



El estudio de las estrellas en la era del *big data*

Klapp, Jaime; Fierro-Santillán, Celia Rosa; G. Sigalotti, Leonardo Di

El estudio de las estrellas en la era del *big data*

CIENCIA *ergo-sum*, vol. 31, 2024 | e251

Espacio del Divulgador

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Klapp, J., Fierro-Santillán, C. R. y G. Sigalotti, L. D. (2024). El estudio de las estrellas en la era del *big data*.
CIENCIA *ergo-sum*, 31. <http://doi.org/10.30878/ces.v31n0a36>

El estudio de las estrellas en la era del *big data*

The study of the stars in the Big Data era

Jaime Klapp*

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, México

jaime.klapp@inin.gob.mx

 <http://orcid.org/0000-0003-1828-9183>

Celia Rosa Fierro-Santillán

Universidad Nacional Autónoma de México, México

celiarosa.fierro@cch.unam.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-6129-5346>

Leonardo Di G. Sigalotti

Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, México.

leonardo.sigalotti@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0001-8043-0825>

Recepción: 25 de marzo de 2022

Aprobación: 15 de agosto de 2022

RESUMEN

Se aborda el problema de correlacionar modelos teóricos con espectros electromagnéticos observados en estrellas masivas en el contexto del gran volumen de información astronómica disponible en la actualidad. Se analizan las características de los códigos de atmósferas estelares y el proceso de modelado y ajuste del espectro observado de una estrella, los recursos de cómputo que se consumen en dicho proceso, así como el problema de los modelos desechados o almacenados en forma no estructurada. Se concluye que en el siglo XXI la forma de realizar investigación astronómica ha cambiado radicalmente al incorporar el enfoque *big data* y los observatorios virtuales.

PALABRAS CLAVE: atmósferas estelares, espectroscopía, bases de datos, *big data*.

ABSTRACT

The problem of correlating theoretical models with the observed electromagnetic spectra in massive stars is addressed in the context of the large volume of astronomical information currently available. The characteristics of the stellar atmosphere codes and the process of modeling and fitting to the observed stellar spectrum are analyzed, as well as the computational resources that are consumed in such a process, as well as the problem of models discarded or stored in an unstructured way. It is concluded that in the 21st century the way of carrying out astronomical research has changed radically by incorporating the Big Data approach and virtual observatories.

KEYWORDS: stellar atmospheres, spectroscopy, databases, Big Data.

INTRODUCCIÓN

Las técnicas de análisis de la información, tales como el procesamiento y análisis de datos, han progresado con rapidez en los últimos años debido fundamentalmente a los grandes volúmenes de datos disponibles para el análisis en las distintas áreas del conocimiento humano. Por ejemplo, en el siglo XXI los datos astronómicos obtenidos por los telescopios espaciales y desde tierra han generado enormes cantidades de información. Proyectos como el Sloan Digital Sky Survey,^[1] el Sky Mapper Southern Sky Survey^[2] y el Multimission Archive del STScI,^[3] por mencionar solo algunos, han cartografiado grandes segmentos del cielo que han generado 40, 500 y hasta 200 *terabytes* (TB) de información, respectivamente. Por otra parte, la incorporación del modelado por computadora ha generado bases de datos con cientos de modelos que también ocupan varios TB de información. El mayor

*AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

jaime.klapp@inin.gob.mx

desafío es tanto extraer la información contenida en los modelos como compararlos con las observaciones de estrellas reales, lo cual consume tiempo de análisis, pero también demanda una gran cantidad de memoria y tiempo de microprocesador. En este contexto, se ha vuelto relevante la incorporación de técnicas de gestión de datos masivos (o *big data* por su nombre en inglés) para correlacionar los modelos teóricos con los datos observados y realizar análisis que contribuyan al avance de la astronomía.

1. MODELOS DE ATMÓSFERAS ESTELARES

La atmósfera de una estrella es una región intermedia entre su interior y el medio interestelar, es decir, el medio externo a la estrella. Desde esta región, la luz que emite la estrella escapa al espacio circundante y puede llegar hasta un observador lejano (figura 1). Esta radiación es la fuente principal de información sobre las condiciones de la atmósfera de las estrellas; por lo tanto, es de suma importancia desarrollar métodos confiables que permitan decodificar (es decir, extraer) la información contenida en el espectro electromagnético de las estrellas. Uno de los métodos más utilizados es el modelado mediante el uso de computadoras. A través de simulaciones numéricas detalladas es posible predecir un modelo de atmósfera y su correspondiente espectro estelar. A este tipo de espectros se les conoce también como *espectros sintéticos*.

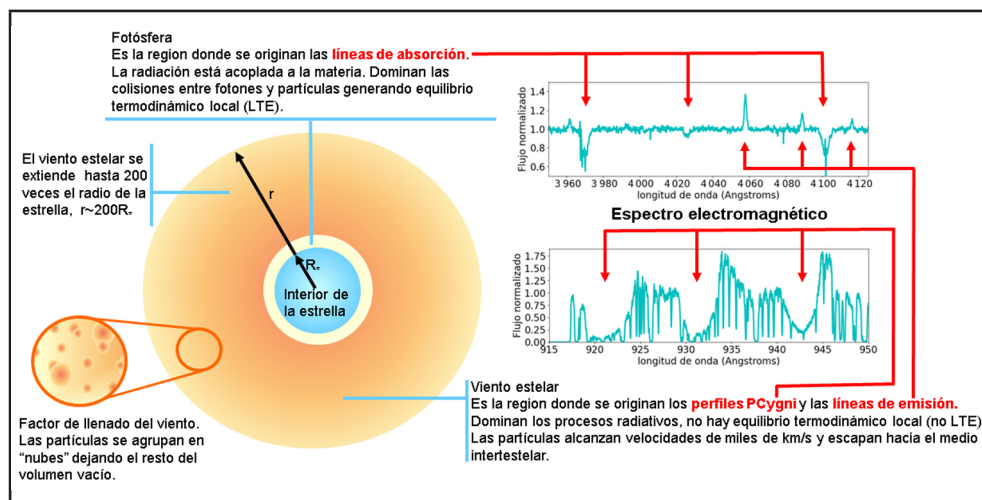


FIGURA 1

Atmósfera de una estrella con viento

Fuente: elaboración propia.

Nota: la radiación que llega a la atmósfera de una estrella desde su interior genera su espectro electromagnético. Los distintos tipos de líneas espectrales se originan en diferentes regiones de la atmósfera.

Al modelar una estrella los astrónomos no construyen una maqueta representando su forma, color o brillo, sino que reproducen sus condiciones físicas y composición resolviendo un conjunto de ecuaciones que describen las relaciones entre la materia y la energía coexistentes en la superficie de la estrella, mejor conocida como *fotosfera*. En la superficie de la estrella, la materia se encuentra fuertemente acoplada con la radiación. Los fotones provenientes del interior transfieren momento a los átomos de la fotosfera y crean una aceleración radiativa suficiente para equilibrar e incluso vencer la gravedad. Los elementos con muchos electrones (como el carbono (C), el nitrógeno (N), el oxígeno (O) y el hierro (Fe)) son más susceptibles a la aceleración radiativa que los elementos con pocos electrones. Esto implica que la velocidad del viento estelar varía dependiendo de la composición química de la estrella, conocida por la comunidad astronómica como metalicidad.^[4] Los metales conforman el espectro emergente a través de sus numerosas líneas al mismo tiempo que influyen en la transferencia radiativa debido a sus opacidades, lo que tiene consecuencias importantes para la estructura de ionización y temperatura y, por lo

tanto, en el espectro emergente. Para que los modelos de atmósferas estelares sean lo más realistas posible deben incluir metales, en especial el hierro.

El proceso de ajuste del espectro tiene como objetivo obtener un espectro sintético que reproduzca las principales características de un espectro observado, tales como la presencia o ausencia de líneas de iones específicos y también el ancho y la profundidad de las líneas. Al principio se parte de algunas suposiciones sobre los parámetros físicos de la estrella. Por ejemplo, se puede establecer una primera aproximación del valor de la temperatura en la fotosfera (T_{eff}) a partir de líneas de iones del mismo elemento en estados de ionización subsecuentes, por ejemplo, helio neutro y helio una vez ionizado (He I y He II) respectivamente. En cuanto a la composición química, se puede asumir una metalicidad semejante a la solar, por debajo o por encima de ella, dependiendo del entorno de la estrella estudiada. A partir de esta información preliminar se calcula un modelo de atmósfera y su espectro sintético en la computadora mediante un código de atmósferas estelares.

En la tabla 1 se comparan las características de los códigos de atmósferas más utilizados. Obtener un modelo de atmósfera puede consumir desde unos treinta minutos hasta varios días, lo cual depende de la sofisticación del código. Cuantas más ecuaciones y más capas de la estrella son tomadas en cuenta, los cálculos consumen más memoria y tiempo de microprocesador. Lo mismo ocurre con la composición química: cuantos más iones y más elementos son tomados en cuenta, se demandan más recursos de cómputo.

TABLA 1
Comparación de las principales características de los códigos de atmósferas estelares más utilizados

	Códigos de atmósferas estelares			
	TLUSTY	FASTWIND	PoWR	CMFGEN
Referencias	Hubeny y Lanz, 1995	Santolaya-Rey <i>et al.</i> 1997; Puls <i>et al.</i> , 2005	Gräfener <i>et al.</i> , 2002; Hamann y Gräfener, 2003; Sander, 2015	Hillier y Miller, 1998
Simetría	Plano-paralela	Esférica	Esférica	Esférica
Sistema de referencia para la transferencia radiativa	Estático	Sistema de referencia comóvil	Sistema de referencia comóvil	Sistema de referencia comóvil
Ecuaciones de equilibrio estadístico que determinan las poblaciones en los niveles atómicos	Equilibrio termodinámico local (LTE) y fuera del equilibrio termodinámico local (no LTE)	no LTE	no LTE	no LTE
<i>Line-blanketing</i>	Solo para líneas específicas	Tratamiento aproximado, pero realista usando valores promedio solo para elementos específicos (H, He y N)	Enfoque de super-niveles para las líneas de hierro.	Tratamiento exacto; se calculan todas las líneas en el marco de comóvil
Tiempo de microprocesador consumido por un modelo	-	0.5-1.5 horas	-	12-72 horas

Fuente: elaboración propia.

Las dos principales características de la atmósfera de las estrellas masivas es que se encuentra en expansión y que en la región del viento los procesos radiativos dominan sobre las colisiones entre partículas. Para modelar de manera adecuada estas condiciones se requiere incluir geometría esférica, así como un enfoque fuera del equilibrio termodinámico, también conocido como no NLTE (por las siglas en inglés de Non Local Thermodynamic

Equilibrium). Algunos códigos de atmósferas calculan las ecuaciones en un sistema de referencia comóvil, en el cual el origen de las coordenadas se coloca sobre una partícula que se aleja de la estrella a la velocidad del viento. Un fenómeno relevante para tener en cuenta es el *line blanketing*. No existe una traducción que describa adecuadamente este término en idioma español. Cuando varias líneas espectrales se traslapan entre sí ocurre un bloqueo de la radiación disponible para acelerar el viento, lo que produce una redistribución de la radiación en otras frecuencias. El *line blanketing* provoca que el nivel del continuo en el espectro sea menor al esperado si no ocurriera la redistribución de la radiación. Algunos códigos de atmósferas estelares como el código FASTWIND tienen como principal característica obtener un modelo en poco tiempo (media hora en promedio), pero sacrifican el tratamiento detallado de los fenómenos físicos. Otros códigos como CMFGEN incorporan un tratamiento muy detallado de las ecuaciones, además de un manejo apropiado de los distintos iones de los elementos más abundantes en las estrellas, por lo que consumen más tiempo para generar un modelo. A partir de su experiencia con los distintos códigos y de su propia filosofía de trabajo, cada astrónomo elige cuál código es el más adecuado para generar los modelos que le permitirán estudiar el fenómeno de su interés.

Una vez obtenido un modelo, se compara el espectro sintético con el observado; con el propósito de reducir las diferencias, se hacen nuevas suposiciones sobre cada parámetro físico y composición química. Nuevamente, se calcula un modelo, o mejor aún, una generación de modelos cubriendo el rango de parámetros de entrada que se desea probar. Después de varias generaciones de modelos se obtiene un espectro sintético que reproduce de manera satisfactoria las líneas del espectro observado. Se asume que los parámetros físicos y la composición química de la estrella son los del modelo, dado que este se obtuvo al simular los procesos físicos que ocurren en la superficie de la estrella y las poblaciones de los distintos iones (figura 2).

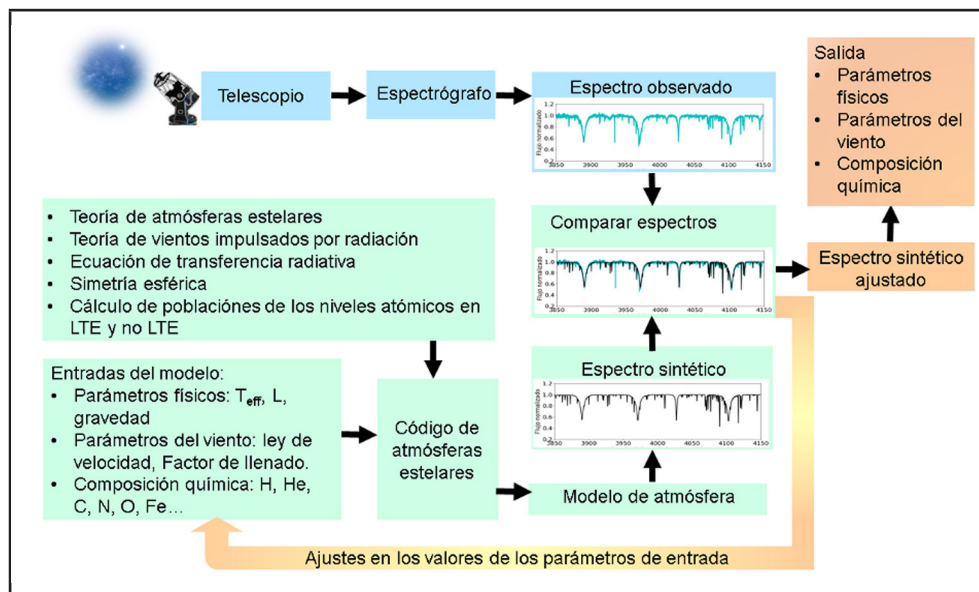


FIGURA 2
 Proceso de modelado y ajuste de un espectro
 Fuente: elaboración propia.

2. BIG DATA EN LA ESPECTROSCOPIA Y FOTOMETRÍA ESTELAR

El proceso de ajuste de un espectro consume tiempo de microprocesador y también horas de trabajo de personas especializadas. El tiempo total invertido en el ajuste depende del número de microprocesadores dedicados a calcular modelos y de la experiencia del astrónomo para lograr la mejor solución calculando el menor número de modelos posible. De las decenas de modelos generados para ajustar una estrella en particular, solo uno de ellos

es elegido como el mejor ajuste, el resto se deshecha o almacena sin un orden específico, por lo que constituyen datos no estructurados. La información contenida en los modelos desechados se pierde.

Contar con bases de datos de modelos de atmósferas precalculados agiliza el proceso de ajuste. Aunado a esto, los modelos utilizados para obtener un ajuste satisfactorio pueden incorporarse a la base de datos y proporcionar información que de otra manera se perdería. Cuando todos los modelos son calculados con el mismo código, y el conjunto de datos atómicos, también se pueden identificar y corregir posibles deficiencias en los códigos. Por otra parte, comparar los resultados obtenidos con modelos calculados con distintos códigos permite calibrar los valores de los parámetros, así como establecer el tamaño de la incertidumbre en dichos valores. De ahí la importancia de generar, mantener y gestionar adecuadamente distintas bases de datos a las que pueda acceder cualquier persona en la Tierra a través de una conexión a internet. Existen librerías y bases de datos con modelos de atmósferas estelares y sus correspondientes espectros sintéticos, por ejemplo los sitios web: PoWR – The Postdam Wolf-Rayet Star Models (Hamman y Hamman, 2004) y Atlas of CMFGEN Models for OB Massive Stars (UNAM, 2015), entre otras. La mayoría de ellas incluyen solo unas cuantas decenas o cientos de modelos debido a la cantidad de recursos computacionales que se requiere para generarlos. El término *big data* tiene dos acepciones: una de ellas se refiere a las tecnologías que hacen posible el almacenamiento y procesamiento de la información y la otra al análisis masivo de datos. En cuanto a la tecnología, el uso reciente de supercomputadoras ha permitido generar en paralelo un número mayor de modelos, ya que cubre un espacio de parámetros cada vez más amplio. A diferencia del mundo tridimensional en el que vivimos los seres humanos, las matemáticas aplicadas al procesamiento de datos permiten trabajar con espacios de múltiples dimensiones, en el que cada dimensión corresponde a una variable. Sin embargo, más datos no siempre es sinónimo de mejores resultados, pues las variables deben elegirse con sumo cuidado de manera que proporcionen la información suficiente para la toma de decisiones con el empleo mínimo de recursos de cómputo. Las bases de datos se encuentran organizadas como cubos o hipercubos de datos en espacios multidimensionales (Sharma *et al.*, 2020, Zsargó *et al.*, 2020). Por otra parte, el volumen de datos generados ha impulsado la creación de sitios web como *The Synthetic Stellar Spectra Database Pollux*^[5] y el *Exoplanet Modeling and Analysis Center*,^[6] en las que se puede acceder a catálogos y modelos de atmósferas estelares. Al mismo tiempo, se han desarrollado herramientas de minería de datos y algoritmos de inteligencia artificial enfocados al estudio de espectros estelares (Fierro-Santillán *et al.*, 2018; Dafonte *et al.*, 2016; Cheng *et al.*, 2018; Ting *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2019; Sharma *et al.*, 2020).

El concepto de *observatorio virtual* (VO por sus siglas en inglés) surgió en el 2000 como propuesta científico-tecnológica ante la necesidad de interconectar los archivos y bases de datos de los telescopios terrestres y espaciales con las herramientas y servicios de cómputo disponibles para su análisis, que forman un sistema integrado. Numerosas universidades, centros de datos y proyectos astronómicos en todo el mundo están trabajando para lograr este objetivo. La Alianza Internacional de Observatorios Virtuales (IVOA por sus siglas en inglés) agrupa en la actualidad 22 países. En la IVOA se discuten, comparten y acuerdan los estándares y tecnologías necesarios para hacer posible el OV. Entre las herramientas disponibles para analizar estrellas en línea destaca la plataforma VOSA (Bayo *et al.* 2008), la cual permite combinar mediciones fotométricas del usuario con los datos disponibles a través del VO para construir distribuciones de energía espectral (SED por sus siglas en inglés). También, es posible acceder a varias colecciones de modelos para simular SEDs teóricas y estimar los parámetros físicos de una estrella utilizando toda la información fotométrica disponible.

PROSPECTIVA

La forma de estudiar las estrellas ha cambiado radicalmente desde la antigüedad cuando los astrónomos estudiaban sus posiciones y movimientos. Al respecto, en la primera mitad del siglo XX se comprendieron los procesos físicos que ocurren en el interior y superficie de las estrellas, mientras que en la segunda mitad se desarrollaron las técnicas de modelado por computadora y los códigos de atmósferas estelares. En tanto, en el siglo XXI el gran

volumen de espectros estelares proveniente de observaciones astronómicas, al igual que el de espectros sintéticos generados en computadora, han impulsado el enfoque *big data* aplicado a las atmósferas estelares, así como el VO. El problema inicial de contar con suficientes modelos para ajustar una observación ha sido superado gracias al uso de supercomputadoras. Los modelos de atmósferas dispersos en computadoras de todo el mundo están empezando a ser organizados en bases de datos y en plataformas de acceso a ellas. Asimismo, se están desarrollando herramientas de minería de datos e inteligencia artificial que permiten extraer en un tiempo razonable la información contenida en cientos o miles de modelos, por lo que se genera una nueva forma de hacer astronomía. Estas nuevas herramientas de análisis de la información propiciarán un gran avance en la comprensión detallada de la estructura de las atmósferas estelares, sus vientos, evolución y el enriquecimiento químico del medio interestelar.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los árbitros anónimos por sus comentarios y sugerencias, los cuales contribuyeron a mejorar el artículo. Expresamos nuestro reconocimiento por los recursos, la experiencia y la asistencia por parte del Laboratorio de Matemática Aplicada y Cómputo de Alto Rendimiento “ABACUS” CINVESTAV-IPN, Proyecto CONACyT-EDOMEX-2011-C01-165873 y al Centro Nacional de Supercomputación de Barcelona en España (BSC), a través del Proyecto Horizonte 2020 de la Unión Europea No. 828947. J. Klapp agradece el apoyo financiero del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) de México bajo el proyecto B-S-69926.

REFERENCIAS

- Bayo, A., Rodrigo, C., Barrado y Navascués, D., Solano, E., Gutiérrez, R., Morales-Calderón, M., & Allard, F. (2008). *VOSA: virtual observatory SED analyzer*, *Astronomy & Astrophysics*, 492, 277-287. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810395>
- Cheng, L., Zhang, F., Kang X., & Wang, L. (2018). A new stellar spectrum interpolation algorithm and its application to Yunnan-III evolutionary population synthesis models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476, 4071-4084. <https://doi.org/10.1093/mnras/sty373>
- Dafonte, C., Fustes, D., Manteiga, M., Garabato, D., Álvarez, M. A., Ulla, A., & Allende Prieto, C. (2016). On the estimation of stellar parameters with uncertainty prediction from Generative Artificial Neural Networks: application to Gaia RVS simulated spectra. *Astronomy & Astrophysics*, 594, A68, 1-10. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527045>
- Fierro, C. R., Borissova, J., Zsargó, J., Díaz-Azuara, A., Kurtev, R., Georgiev, L., Ramírez Alegría, S., & Peñaloza, F. (2015). Atlas of CMFGEN Models for OB Massive Stars, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 127, 428-436. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/681703>
- Fierro-Santillán, C. R., Zsargó, J., Klapp, J., Díaz-Azuara, S. A., Arrieta, A., Arias, L., & Sigalotti, L. Di G. (2018). FITspec: A New Algorithm for the Automated Fit of Synthetic Stellar Spectra for OB Stars. *The Astrophysical Journal Supplement*, 236, 38-53. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4365/aabd3a>
- Gräfener, G., Koesterke, L., & Hamann, W. -R. (2002). Line-blanketed model atmospheres for WR stars. *Astronomy & Astrophysics*, 387, 244-257. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20020269>
- Hamann, W. -R., & Gräfener, G. (2003). A temperature correction method for expanding atmospheres. *Astronomy & Astrophysics*, 410, 993-1000. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20031308>
- Hamann, W.-R., & Gräfener, G. (2004). Grids of model spectra for WN stars, ready for use. *Astronomy & Astrophysics*, 427, 697-704. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20040506>

- Hamann D. M., & Hamann W.-R. (2004). *University of Postdam, PoWR - The Potsdam Wolf-Rayet Models*. <https://www.astro.physik.uni-potsdam.de/~wrh/PoWR/powrgrid1.php#obgridstart>.
- Hillier, D. J., & Miller, D. L. (1998). The Treatment of Non-LTE Line Blanketing in Spherically Expanding Outflows. *The Astrophysical Journal Supplement*, 496, 407-427. <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/305350>
- Hubeny, I., & Lanz, T. (1995), Non-LTE Line-Blanketed Model Atmospheres of Hot Stars. I. Hybrid Complete Linearization/Accelerated Lambda Iteration Method. *The Astrophysical Journal*, 439, 875-904. <https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1995ApJ...439..875H>
- Palacios, A., Gebran, M., Josselin, E., Martins, F., Plez, B., Belmas, M., & Lèbre A. (2010). POLLUX: a database of synthetic stellar spectra. *Astronomy & Astrophysics*, 516, A13, 1-8. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913932>
- Puls, J., Urbaneja, M.A., Venero, R., *et al.* (2005). *Astronomy & Astrophysics*, 465, 669-698. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2005A%26A...435..669P/PUB_PDF
- Sander, A., Shenar, T., Hainich, R., Gimenez-García A., Todt H., & Hamman, W. -R. (2015). On the consistent treatment of the quasi-hydrostatic layers in hot star atmospheres. *Astronomy & Astrophysics*, 577, A13, 1-13. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425356>
- Santolaya-Rey, A. E., Puls, J., & Herrero, A. (1997). Atmospheric NLTE-models for the spectroscopic analysis of luminous blue stars with winds. *Astronomy & Astrophysics*, 323, 488-512. <https://articles.adsabs.harvard.edu/full/1997A%26A...323..488S>
- Sharma, K., Kembhavi, A., Kembhavi, A., Sivarani, T., Abraham, S., & Vaghmare, K. (2019). Detecting Outliers in SDSS using Convolutional Neural Network. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 88, 174-181. <https://popups.uliege.be/0037-9565/index.php?id=8811>
- Sharma, K., Singth, H. P., Gupta, R., Kembhavi, A., Vaghmare, K., Shi, J., Zhao, Y., Zhang, J., & Wu, Y. (2020). Detecting Outliers in SDSS using Convolutional Neural Network. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 88, 174-181. <https://doi.org/10.25518/0037-9565.8811>
- Ting, Y. -S., Conroy, C., Rix, H. -W., & Cargile P. (2019). The Payne: Self-consistent ab initio Fitting of Stellar Spectra. *The Astrophysical Journal Supplement*, 879(2). <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ab2331>
- UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México). (2015). *Atlas of CMFGEN Models for OB Massive Stars*. <http://www.astrocu.unam.mx/atlas/index.html>
- Zsargó, J., Fierro-Santillán, C. R., Klapp, J., Arrieta, A., Arias, L., Valencia, J. M. , Sigalotti, L. Di G., Hareter, M., & Puebla, R. E. (2020). Creating and using large grids of precalculated model atmospheres for a rapid analysis of stellar spectra. *Astronomy & Astrophysics*, 643, A88, 1-20. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038066>

NOTAS

- [1] El Sloan Digital Sky Survey (SDSS) es un proyecto conjunto de la Universidad de Chicago, el Laboratorio Nacional Acelerador Fermi, el Instituto de Estudios Avanzados, el Grupo de Participación de Japón, la Universidad Johns Hopkins, el Instituto Max-Planck de Astronomía (MPIA), el Instituto Max-Planck de Astrofísica (MPA), la Universidad Estatal de Nuevo México, la Universidad de Princeton, el Observatorio Naval de los Estados Unidos, la Universidad de Washington, el Laboratorio Nacional de Los Álamos y la Universidad de Pittsburgh. El Observatorio Apache Point, sitio de los telescopios SDSS, es operado por el Consorcio de Investigación Astrofísica (ARC).

- [2] El Southern Sky Survey de SkyMapper está dirigido por la Escuela de Investigación de Astronomía y Astrofísica de la Universidad Nacional de Australia, en colaboración con siete universidades australianas y el Observatorio Astronómico Australiano. El objetivo del proyecto es crear un estudio digital profundo, multiépoca y multicolor de todo el cielo del hemisferio sur.
- [3] MAST (Multimission Archive) agrupa archivos de observaciones astronómicas obtenidas por 16 telescopios, incluidos el Hubble y el Kepler cubriendo las regiones óptica, ultravioleta e infrarroja cercana del espectro electromagnético. El Space Telescope Science Institute (STScI) es operado por la Association of Universities for Research in Astronomy, bajo un contrato con la National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- [4] La mayor parte de la materia presente en el universo está en forma de átomos de hidrógeno y helio, por lo que en astronomía todos los elementos más pesados que el helio son llamados *metales*. Este uso de la palabra *metal* es distinto de la definición química o física. Es importante distinguir entre abundancia química y metalicidad. La abundancia química es la proporción de masa de un elemento presente en la atmósfera estelar con respecto a otro elemento, por lo general el hidrógeno. También, puede ser la proporción del número de átomos de un elemento con respecto al número de átomos de hidrógeno. Determinar abundancias químicas requiere de cálculos detallados, mientras que el término metalicidad se refiere a un valor promedio de las abundancias de todos los elementos con número atómico mayor a 2.
- [5] Laboratoire Montpellier Univers & Particules, Université Montpellier-CNRS, The Pollux Database of Stellar Spectra. Disponible en <http://npollux.lupm.univ-montp2.fr/>
- [6] National Aeronautics and Space Administration Goddard Space Flight Center, Exoplanet Modeling and Analysis Center. Disponible en <https://emac.gsfc.nasa.gov/>

CC BY-NC-ND