_1 = 42000K, T_2 = 39000K, F_2/F_1 = 0.77 \pm 0.03$$

Las componentes de P921 en el diagrama H-R teórico

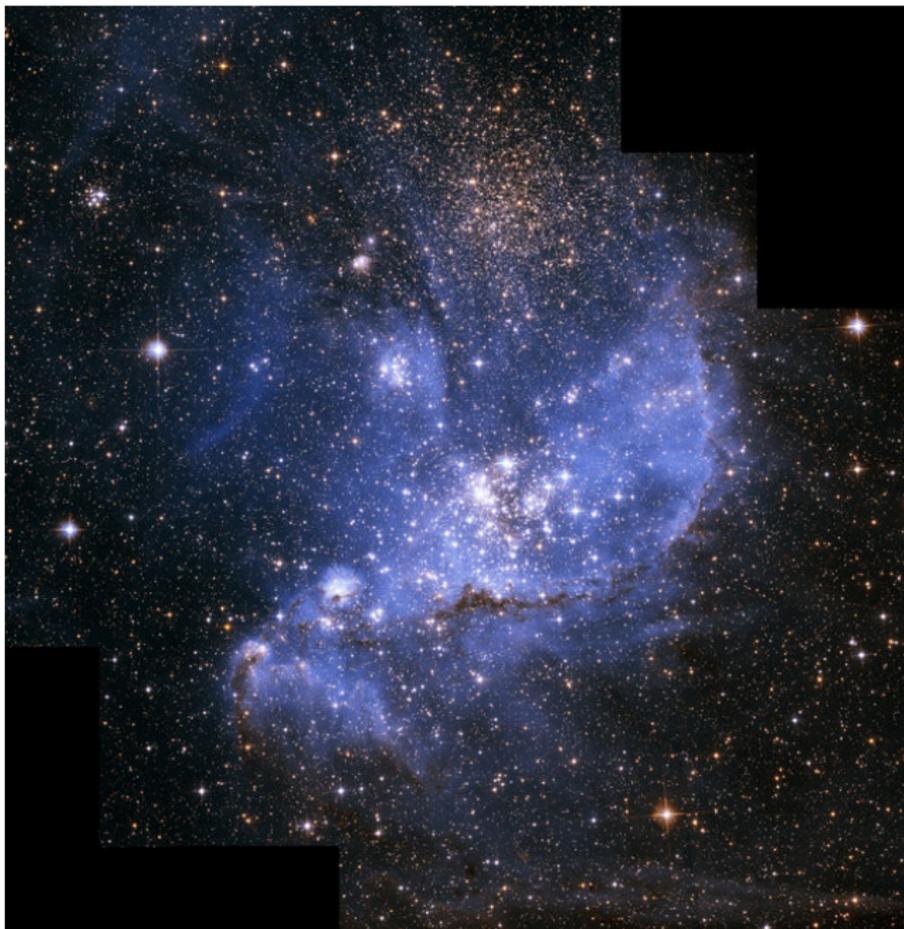


Modelos: Chomienne & Meynet, 2011, comunicación privada

Resultados parciales

- ▶ Hemos completado el análisis de 6 sistemas (hemos obtenido datos para otros 12).
- ▶ Comparamos las masas Keplerianas obtenidas con la última generación de modelos evolutivos (Chomienne & Meynet, 2011).
- ▶ Las masas dinámicas son en promedio 11% inferiores a las evolutivas (discrepancias individuales entre 3% y 16%).
- ▶ Alternativamente, se podría interpretar que las luminosidades observadas son en promedio 0.14 dex superiores a las predichas por los modelos para las masas respectivas.
- ▶ Estas discrepancias están dentro de los errores, pero parecen indicar un efecto sistemático.
- ▶ En comparación con resultados históricos esto indica un muy buen acuerdo entre los modelos actuales y las observaciones.

HD 5980 en NGC 346 (*imagen HST*)



El sistema múltiple HD 5980

- ▶ Sistema eclipsante ($P \sim 19$ d) cuya componente principal (llamada estrella A) es de tipo WN.
- ▶ La estrella A es la LBV de tipo más temprano que se conoce y sufrió una violenta erupción en 1994 cuando desplegó un espectro similar al de η Car.
- ▶ El espectro secundario (estrella B) siempre ha sido difícil de identificar, pero se sabe que también es de tipo WN.
- ▶ Hay un tercer objeto en el espectro (la estrella C), de tipo O7 que también presenta variaciones de velocidad radial de más largo período.

THE HD 5980 MULTIPLE SYSTEM: MASSES AND EVOLUTIONARY STATUS

GLORIA KOENIGSBERGER^{1,2}, NIDIA MORRELL³, D. JOHN HILLIER⁴, ROBERTO GAMEN⁵, FABIAN R. N. SCHNEIDER⁶,
NICOLÁS GONZÁLEZ-JIMÉNEZ⁶, NORBERT LANGER⁶, AND RODOLFO BARBÁ⁷

¹ Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Ave. Universidad S/N, Cuernavaca, Morelos 62210, México

² Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México, Apdo. Postal 70-264, México D.F. 04510, México; gloria@astro.unam.mx

³ Las Campanas Observatory, The Carnegie Observatories, Colina El Pino s/n, Casillas 601, La Serena, Chile; nmorrell@lco.edu

⁴ Department of Physics and Astronomy, and Pittsburgh Particle Physics, Astrophysics and Cosmology Center (PITT PACC), 3941 O'Hara Street, University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA 15260, USA; hillier@pitt.edu

⁵ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, and Instituto de Astrofísica de La Plata (CCT La Plata-CONICET), Paseo del Bosque S/N, B1900FWA La Plata, Argentina; rgamen@fcaglp.unlp.edu.ar

⁶ Argelander-Institut für Astronomie, Auf dem Hügel 71, D-53121 Bonn, Germany; fschneid@astro.uni-bonn.de, ngonzalez@astro.uni-bonn.de, nlangier@astro.uni-bonn.de

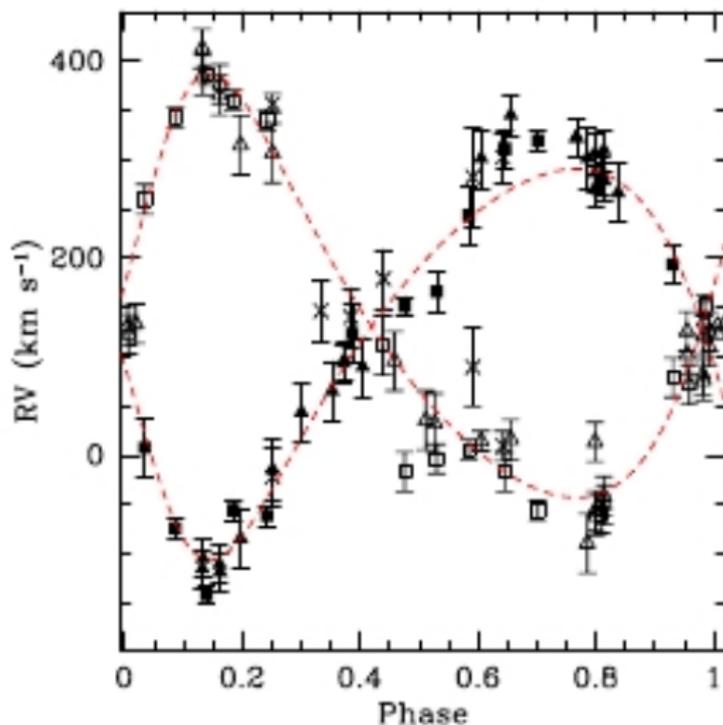
⁷ Departamento de Física, Av. Juan Cisternas 1200 Norte, Universidad de la Serena, La Serena, Chile; rbarba@dfuls.cl

Received 2013 December 4; accepted 2014 June 15; published 2014 September 3

ABSTRACT

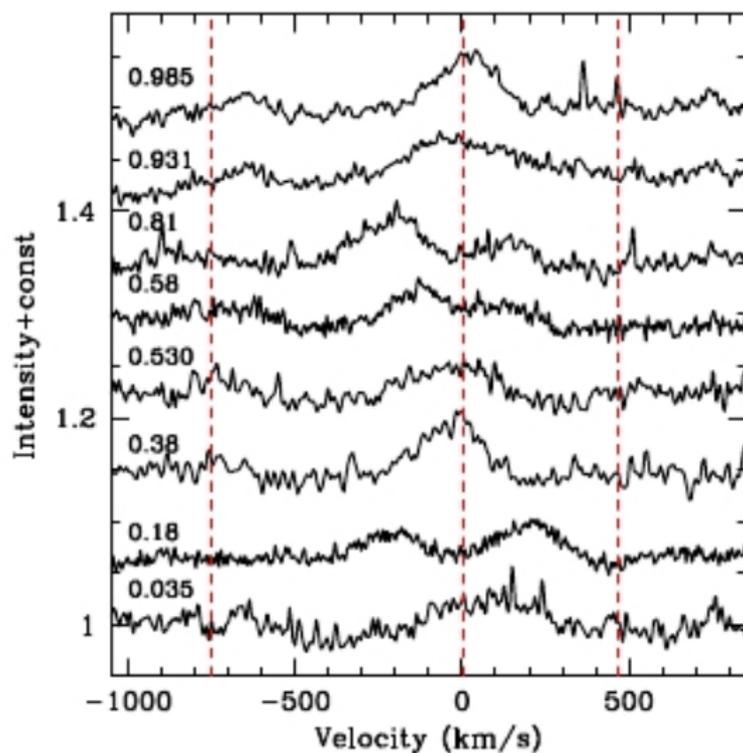
New spectroscopic observations of the LBV/WR multiple system HD 5980 in the Small Magellanic Cloud are used to address the question of the masses and evolutionary status of the two very luminous stars in the 19.3 day eclipsing binary system. Two distinct components of the N v 4944 Å line are detected in emission and their radial velocity variations are used to derive masses of 61 and 66 M_{\odot} , under the assumption that binary interaction effects on this atomic transition are negligible. We propose that this binary system is the product of quasi-chemically homogeneous evolution with little or no mass transfer. Thus, both of these binary stars may be candidates for gamma-ray burst progenitors or even pair instability supernovae. Analysis of the photospheric absorption lines belonging to the third-light object in the system confirm that it consists of an O-type star in a 96.56 day eccentric orbit ($e = 0.82$) around an unseen companion. The 5:1 period ratio and high eccentricities of the two binaries suggest that they may constitute a hierarchical quadruple system.

Velocidades radiales de NV 4944

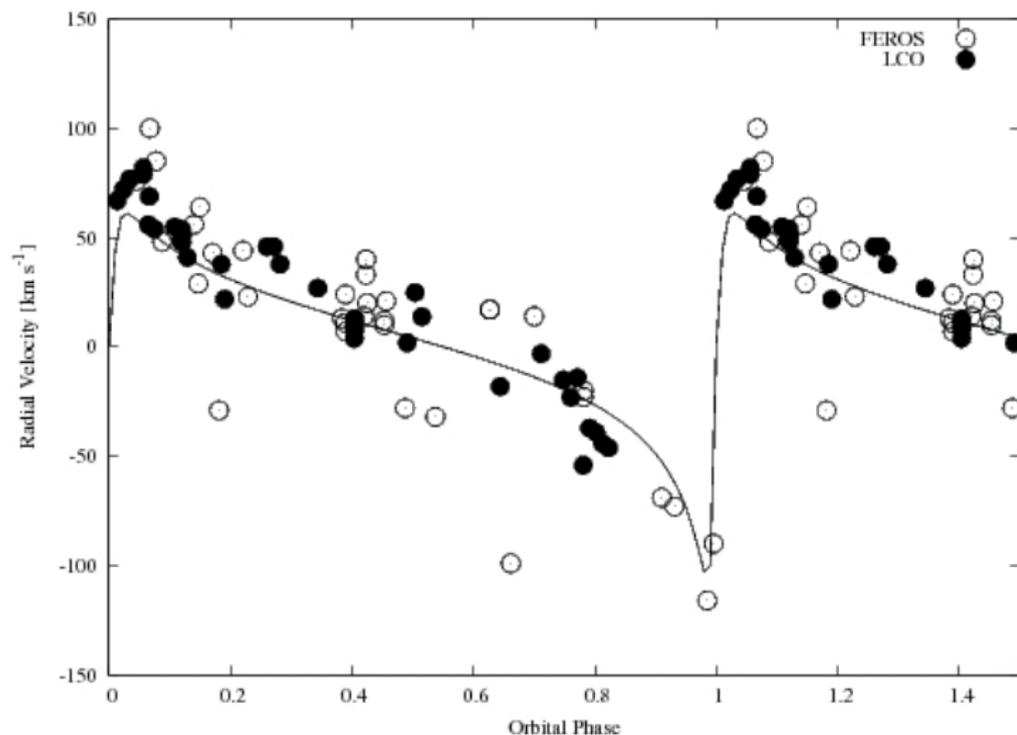


Por primera vez fue posible aislar ambas componentes cubriendo todas las fases orbitales. [Koenigsberger et al. 2014, AJ, 148, 62](#)

Perfiles de NV $\lambda 4944$ en distintas fases



La órbita de velocidad radial de la componente C

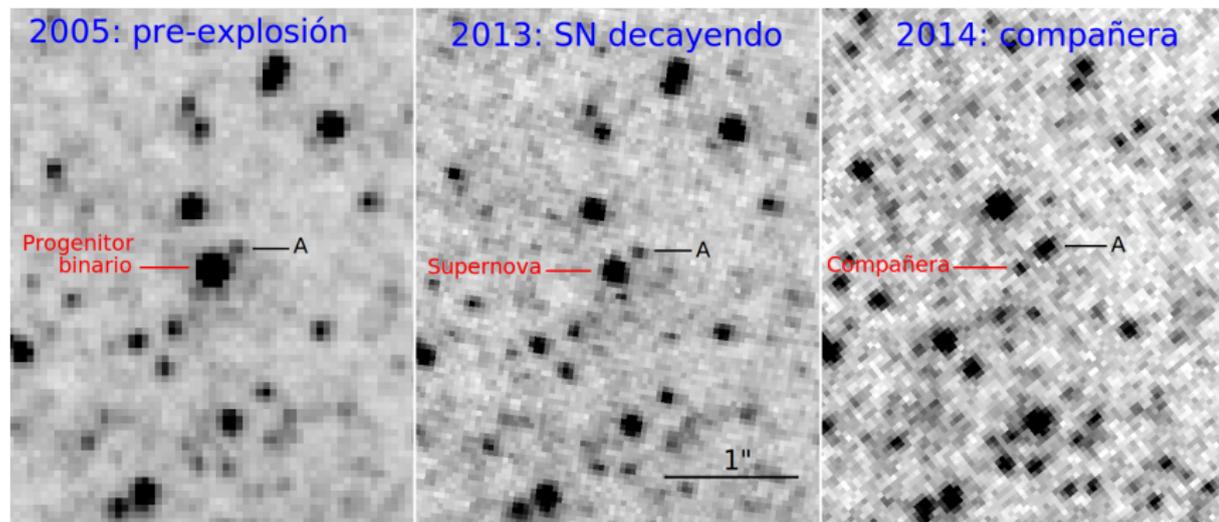


$$P = 96.56 \pm 0.01 \text{ d}; K = 81 \pm 4 \text{ km s}^{-1}; e = 0.815 \pm 0.020$$

Conclusiones sobre HD 5980

- ▶ La primera órbita de VR para el par eclipsante AB derivando masas absolutas de 61 y 66 M_{\odot} , respectivamente.
- ▶ Confirmación de la naturaleza binaria de la componente C.
- ▶ Relación de períodos $C/AB = 5:1 \rightarrow$ posible sistema jerárquico.
- ▶ Las características de A y B son compatibles con modelos de evolución química cuasi-homogénea.
- ▶ Ambas componentes WR son posibles precursoras de GRB o supernovas de inestabilidad de pares.

Un punto azul en la ubicación de SN2011dh



Folatelli, Bersten, Benvenuto, et al. 2014, ApJL, en prensa.

Binarias, Supernovas, objetos Thorne-Żytkow

- ▶ La explosión de SN 2011dh posiblemente deja como resultado un sistema binario compuesto por una estrella B temprana y una estrella de neutrones.
- ▶ La evolución futura de la compañera B puede convertir este sistema en un objeto Thorne-Żytkow (TŻO).
- ▶ Estos objetos fueron predichos en trabajos teóricos de 1975-1977 y son difíciles de distinguir de las supergigantes rojas 'normales'.
- ▶ Tras varias búsquedas infructuosas, se logró identificar a HV 2112 en SMC como el primer candidato a TŻO en base a incremento en las abundancias superficiales de Li, Mo, y Rb: *Levesque et al. (2014, MNRAS, 443, L94)*.
- ▶ Además en HV 2112 se observa incremento de Ca que puede dar cuenta de la reciente formación del TŻO (Tout et al, 2014, MNRAS en prensa).

...nada más material y dialéctico y tangible que la pura imagen que no se ata a la víspera, que busca más allá para entender mejor...

Julio Cortázar,
Prosa del Observatorio



Observatorio Jantar Matar de Jaipur

gastoni

Foto: Gastón Folatelli