

# Soluciones hidrodinámicas para vientos impulsados por radiación en regiones de transición

M.C. Fernandez<sup>1</sup>, R.O.J. Venero<sup>1,2</sup>, L.S. Cidale<sup>1,2</sup>, I. Araya<sup>3</sup> & M. Curé<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Espectroscopía, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET–UNLP, Argentina

<sup>3</sup> Centro Multidisciplinario de Física, Universidad Mayor, Chile

<sup>4</sup> Instituto de Física y Astronomía, Facultad de Ciencias, Universidad de Valparaíso, Chile

Received: 09 February 2024 / Accepted: 17 April 2024

©The Authors 2024

**Resumen** / La teoría estándar para modelar los vientos impulsados por radiación de las estrellas masivas es la teoría m-CAK, que describe la fuerza de radiación por medio de tres parámetros:  $k$ ,  $\alpha$  y  $\delta$ . El parámetro  $\delta$ , que describe los cambios en la ionización del medio, determina dos tipos de soluciones para las ecuaciones hidrodinámicas de vientos con baja o nula rotación. Estas soluciones se llaman “rápidas” y “ $\delta$ -lentas”, las cuales poseen velocidades terminales muy diferentes. Las soluciones rápidas y lentas están separadas entre sí por una región (llamada brecha), en el espacio del parámetro  $\delta$ , en la que, hasta el momento, no se han encontrado soluciones estacionarias. En este trabajo utilizamos el código hidrodinámico dependiente del tiempo ZEUS-3D para resolver la ecuación de movimiento siguiendo la evolución temporal de una solución inicial dada, para encontrar soluciones pertenecientes a la brecha. Estas nuevas soluciones presentan un quiebre o *kink* en la pendiente de la ley de velocidad, ubicado a una distancia fija desde la estrella, la cual depende del valor de  $\delta$ . Además, investigamos si esta discontinuidad podría dar lugar a la presencia de componentes discretas en absorción. Para evaluar esta posibilidad, resolvemos la ecuación de transporte de radiación para medios en movimiento, fuera de equilibrio termodinámico local, y analizamos los perfiles de línea sintéticos para Si IV.

**Abstract** / The theoretical framework for modeling radiation-driven winds in hot stars is the “m-CAK theory”, which describes the radiation force using three parameters:  $\alpha$ ,  $\delta$ , and  $k$ . In particular,  $\delta$  introduces changes in the ionization of the material and can lead to two different types of solutions for the hydrodynamic equations of slowly or non-rotating winds. These solutions, known as the “fast” and “ $\delta$ -slow” solutions, are principally distinguished by their markedly different terminal velocities. Both solutions are separated by a gap in the parameter space of  $\delta$ , where no stationary solutions have been found so far. In this study, we employ the time-dependent hydrodynamic code ZEUS-3D, to solve the equation of motion, tracking the temporal evolution from a specified initial solution to obtain solutions in the gap. These novel solutions exhibit a stationary kink in the velocity profile at a fixed distance from the star, the position of which depends on the value of  $\delta$ . Here, we investigated if this discontinuity can lead to Discrete Absorption Components, solving the transfer equation in the comoving frame along with the non-local thermodynamic equilibrium rate equations to compute ultraviolet synthetic line-profiles for Si IV.

**Keywords** / hydrodynamics — stars: early-type — stars: mass-loss — stars: winds, outflows

## 1. Introducción

El mecanismo que impulsa al viento de las estrellas masivas es la transferencia de momento desde el campo de radiación a las partículas que componen la atmósfera estelar (plasma). Estos son vientos impulsados por radiación, y están descritos mediante la teoría m-CAK (o CAK modificada, Pauldrach et al. 1986; Friend & Abbott 1986). Esta teoría modela la aceleración de las partículas debida a la presión de radiación, para estrellas con rotación. En este caso, la fuerza de radiación debida a líneas espectrales utiliza tres parámetros:  $k$ ,  $\alpha$  y  $\delta$  con distinto significado físico (Abbott, 1982). De acuerdo al valor de algunos de estos parámetros, pueden encontrarse distintas soluciones hidrodinámicas para las ecuaciones que modelan el viento estelar. En particular, para estrellas de baja rotación, distintos valores del parámetro  $\delta$  dan lugar a las soluciones llamadas “rápi-

das” ( $\delta < \delta_{\min} \approx 0.2$ ), las cuales generan vientos con altas velocidades terminales, y las soluciones “ $\delta$ -lentas” ( $\delta > \delta_{\max} \approx 0.24$ ), cuyas velocidades terminales son considerablemente más bajas (Curé et al., 2011). Estas soluciones, están separadas entre sí por una región (llamada brecha) para la que, hasta el momento, no se han encontrado soluciones estacionarias (Venero et al., 2016).

El principal objetivo de este trabajo es buscar soluciones estacionarias en la región de la brecha. Para ello, usamos un código hidrodinámico dependiente del tiempo, que permite encontrar soluciones estacionarias pasando previamente por un estado transitorio. De esta manera, es posible encontrar soluciones correspondientes a la región de la brecha, y se observa que presentan una estructura de quiebre o *kink* en la pendiente de la ley de velocidad. Esta estructura podría ser la causa de una característica observada en algunos perfiles de

líneas ultravioletas (UV) de las estrellas supergigantes B, conocida como Componentes Discretas en Absorción (cuya sigla en inglés es DACs). Las DACs son un tipo de variabilidad espectral que consiste en una componente en absorción superpuesta a un perfil de línea de tipo P Cygni que, con el tiempo, se desplaza hacia el borde azul del perfil (por ejemplo, ver Howarth & Prinza 1989). Suelen observarse en las líneas de resonancia UV de elementos ionizados, como Si IV, N V o C IV.

Para poner a prueba esta hipótesis, en este trabajo se calculan perfiles UV de Si IV utilizando las leyes de velocidad obtenidas. Para este fin, se emplean códigos hidrodinámicos que resuelven la ecuación de movimiento y, por otra parte, un código para la resolución del transporte de radiación. En este último, se incluye el ensanchamiento Stark cuadrático\*, como mecanismo adicional de ensanchamiento sobre el ensanchamiento térmico o Doppler.

Este trabajo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe la teoría m-CAK para estrellas rotantes y sus posibles soluciones. En la Sección 3 se presentan los códigos numéricos utilizados. En la Sección 4 se muestran las soluciones encontradas y los perfiles correspondientes, junto con una discusión de estos resultados. En la Sección 5 se presentan las conclusiones y el trabajo a futuro.

## 2. Teoría m-CAK

En esta sección, se presenta la teoría m-CAK bajo las hipótesis de simetría esférica (es decir, una sola dimensión radial) y estado estacionario. La fuerza de radiación producida por las líneas se modela utilizando el concepto de multiplicador de fuerza introducido por Castor, Abbott & Klein (1975) y Abbott (1982). Siguiendo el planteo desarrollado en Curé & Araya (2023), se utilizan las ecuaciones de continuidad de masa,

$$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho v = \text{constante}, \quad (1)$$

donde  $r$ ,  $\rho$  y  $v$ , son la coordenada radial, la densidad de masa y la velocidad respectivamente, mientras que  $\dot{M}$  es la tasa de pérdida de masa, y la ecuación de conservación de momento,

$$\left(1 - \frac{a^2}{v^2}\right) v \frac{dv}{dr} = \frac{2a^2}{r} + g_{\text{eff}}(r) + g_{\text{rad}}^L(r, v, dv/dr), \quad (2)$$

donde  $a$  es la velocidad del sonido isotérmica. La gravedad efectiva,  $g_{\text{eff}}$ , está dada por:

$$g_{\text{eff}}(r) = -\frac{GM_*(1-\Gamma)}{r^2} \left(1 - \Omega^2 \frac{R_*}{r}\right), \quad (3)$$

donde  $G$  es la constante de gravitación universal,  $M_*$  es la masa de la estrella,  $R_*$  es su radio y  $\Omega$  es el cociente entre la velocidad de rotación y la velocidad rotacional crítica ( $v_{\text{crit}}$ ) en el ecuador de la estrella,  $\Omega = v_{\text{rot}}/v_{\text{crit}}$  ( $0 < \Omega < 1$ ). Además,  $\Gamma$  es el factor de Eddington, que introduce el efecto de la aceleración de la radiación de continuo, la cual es dominada por la dispersión Thomson por electrones libres. Por otro lado, la aceleración debida a las líneas,  $g_{\text{rad}}^L$ , está dada por:

$$g_{\text{rad}}^L(r, v, dv/dr) = \frac{C}{r^2} CF \left(\frac{n_e}{W(r)}\right)^\delta \left(r^2 v \frac{dv}{dr}\right), \quad (4)$$

\*Considerando interacciones entre electrones libres e iones.

donde  $n_e$  es la densidad electrónica,  $W(r)$  es el factor de dilución,  $CF$  es el factor de corrección que considera el tamaño finito del disco estelar (que a su vez depende de  $r$ ,  $v$  y  $dv/dr$ ), y  $C$  está dado por:

$$C = kGM_*\Gamma \left(\frac{4\pi}{\sigma_e \dot{M} v_{th}}\right)^\alpha, \quad (5)$$

donde  $\sigma_e$  es el coeficiente de absorción por dispersión de Thomson, y  $v_{th}$  es la velocidad térmica (velocidad media de los iones que conducen el gas). Por lo tanto, la aceleración de radiación debida a las líneas queda parametrizada mediante  $\alpha$ ,  $k$  y  $\delta$ . El parámetro  $\alpha$  se puede interpretar como la proporción de líneas ópticamente gruesas respecto a las líneas totales, mientras que  $k$  está asociado a la cantidad efectiva de líneas que absorben momento del campo de radiación. Por otro lado, el parámetro  $\delta$  representa el cambio en la ionización a lo largo del viento. La combinación de distintos valores posibles para estos parámetros, especialmente el parámetro  $\delta$ , da lugar a distintos tipos de soluciones, como se verá a continuación.

### 2.1. Familias de soluciones

La resolución de la Ec. 2 permite obtener la ley de velocidad  $v(r)$  que rige el viento estelar. Así, se pueden encontrar tres familias de soluciones:

- Soluciones rápidas (o clásicas): Corresponden a soluciones con baja rotación ( $\Omega \lesssim 0.75$ ) y  $\delta < \delta_{\text{min}}$ , teniendo valores altos de velocidad terminal (Pauldrach et al., 1986; Friend & Abbott, 1986).
- Soluciones  $\Omega$ -lentas: Soluciones con alta rotación ( $\Omega \gtrsim 0.75$ ) y  $\delta < \delta_{\text{min}}$ , que alcanzan bajos valores de velocidad terminal (Curé, 2004; Venero et al., 2016).
- Soluciones  $\delta$ -lentas: Se obtienen para vientos con baja rotación y  $\delta > \delta_{\text{max}}$ , alcanzando velocidades terminales menores que las obtenidas para las soluciones rápidas (Curé et al., 2011).

En este trabajo, estudiaremos soluciones rápidas y  $\delta$ -lentas para estrellas supergigantes B, ya que estos objetos son rotadores lentos. Las soluciones rápidas y  $\delta$ -lentas, están separadas entre sí por una brecha en el espacio del parámetro  $\delta$ . Esta brecha consiste en un intervalo de valores de  $\delta$ , para el que, con anterioridad a este trabajo, no se habían encontrado soluciones estacionarias, generándose una brecha de transición entre soluciones rápidas y lentas (Venero et al., 2016).

## 3. Códigos numéricos

A continuación, se presentan los códigos numéricos empleados para resolver las ecuaciones hidrodinámicas del viento y el transporte de radiación.

### 3.1. Códigos Hydwind y ZEUS-3D

Para obtener las soluciones, se adoptan valores típicos para los parámetros  $\alpha$ ,  $k$  y  $\delta$ , y se resuelven las ecuaciones que determinan la ley de velocidad. Se hace uso de dos códigos: Hydwind (Curé, 2004) y ZEUS-3D (Clarke,

1996, 2010). El primero resuelve las ecuaciones hidrodinámicas en simetría esférica y en estado estacionario, mientras que el segundo considera también la dependencia temporal (se utiliza una adaptación desarrollada por Araya et al., 2018). Mediante el código Hydwind se encuentran soluciones rápidas y  $\delta$ -lentas, junto con la ubicación de la región de la brecha, delimitando los valores de  $\delta$  para los que no se logra la convergencia. Por otra parte, el código ZEUS-3D utiliza una solución inicial dada (en este caso empleamos soluciones encontradas con Hydwind), y calcula su evolución temporal hacia una solución final, según los parámetros  $\alpha$ ,  $k$  y  $\delta$  dados en la entrada. Variando el valor de  $\delta$ , es posible obtener soluciones dentro de la región de la brecha, además de reobtener las rápidas y las  $\delta$ -lentas.

### 3.2. Código MULTAS

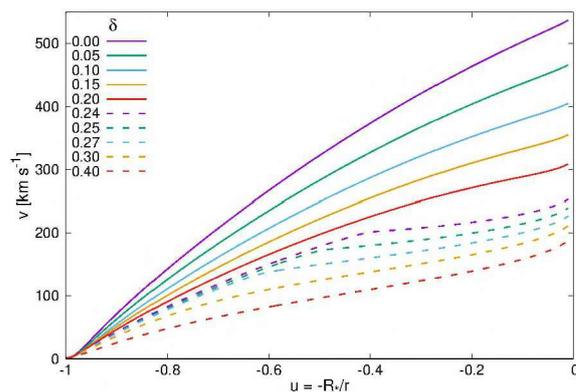
El código MULTAS (*MULTI Line Transfer for Active Stars*, Venero et al., 2000) basado en Mihalas & Kunasz (1978), resuelve el transporte radiativo para una atmósfera en expansión fuera del equilibrio termodinámico local, con simetría esférica en el marco de referencia del fluido (*comoving frame*), para átomos de Si IV de 6 niveles más el continuo. Aquí se incorporan las leyes de velocidad obtenidas previamente con el código ZEUS-3D.

## 4. Resultados

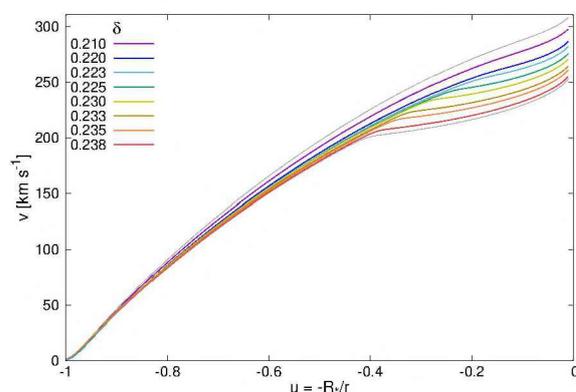
Para modelar una estrella supergigante B, se adoptaron los siguientes parámetros:  $T_{\text{eff}} = 18\,000$  K,  $\log g = 2.5$ ,  $R_* = 23 R_\odot$ ,  $\Omega = 0.27$ ,  $\alpha = 0.515$  y  $k = 0.104$ , mientras que, para  $\delta$ , se utilizaron valores sucesivos para barrer todas las soluciones posibles (rápidas, lentas, y en la brecha). Estos parámetros corresponden a la estrella HD 41117 modelada por Venero et al. (2024), quienes hallaron dos soluciones posibles para ajustar el perfil observado de H $\alpha$  (una rápida y una  $\delta$ -lenta). Aquí adoptamos los valores promedios para  $k$  y  $\alpha$  obtenidos a partir de ambos ajustes en ese trabajo. Utilizando el código Hydwind, se determina que la región de la brecha en este modelo corresponde al intervalo  $0.20 < \delta < 0.24$ .

### 4.1. Leyes de velocidad

En la Fig. 1 se muestran algunas soluciones obtenidas con ZEUS-3D, correspondientes a los regímenes rápido y  $\delta$ -lento, separadas entre sí por la región de transición. En la Fig. 2 se presentan las nuevas soluciones obtenidas mediante ZEUS-3D, para los valores del parámetro  $\delta$  que comprenden la región de la brecha. Luego, en la Fig. 3 se pueden ver todas las soluciones encontradas: rápidas,  $\delta$ -lentas, y en la región de la brecha. Puede observarse que estas soluciones muestran una región interna cuya dependencia en  $u = -R_*/r$  es muy similar y que representa una transición continua entre todas las soluciones. Sin embargo, en el interior de la brecha, aparece un marcado cambio en la pendiente  $dv/du$  que da lugar a un *kink* o quiebre. A medida que se disminuye el valor de  $\delta$ , este *kink* se va desplazando hacia afuera. De este modo,



**Fig. 1.** Leyes de velocidad obtenidas con el código ZEUS-3D en el régimen rápido ( $0.0 \leq \delta \leq 0.2$ ) en líneas continuas, y  $\delta$ -lento ( $0.24 \leq \delta \leq 0.4$ ) en líneas a trazos.

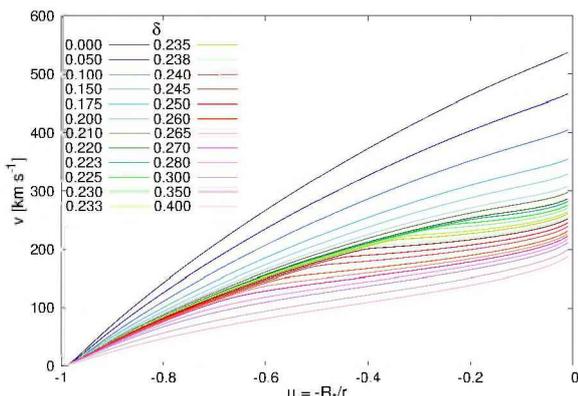


**Fig. 2.** Nuevas leyes de velocidad obtenidas con el código ZEUS-3D en la región de la brecha. Para comparación, se incluyen (en color gris) la última solución rápida ( $\delta = 0.2$ ) y la primera  $\delta$ -lenta ( $\delta = 0.24$ ), a ambos lados de la brecha.

puede verse que el código ZEUS-3D predice un empalme continuo de las soluciones a un lado y a otro de la brecha. Es de destacar que cada una de estas soluciones, aún teniendo un *kink*, son estacionarias. Es decir, al dejar transcurrir el tiempo en ZEUS-3D, luego de la convergencia, se observa que estas soluciones mantienen su forma. Eso implica que los *kinks* en las leyes de velocidad pueden permanecer fijos a determinadas distancias de la estrella o, si las condiciones de ionización cambiaran (modificando el parámetro  $\delta$ ), estos *kinks* podrían desplazarse a lo largo del viento.

### 4.2. Perfiles de Si IV

En la Fig. 4 se muestran perfiles del doblete Si IV  $\lambda\lambda 1394$  y  $1403$  Å en el UV, obtenidos para los regímenes rápido (panel superior), en la brecha (medio) y  $\delta$ -lento (inferior). Se compara el perfil obtenido considerando un ensanchamiento Doppler, y un ensanchamiento Stark cuadrático (que genera un perfil de Voigt). A pesar de presentar un cambio brusco en la pendiente de la ley de velocidad, no resulta evidente que estos *kinks* produzcan una componente discreta. Sin embargo, resulta



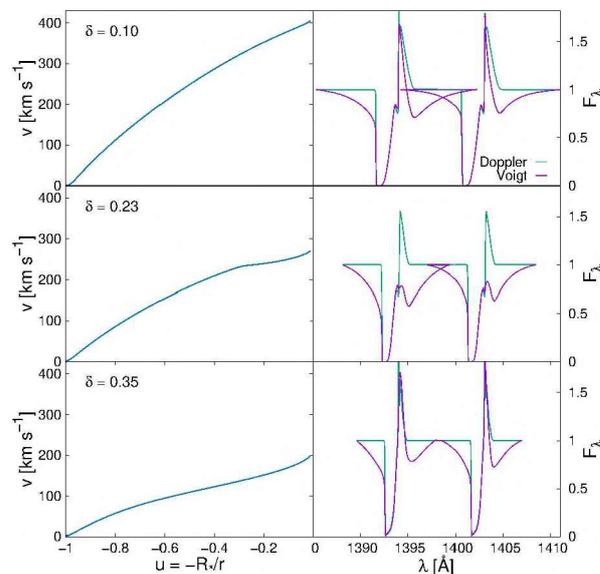
**Fig. 3.** Leyes de velocidad obtenidas con el código ZEUS-3D para los distintos valores de  $\delta$ : régimen rápido  $0.0 \leq \delta \leq 0.2$  (azules), brecha  $0.21 \leq \delta \leq 0.238$  (verdes), régimen  $\delta$ -lento  $0.24 \leq \delta \leq 0.4$  (rojos).

notorio el cambio en las componentes en emisión de los perfiles P Cygni, las cuales prácticamente desaparecen en los perfiles Voigt. Aunque esto parecería descartar a los *kinks* como generadores de las DACs, se puede mencionar que, en algunos regímenes transitorios previos a la obtención de la solución estacionaria, fue posible observar la formación de estas componentes. Para que se produzcan componentes DACs, los *kinks* deberían ser considerablemente más abruptos que los encontrados. Este comportamiento transitorio necesita ser explorado con más detalle.

## 5. Conclusiones

Adoptando la parametrización de la teoría m-CAK para la descripción de los vientos impulsados por radiación en las estrellas masivas de baja o nula rotación, es posible encontrar soluciones hidrodinámicas rápidas y  $\delta$ -lentas. En este trabajo se exploró la región de transición entre dichas soluciones, haciendo uso de un código hidrodinámico dependiente del tiempo. Así se encontraron nuevas soluciones en dicha región, las cuales son estacionarias y presentan un quiebre o *kink* en la ley de velocidad. Para las soluciones encontradas, se calcularon perfiles de línea de Si IV en el UV, adoptando un ensanchamiento Stark cuadrático, mediante el código de resolución de transporte radiativo MULTAS. Analizando los perfiles de línea resultantes, los quiebres obtenidos en las soluciones hidrodinámicas no son suficientes para generar las DACs observadas en los espectros de las estrellas supergigantes B. Es importante mencionar que este es un primer intento de modelar el viento en las condiciones de la brecha, y de obtener observables (perfiles de línea) bajo este régimen mixto de viento. Resulta necesario extender este modelado a diferentes tipos de estrellas supergigantes para obtener conclusiones más generales. Este análisis, junto con la obtención de perfiles de línea de otros elementos, permitirán una comparación más amplia con las observaciones, estable-

ciendo rangos de aplicabilidad de estas nuevas soluciones hidrodinámicas en el viento de las supergigantes B.



**Fig. 4.** Perfiles de línea y leyes de velocidad obtenidos para cada régimen del viento. *Panel superior izq.:* solución rápida. *Panel medio izq.:* solución que corresponde a la brecha. *Panel inferior izq.:* solución  $\delta$ -lenta. Los perfiles de línea se muestran en los paneles de la derecha.

*Agradecimientos:* MCF agradece el soporte de la Beca de Entrenamiento de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. ROJV y LSC agradecen el apoyo financiero del Proyecto PIP 1337 (CONICET) y del Programa de Incentivos 11/G160 (UNLP). MC agradece el apoyo financiero brindado por el Centro de Astrofísica de Valparaíso. IA y MC agradecen al FONDECYT proyecto 1230131. Este proyecto recibió financiamiento de la Unión Europea en el marco del programa POEMS “Programme for Research and Innovation Horizon 2020 (2014-2020) under the Marie Skłodowska-Curie Grant Agreement No. 823734”.

## Referencias

- Abbott D.C., 1982, *ApJ*, 259, 282  
 Araya I., et al., 2018, *MNRAS*, 477, 755  
 Castor J.I., Abbott D.C., Klein R.I., 1975, *ApJ*, 195, 157  
 Clarke D.A., 1996, *ApJ*, 457, 291  
 Clarke D.A., 2010, *ApJS*, 187, 119  
 Curé M., 2004, *ApJ*, 614, 929  
 Curé M., Araya I., 2023, *Galaxies*, 11, 68  
 Curé M., Cidale L., Granada A., 2011, *ApJ*, 737, 18  
 Friend D.B., Abbott D.C., 1986, *ApJ*, 311, 701  
 Howarth I.D., Prinja R.K., 1989, *ApJS*, 69, 527  
 Mihalas D., Kunasz P.B., 1978, *ApJ*, 219, 635  
 Pauldrach A., Puls J., Kudritzki R.P., 1986, *A&A*, 164, 86  
 Venero R., Cidale L., Ringuet A., 2000, *M.A. Smith, H.F. Henrichs, J. Fabregat (Eds.), IAU Colloq. 175: The Be Phenomenon in Early-Type Stars, Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 214, 607  
 Venero R.O.J., et al., 2016, *ApJ*, 822, 28  
 Venero R.O.J., et al., 2024, *MNRAS*, 527, 93