

# Seminario de posgrado

## Vientos Estelares y Transporte de Radiación en Medios en Movimiento

**Carrera:** Doctorado en Astronomía

**Carga Horaria Semanal:** 5 hs.

**Carga Horaria Total:** 80 horas

**Carácter:** semestral (Primer semestre)

**Modalidad:** teórico-práctico

**Profesores a Cargo:** Lydia Cidale

Roberto Venero

**Contacto:** [lydia@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:lydia@fcaglp.unlp.edu.ar)

[roberto@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:roberto@fcaglp.unlp.edu.ar)

### Descripción y Objetivos:

El curso de posgrado brinda conocimientos avanzando sobre la teoría de vientos estelares y el modelado del espectro emergente en medios en expansión. Se analizan los efectos que producen las fuerzas de presión, radiación y fuerzas magnéticas en las soluciones hidrodinámicas. Se estudian también los efectos de la rotación y la ionización. Se introducen los vientos no isotérmicos y politrópicos, la interacción del viento con el medio interestelar y las regiones de colisión de vientos. Se describen los diferentes códigos para analizar el espectro emergente. Se confrontan las diferentes teorías con las observaciones y se discuten las discrepancias.

El objetivo de la materia es que el estudiante conozca los conceptos, ecuaciones y aproximaciones, pueda determinar los parámetros del viento y analizar la interacción del viento con el medio circundante, sus efectos en la evolución estelar y el universo. Al mismo tiempo, se prepara al alumno para la investigación en hidrodinámica y el transporte de radiación.

Las clases se imparten dos veces por semana durante un cuatrimestre, El curso tiene evaluación final. La carga horaria total es de 80 horas.

### Programa

#### 1. Vientos estelares.

Evidencias observacionales. Perfiles P Cygni. Líneas de emisión. Componentes discretas en absorción. Excesos infrarrojos y de radio. Emisión de polvo. Ecuaciones básicas de modelado de vientos estelares: ecuación de continuidad de masa y de momento. Ecuación de energía. Tasas de pérdida de masa y velocidades terminales. Salto de biestabilidad en temperatura.

#### 2. Vientos isotérmicos y no isotérmicos en geometría esférica.

Vientos isotérmicos impulsados por gradientes de presión. Tratamiento de fuerzas adicionales en la ecuación de movimiento. Vientos no isotérmicos. Mecanismos de disipación de energía. Análisis de puntos críticos. Vientos politrópicos. Vientos coronales. Vientos impulsados por ondas de sonido. Vientos

impulsados por polvo. Métodos de determinación de tasas de pérdida de masa. Métodos de determinación de velocidades terminales.

### **3. Transporte de radiación para continuos y líneas en medios en movimiento en el marco euleriano.**

Introducción a la teoría de transporte de radiación. Marco de referencia euleriano para geometrías plano-paralela y esféricas. Condiciones de contorno. Regímenes de alta y baja velocidad. Aproximación de Sobolev. Probabilidad de escape. Método SEI. Método de Monte Carlo. Método integral implícito. Integral de scattering. Redistribución completa y parcial.

### **4. Transporte de radiación para continuos y líneas en el marco de referencia lagrangiano.**

Tratamiento del transporte en el comoving-frame en coordenadas esféricas. Condiciones de contorno y condiciones iniciales. Soluciones consistentes para átomos de muchos niveles de energía. Función fuente. Transformación al marco de referencia del observador. Cálculo de perfiles de líneas y distribución de energía continua.

### **5. Vientos impulsados por radiación.**

Mecanismo de impulsión. Transferencia de momento del campo de radiación de continuo y de líneas. Teoría CAK y CAK modificada. Modelado de la fuerza de radiación. El invariante de profundidad óptica  $Q$ . Relación entre la pérdida de masa y la metalicidad. Relación momento del viento - luminosidad. Relación gravedad pesada en flujo - luminosidad. Distancias espectroscópicas.

### **6. Modelos de vientos impulsados por radiación.**

Cálculo de perfiles de líneas y distribución de energía en el continuo. Aproximación núcleo-halo. Modelos unificados. *Line blanketing* y calibración de temperaturas efectivas. Códigos de modelos de atmósferas estáticas y de vientos: TLUSTY, CMFGEN, WM-basic, FASTWIND, PoWR, PHOENIX, Zeus y otros. Resultados y confrontación con las observaciones. Problemas de la teoría de vientos impulsados por radiación: A) Inestabilidades. Mecanismo de biestabilidad. Discrepancia de masas. Problemas de la teoría de vientos impulsados por radiación; B) Micro y macro-turbulencia. Vientos débiles. Micro y macroclumping.

### **7. Vientos impulsados por radiación en rotación.**

Vientos estelares con rotación. Soluciones de las ecuaciones hidrodinámicas: solución rápida y  $\Omega$ -lenta. Cambios en la ionización del viento: solución  $\delta$ -lenta. Dominios de las soluciones.

### **8. Modelos de vientos no esféricos.**

Influencia de la rotación y de los campos magnéticos. Ecuaciones hidrodinámicas y análisis de las soluciones. Coexistencia de soluciones. Modelo de disco comprimido por el viento. Formación de discos estelares. Corrientes meridionales. Teorema de von Zeipel. Modelos de vientos de dos componentes. Modelo de regiones de interacción corrotantes (CIR). Modelos de atmósferas en más dimensiones. Modelos de estrellas Be y B[e]. Códigos Bedisk y HDUST.

### **9. Efectos y consecuencias de los vientos estelares.**

Variabilidad en el viento. Pulsaciones. Ondas de choque. Interacción con el medio interestelar. Colisión de vientos en estrellas binarias. Efectos de la pérdida de masa en la evolución estelar.

## **Bibliografía**

Abbott, D. C. 1982, ApJ, 259, 282-301

Aerts et al, 2009, "Collective pulsational velocity broadening due to gravity modes as a physical

explanation for macroturbulence in hot massive stars”, *A&A*, 508, 409-419

Araya, Curé & Cidale, 2014, “Analytical solutions for radiation-driven winds in massive stars. I. The fast regime”, *ApJ*, 795:81

Benaglia et al, 2007, “Testing the predicted mass-loss bi-stability jump at radio wavelengths”, *A&A*, 467, 1265-1274

Bjorkman & Cassinelli, 1993, “Equatorial disk formation around rotating stars due to ram pressure confinement by the stellar wind”, *ApJ*, 409, 429

Carciofi & Bjorkman, 2006, “Non-LTE Monte Carlo radiative transfer. I. The thermal properties of keplerian disks around classical Be stars”, *ApJ*, 639: 1081-1094

Castor, 1970, “Spectral line formation in Wolf-Rayet envelopes”, *MNRAS*, 149,111-127 (método de probabilidad de escape)

Castor, “Radiation Hydrodynamics”, 2004, Cambridge

Castor, J. I., Abbott, D. C., & Klein, R. I. 1975, *ApJ*, 195, 157

Cidale, “Los vientos de las estrellas supergigantes B. Causas y efectos”, 2018, BAAA, vol 60 (review)

Colazzo, M., 2013, Tesis Doctoral, “Transporte radiativo en medios en movimiento con campos de velocidades no monótonos”

Cranmer & Owocki, 1996, “Hydrodynamical simulations of corotating interaction regions and discrete absorption components in rotating O-star winds”, *ApJ*, 462: 469-488

Crowther, 2007, “Physical properties of Wolf-Rayet stars”, *ARAA*, 45:177-219

Curé, 2004, “The influence of rotation in radiation-driven wind from hot stars: New solutions and disk formation in Be stars”, *ApJ*, 614:929-941

Curé, Cidale & Granada, 2011, “Slow radiation-driven wind solutions of A-type supergiants”, *ApJ*, 737:18

De Becker, 2007, “Non-thermal emission processes in massive binaries”, *AARev*, 14:171-216

Friend, D. B. & Abbott, D. C. 1986, *ApJ*, 311, 701

Fullerton, Massa & Prinja, 2006, “The discordance of mass-loss estimates for galactic O-type stars”, *ApJ*, 637: 1025-1039.

Gabler, et al, 1989, “Unified NLTE model atmospheres including spherical extension and stellar winds: method and first results”, *A&A*, 226, 162-182

Gayley, 1995, “An improved line-strength parameterization in hot-star winds”, *ApJ*, 454, 410

Glatzel et al, 1999, “The non-linear evolution of strange-mode instabilities”, *MNRAS*, 303, 116-124

Gormaz-Matamala et al, 2019, “Self-consistent solutions for line-driven winds of hot massive stars: The m-CAK procedure”, *ApJ*, 873:131

Groenewegen, Lamers & Pauldrach, 1989, “The winds of O-stars. II. The terminal velocities of stellar winds of O-type stars”, *A&A*, 221, 78-88

Hamann, 1981, “Line formation in expanding atmospheres: On the validity of the Sobolev approximation”, *A&A*, 93, 353-361

Haucke et al, 2018, “Evidence of pulsations connected with mass-loss episodes”, *A&A*, 614, A91

Hillier, 1987, “An empirical model for the Wolf-Rayet star HD 50896”, *ApJS*, 63, 965

Hillier, 2007, “What do we really know about the winds of massive stars?”. *IAU Symp*, 250, p. 89

Holzer & Axford, 1970, “The Theory of Stellar Winds and Related Flows”, *ARAA*, 8, 31

Hundhausen, “Coronal Expansion and Solar Wind”, 1972, Springer

Kraus et al, 2015, “Interplay between pulsations and mass loss in the blue supergiant 55 Cygnus = HD 198478”, *A&A*, 581, A75

Krticka & Kubat, 2000, “Isothermal two-component stellar winds of hot stars”, *A&A*, 359, 983-990

Kudritzki, Méndez, Puls & McCarthy, 1997, “Winds in the atmospheres of central stars of planetary nebulae”, *IAUS*, 180, 64-73

Kudritzki & Puls, “Winds from Hot Stars”, *ARAA*, 2000, 38:613-66

Kudritzki et al, 1999, “The wind momentum-luminosity relationship of galactic A- and B-supergiants”,

A&A, 350, 970-984

Lafon & Berruyer, AARv, 1991, "Mass-loss mechanisms in evolved stars", 2:249-289

Lamers & Cassinelli, "Introduction to Stellar Winds", 1999, Cambridge

Lamers, Cerruti-Sola & Perinotto, 1987, "The 'SEI' method for accurate and efficient calculations of line profiles in spherically symmetric stellar winds", ApJ, 314: 726-738

Lamers, Snow & Lindholm, 1995, "Terminal velocities and the bistability of stellar winds", ApJ, 455: 269-285

Landau & Lifshitz, Fluid Mechanics, Vol. 6, 1987, Pergamon

Madura & Owocki, 2007, "A nozzle analysis of slow-acceleration solutions in one-dimensional models of rotating hot-star winds", ApJ, 660:687-698

Maeder & Meynet, 2000, ARAA, "The evolution of rotating stars"

Markova & Puls, 2008, "Bright OB stars in the Galaxy. IV. Stellar and wind parameters of early to late B supergiants", A&A, 478, 823-842

Markova & Puls, 2014, "The mass discrepancy problem in O stars of solar metallicity. Does it still exist? IAUS 307, 117

Marlborough & Zamir, 1975, "Rapidly rotating stars with optically thin stellar winds", ApJ, 195:145-155

Mihalas, Kunasz, & Hummer, 1975, "Solution of the comoving-frame equation of transfer in spherically symmetric flows. I. Computational method for equivalent-two-atom source functions", ApJ, 202, 465

Mihalas, 1978, "Solution of the comoving-frame equation of transfer in spherically symmetric flows. V. Multilevel atoms", ApJ, 219, 635

Mihalas, "Stellar Atmospheres", 2<sup>nd</sup> ed, 1978, Freeman

Noebauer & Sim, 2019, "Monte Carlo Radiative Transfer", Rev. in Computational Astrophysics.

Owocki, Castor & Rybicki, 1988, "Time-dependent models of radiatively driven stellar winds. I. Nonlinear evolution of instabilities for a pure absorption model", ApJ, 355, 914-930

Owocki, "Theory of winds from hot, luminous massive stars" 2014, Societe Royale des Sciences de Liege, vol. 80, p. 16-28, arXiv1409.20840

Owocki, Cranmer, Blondin, 1994, "Two-dimensional hydrodynamical simulations of wind-compressed disks around rapidly rotating B stars", ApJ, 424, 887

Pauldrach, A., Puls, J., & Kudritzki, R. P. 1986, A&A, 164, 86

Peraiah, "An Introduction to Radiative Transfer", 2004, Cambridge

Petrenz & Puls, 1996, "2-D non-LTE models of radiation driven winds from rotating early-type stars. I. Winds with an optically thin continuum", A&A, 312, 195

Puls et al, 1996, "O-star mass-loss and wind momentum rates in the Galaxy and the Magellanic Clouds. Observations and theoretical predictions", A&A, 305, 171-208

Puls, et al, 2005, "Atmospheric NLTE-models for the spectroscopic analysis of blue stars with winds. II. Line-blanketed models", A&A, 435, 669

Puls, 2008, "Physical and wind properties of OB-stars", IAU Symp, 250, 25

Puls, Vink & Najarro, 1997, "Mass loss from hot massive stars", 2008, AAR, 16:209-325

Santolaya-Rey, Puls & Herrero, "Atmospheric NLTE models for the spectroscopic analysis of luminous blue stars with winds", A&A, 323, 488

Sigut, 2018, "The Bedisk and Beray Circumstellar Disk Codes", ASP, 515, 213

Simón-Díaz et al., 2017, "The IACOB project. III. New observational clues to understand macroturbulent broadening in massive O- and B-type stars", A&A, 597, A22

Simonneau & Crivellari, 1993, "An implicit method to solve selected radiative transfer problems", ApJ, 409:830-840

Smith Nathan, "Mass Loss: Its effect on the evolution and fate of high-mass stars", ARAA, 2014, 52:487-528

Sundqvist, Owocki & Puls, "Nature and consequences of clumping in hot massive star winds", 2012,

ASP Conference Series, Vol. 465, p. 119

Urbaneja et al, 2008, "The Araucaria Project: The Local Group Galaxy WLM-Distance and Metallicity from Quantitative Spectroscopy of Blue Supergiants", ApJ, 684: 118-135

Urbaneja, Herrero & Puls, 2003, "Analysis of B-type supergiants revised: Plane-parallel vs. unified models", ASP Conf. Ser., vol 288, 247.

Venero et al, 2016, "The wind of rotating B supergiants. I. Domains of slow and fast solution regimes", ApJ, 822:28

Vink, de Koter & Lamers, 2000, "New theoretical mass-loss rates of O and B stars", A&A, 362, 295-309

Vink, de Koter & Lamers, 2001, "Mass-loss predictions for O and B stars as function of metallicity", A&A, 369, 574-588

Weber & Davis, 1967, "The angular momentum of the solar wind", ApJ, 148, 217