

Proyecto HK α : 24 años y 400 noches.

A.P. Buccino^{1,2}, P.D. Colombo^{1,2}, F. Mosca², R. Ibañez Bustos³, M. Flores⁴, M.C. Vieytes¹, C.G. Oviedo¹, C.F. Martínez⁵, J.I. Peralta¹ & P. Mauas^{1,2}

¹ Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina

² Departamento de Física, FCEN-UBA, Argentina

³ Observatoire de la Côte d'Azur, Francia

⁴ Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio, CONICET-UNSJ, Argentina

⁵ Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

Received: 09 February 2024 / Accepted: 27 May 2024

©The Authors 2024

Resumen / Desde el año 1999, el Grupo de Física Estelar, Exoplanetas y Astrobiología del IAFE desarrolla en el Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) el Proyecto HK α destinado a observar sistemáticamente una centena de estrellas dF5 a dM5.5, con el objetivo de extender el estudio de la variabilidad y periodicidad magnética al final de la secuencia principal. Actualmente el Proyecto HK α es el único relevamiento sistemático de actividad estelar funcionando desde hace más de dos décadas. Este proyecto permitió detectar los primeros ciclos de actividad en enanas rojas, así como estudiar indicadores de actividad en diferentes regiones del espectro visible para distintos tipos espectrales y a lo largo de todo un ciclo de actividad estelar. En este trabajo, presentamos las nuevas herramientas desarrolladas para manejar esta extensa base de datos y los aportes que representarán para el Proyecto HK α con las mejoras instrumentales del Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) en estos últimos 5 años.

Abstract / Since 1999, the IAFE Stellar Physics, Exoplanets and Astrobiology Group has been developing the HK α Project at the Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO), dedicated to systematically observe a hundred dF5 to dM5.5 stars, with the aim of extending the study of magnetic variability and periodicity at the end of the main sequence. Currently the HK α Project is the only systematic survey of stellar activity in operation for more than two decades. The observations obtained under this project allowed the group to detect the first activity cycles in red dwarfs and to study activity indicators in different regions of the visible spectrum for different spectral types and throughout an entire stellar activity cycle. In this work, we present the new tools developed to manage this extensive database and the expected contributions for the HK α from the instrumental improvements of the Complejo Astronómico El Leoncito (CASLEO) in this last 5 years.

Keywords / stars: activity — stars: red dwarfs — stars: solar-type

1. Introducción

Luego de cuatro décadas de estudios de variabilidad en estrellas de tipo solar, Baliunas et al. (1998) encontraron que un 60% de las mismas muestran un comportamiento cíclico como el del Sol, con períodos que van de 2 a 30 años. Alrededor del 25% de las estrellas observadas muestra variaciones erráticas, sin una periodicidad observable. El otro 15% de las observaciones muestra estrellas con niveles constantes de emisión cromosférica. Sin embargo, poco se conocía de la actividad magnética de largo plazo en estrellas más frías (tipo K tardío y M).

En este sentido, con el objetivo de extender el estudio de la variabilidad y periodicidad estelar al final de la secuencia principal y obtener un registro de actividad para estrellas del hemisferio sur. En 1999 el grupo de Física Estelar, Exoplanetas y Astrobiología (FEEPA) del IAFE, liderado por el Dr. Pablo Mauas, inició el Proyecto HK α (Cincunegui & Mauas, 2004) destinado a observar sistemáticamente un conjunto de estrellas tardías, utilizando el espectrógrafo REOSC, montado en el telescopio de 2.15 m del Complejo Astronómico El

Leoncito (CASLEO, San Juan). Estos estudios fueron realizados con frecuencia creciente, y que actualmente es de cuatro veces al año.

La extensa base de datos del Proyecto HK α ha permitido la detección de los primeros ciclos de actividad en las estrellas Ms. En particular, a partir de las observaciones de CASLEO en conjunto con espectros obtenidos de la base pública del European Southern Observatory hemos detectado ciclos de actividad en las estrellas M puramente convectivas muy activas como Proxima Centauri y GJ 729 (Cincunegui et al., 2007; Ibañez Bustos et al., 2020), en estrellas M en el límite convectivo como GJ 375, AD Leo y Ross 128 (Díaz et al., 2007; Buccino et al., 2014; Ibañez Bustos et al., 2019b) y en las estrellas M tempranas GJ 752 A, GJ 229 A y AU Mic (Buccino et al., 2011; Ibañez Bustos et al., 2019a). Estos trabajos constituyen una de las pocas detecciones de ciclos de actividad magnética en estrellas Ms.

Por otro lado, la amplia cobertura espectral de los espectros del Proyecto HK α permite estudiar diferentes líneas espectrales asociadas a la actividad de la estrella que se forman en diferentes regiones de la cromósfera co-

mo (H α , Na I y Ca II) de manera simultánea. Entre los trabajos más citados de este proyecto se encuentra el de Cincunegui et al. (2007) donde se reportó por primera vez que los flujos de las líneas de H α y Ca II correlacionaban positivamente en algunas estrellas al igual que el caso solar, pero por primera vez mostró que esta correlación no se hacía presente o era negativa en otro grupo de estrellas de tipo solar y enanas rojas (enanas K tardío y M). Estos resultados fueron corroborados por otros autores con otras estrellas y otras bases de datos (Walkowicz & Hawley, 2009; Meunier et al., 2022; Gomes da Silva et al., 2022).

Entre los resultados relevantes del Proyecto HK α cabe destacar la formación de recursos humanos. Con las observaciones obtenidas en CASLEO en el marco de este proyecto se han llevado a cabo 7 tesis doctorales en diferentes universidades argentinas (UBA, UNC, UNSJ) y una tesis de maestría en la Universidad de Colorado (E.E. U.U.), así como 6 tesis de licenciatura en la UBA*. En la actualidad, el Proyecto HK α vincula investigadores y becarios del Instituto de Astronomía y Física de del Espacio (IAFE, UBA-CONICET), del Instituto de Ciencias Astronómicas, de la Tierra y del Espacio (ICATE, UNSJ-CONICET) y del Observatorio Astronómico de Córdoba (OAC, UNC-CONICET).

El proyecto HK α cuenta con observaciones obtenidas a lo largo de 24 años en 93 turnos de observación, generando un gran volumen de datos de características comunes. Una correcta caracterización de esta base de datos permitiría diagnosticar el material disponible así como también programar observaciones futuras de manera eficiente. Con estos objetivos, hemos desarrollado un repositorio público disponible en GITHUB que permite interactuar con la amplia base de datos obtenidos a lo largo de 24 años del proyecto. En este trabajo, presentaremos la metodología de observación, los productos típicos del Proyecto HK α y, por primera vez, compartiremos los paquetes diseñados para leer y analizar la amplia cantidad de imágenes obtenidas en CASLEO.

2. Observaciones

El Proyecto HK α fue concebido con el objetivo de obtener espectros calibrados en flujo de alta calidad que permitieran por un lado construir modelos de atmósferas, así como monitorear sistemáticamente los niveles de actividad de estrellas del hemisferio sur. La muestra original se seleccionó de acuerdo a una serie de criterios. Por un lado, se incluyeron 18 estrellas no variables, según Henry et al. (1996) que fueron utilizadas para calibrar el índice de Mount Wilson, también se incluyeron estrellas tardías con altos niveles de actividad, estrellas de tipo solar, estrellas con planetas y otras estrellas para complementar una distribución medianamente uniforme en tipo espectral. A lo largo de los años, la muestra fue evolucionando. En particular, el programa se dedicó a la observación de estrellas dM, abarcando diferentes rangos de actividad y priorizando el estudio de esta muestra cerca del límite convectivo (dM3.5). Hoy en día la muestra incluye un centenar de enanas F y G activas

y K y M de diferentes niveles de actividad, todas ellas principalmente observables sólo desde el hemisferio Sur.

Desde el año 1999, el Proyecto HK α solicita turnos de observación de frecuencia trimestral en CASLEO, donde en cada turno se obtienen 2 espectros echelle consecutivos de cada una de las estrellas de la muestra, según la visibilidad, con el espectrógrafo REOSC en configuración DC montado en el Telescopio Jorge Sahade (TJS) de 2.15 m. Para lograr una amplia cobertura espectral y una dispersión que permita resolver las líneas de Ca II H y K en 3968 y 3933 Å utilizamos la red 316 1/mm centrada en 5000 Å. Ambos espectros son promediados para eliminar los rayos cósmicos. Para la reducción y calibración de los espectros, utilizamos el método desarrollado en (Cincunegui & Mauas, 2004). El principal problema de los espectros de alta dispersión cruzados con el espectrógrafo REOSC en dispersión cruzada, es que tienen superpuesta una función de blaze muy pronunciada, lo que hace muy difícil la calibración en flujo por comparación directa con estrellas estándares. Como solución, se recomienda adquirir espectros de las mismas estrellas en dispersión simple, y utilizarla para la calibración en flujo del espectro echelle.

En la Fig. 1 mostramos espectros característicos del Proyecto HK α para diferentes tipos espectrales de la muestra.

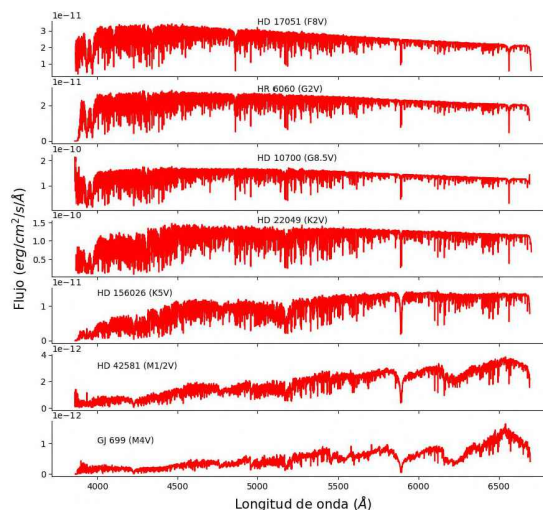


Fig. 1. Espectros calibrados en flujo obtenidos en el Proyecto HK α , a modo de ejemplo se muestra un espectro característico para estrellas de secuencia principal de diferentes tipos espectrales.

Desde el primer semestre del 2020, el Proyecto HK α fue presentado como propuesta *PLP (Proyecto de Largo Plazo)*, ya que el alcance de sus objetivos científicos requieren observaciones en más de un semestre.

3. Base de datos

Con el propósito principal de caracterizar la base de datos y, así, diagramar futuras observaciones de manera eficiente, hemos desarrollado un repositorio diseñado

*<https://casleo.conicet.gov.ar/tesis/>

específicamente para operar con los espectros crudos del Proyecto HK α . El repositorio se encuentra disponible públicamente en <https://github.com/HKalpha/HKalpha>, donde se puede acceder a un paquete diseñado en lenguaje PYTHON destinado a la lectura de la base de datos y un *script* que muestra una serie de rutinas que permiten acceder a la información de la tabla y caracterizar la base de datos. Estos paquetes fueron diseñados en base a módulos de las librerías PANDAS y ASTROPY.

Para una correcta lectura de la base de datos, se requiere que los espectros observados desde CASLEO se encuentren organizados en la estructura de directorios y subdirectorios según el turno (MMYY) y la fecha de observación (YYYYMMDD) respectivamente. El paquete TABLE.PY lee los headers de las observaciones y construye una única tabla donde cada columna representa un campo de los headers. Los ejemplos volcados en la *notebook* ANALISIS.IPYNB muestran rutinas que permiten leer esta tabla y analizar distintos parámetros característicos de la base de datos: número de observaciones por estrella, extensión temporal de las observaciones por estrella, etc. Algunas de las rutinas pueden interactuar con la base de datos del *SIMBAD-Astronomical Database*** y, así relacionar características de la base de datos con parámetros estelares de la muestra.

En la Fig. 2 mostramos un esquema del funcionamiento de estas rutinas. Si bien ambos paquetes fue-

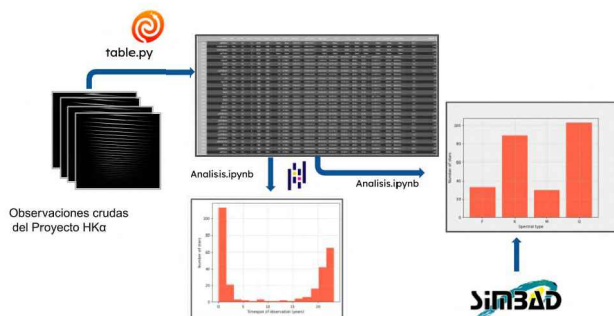


Fig. 2. Esquema del repositorio diseñado para lectura y análisis de la base de datos del Proyecto HK α .

ron diseñados para observaciones del Proyecto HK α , estos paquetes fueron desarrollados con el objetivo de que fuesen fácilmente adaptables a otras base de datos de CASLEO. Por lo tanto, estimamos que ambos paquetes serán de gran utilidad para la comunidad astronómica argentina.

3.1. Resultados

A septiembre del 2023, el Proyecto HK α contaba con un total de 20245 observaciones, donde se incluyen imágenes de calibración (*bias*, *flats*, *lámparas*, *estrellas estándares*) e imágenes de ciencia obtenidas a lo largo de 24 años. Del análisis de la base de datos, construimos el histograma de la Fig. 3 donde se puede ver la distribución del lapso de tiempo de observación de cada una

**<https://simbad.unistra.fr/simbad/>

de las estrellas de la muestra. Del total de 261 estrellas de ciencia observadas por el Proyecto HK α , 110 estrellas de la muestra fueron observadas sostenidamente durante al menos 20 años, permitiendo estudiar su actividad de largo plazo.

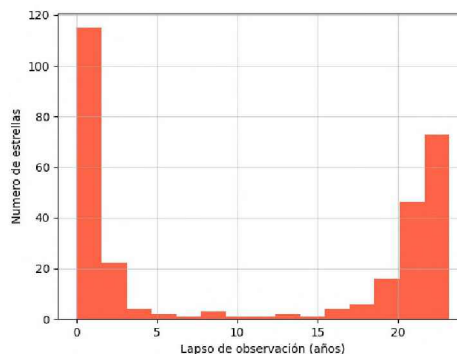


Fig. 3. Histograma del extensión temporal de la base de espectros por estrella.

A partir del conocido paquete ASTROQUERY, en el *script* ANALISIS.IPYNB se incluyeron celdas de códigos que permiten entrecruzar información de base de datos o catálogos públicos con la tabla confeccionada de las observaciones. A modo de ejemplo de estos códigos en la Fig. 4 mostramos la distribución de la muestra de estrellas de ciencia observadas en el Proyecto HK α en función de la clase espectral. A lo largo del proyecto HK α se han observado 33 estrellas M, 34 F, 103 G y 91 K.

4. Futuro del Proyecto HK α

Con observaciones del Proyecto HK α hemos mostrado que las estrellas dM pueden presentar ciclos de actividad similares a los solares (e. j. Cincunegui et al. 2007; Buccino et al. 2011; Ibañez Bustos et al. 2020, 2021), así como también se han detectado dos ciclos de actividad simultáneos en estrellas de tipo solar (Metcalf

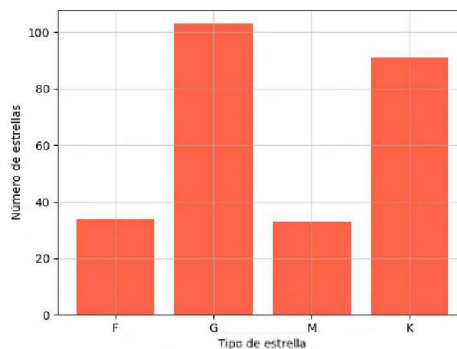


Fig. 4. Distribución de la muestra de estrellas según clase espectral.

et al., 2013; Flores et al., 2016) o se ha estudiado la actividad en sistemas binarios (Díaz et al., 2007; Martínez et al., 2019; Flores et al., 2021). Dado que los espectros se encuentran calibrados en flujo, muchos espectros del Proyecto HK α han sido utilizados para construir modelos de atmósferas (Vieytes et al., 2009; Tilipman et al., 2021), así como para analizar mediciones simultáneas de distintos indicadores de actividad (Buccino et al., 2012; Ibañez Bustos et al., 2023).

Esta primera fase del proyecto ha cumplido gran parte de sus objetivos iniciales y se planea que una segunda fase del Proyecto HK α se dedique a monitorear una nueva muestra de estrellas frías. De esta manera nos enfocaremos en aquellas estrellas dM y dK tardías recientemente catalogadas en CONCH-SHELL (Gaidos et al., 2014), observadas por el Proyecto HK α desde el año 2018, aunque con baja frecuencia. Estas observaciones permitirán analizar la variabilidad a corto y largo plazo y, eventualmente, confirmar la periodicidad de una serie de estrellas dK y dM no estudiadas previamente en la literatura. También incorporaremos a la muestra enanas ultrafrías para determinar los niveles de actividad desde una serie de índices espectroscópicos y así complementar el trabajo liderado por la Dra. Romina Petrucci (OAC, UNC-CONICET) quien recientemente ha estudiado la variabilidad fotométrica de estas estrellas en Petrucci et al. (2024). Por otro lado, en los últimos años una revisión de la actividad magnética en estrellas de tipo solar y observaciones recientes en estrellas FGK han echado luz sobre el dínamo solar, así como también han contextualizado las fases de baja actividad solar y han revelado nuevos aspectos de la actividad magnética en estrellas de tipo solar y en última instancia sobre su dínamo subyacente. En este contexto la segunda fase del Proyecto HK α se enfocará en aquellas estrellas de tipo solar cuya actividad atraviesa un mínimo prolongado, fortaleciendo la línea iniciada por el Dr. Matías Flores (ICATE, UNSJ-CONICET) en Flores et al. 2018, 2021.

Cabe señalar que las mejoras instrumentales llevadas a cabo en CASLEO nos permitirán expandir el Proyecto HK α en busca de estos objetivos. En el año 2023 el espectrógrafo REOSC fue equipado con un nuevo detector SOPHIA 2048B-152-VS-X, que permite ampliar la cobertura espectral y la resolución de los espectros obtenidos hasta dicha fecha. Por un lado, siguiendo el reciente informe del Dr. Federico González***, donde analiza la eficiencia de cada una de las redes disponibles con este nuevo detector, exploraremos nuevas configuraciones experimentales en los nuevos turnos asignados para el 2024.

Por otro lado, dado que para observar las líneas de Ca II H y K en las estrellas ultra-frías, que se incorporarán en el proyecto, se requieren muchas horas de integración y sólo podrá lograrse con aquellas más brillantes, surge la necesidad de buscar nuevos indicadores de actividad en longitudes de onda mayores. Una ventaja que posee el nuevo detector SOPHIA es que permite observar simultáneamente las líneas de H α y el triplete

infrarrojo del Ca II. De esta manera, a partir de una calibración fiable del doblete y el triplete del Ca II junto con el indicador H α podremos expandir los registros de actividad en aquellas estrellas dM más frías y más débiles. Más aún, muchas de estas mediciones podrán ser complementadas con espectros de alta resolución en la banda YJHK de otros observatorios (CARMENES, SPIRou, NIRPS), donde las líneas del Ca II H y K, usualmente utilizadas para el estudio de actividad no se observan.

Finalmente, expandiremos el repositorio presentado en este trabajo, ya que los códigos actuales fueron construidos para administrar las observaciones crudas. En una segunda fase desarrollaremos rutinas similares que operen con los espectros extraídos y calibrados con el objetivo de proveer mediciones de actividad provenientes de distintas líneas espectrales. La automatización de estos procesos permitirán eficientizar el análisis así como estandarizar los productos del Proyecto HK α para ser compartidos con la comunidad internacional.

Agradecimientos: Agradecemos a todo el personal técnico y científico de CASLEO por permitir que el Proyecto HK α se desarrolle ininterrumpidamente durante 24 años. La presentación de este trabajo en la 65a. Reunión Anual Argentina de Astronomía fue posible gracias al apoyo económico del subsidio PICT 2018-0863 expedido por la Agencia Nacional para la Promoción de Ciencia y Tecnología.

Referencias

- Baliunas S.L., et al., 1998, R.A. Donahue, J.A. Bookbinder (Eds.), *ASP Conf. Ser. 154: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, 153–+
- Buccino A.P., Vieytes M.C., Mauas P.J.D., 2012, C.H. Mandrini, D.F. Webb (Eds.), *IAU Symposium, IAU Symposium*, vol. 286, 324–327
- Buccino A.P., et al., 2011, *AJ*, 141, 34
- Buccino A.P., et al., 2014, *ApJL*, 781, L9
- Cincunegui C., Mauas P.J.D., 2004, *A&A*, 414, 699
- Cincunegui C.C., Diaz R., Mauas P., 2007, *A&A*, 461, 1107
- Díaz R.F., et al., 2007, *A&A*, 474, 345
- Flores M., et al., 2016, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 58, 325
- Flores M., et al., 2018, *MNRAS*, 476, 2751
- Flores M., et al., 2021, *A&A*, 645, L6
- Gaidos E., et al., 2014, *MNRAS*, 443, 2561
- Gomes da Silva J., et al., 2022, *A&A*, 668, A174
- Henry T.J., et al., 1996, *AJ*, 111, 439
- Ibañez Bustos R.V., Buccino A.P., Mauas P.J.D., 2021, *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 62, 71
- Ibañez Bustos R.V., et al., 2019a, *MNRAS*, 483, 1159
- Ibañez Bustos R.V., et al., 2019b, *A&A*, 628, L1
- Ibañez Bustos R.V., et al., 2020, *A&A*, 644, A2
- Ibañez Bustos R.V., et al., 2023, *A&A*, 672, A37
- Martínez C.I., et al., 2019, *MNRAS*, 490, 5832
- Metcalfe T.S., et al., 2013, *ApJL*, 763, L26
- Meunier N., et al., 2022, *A&A*, 658, A57
- Petrucci R.P., et al., 2024, *MNRAS*, 527, 8290
- Tilipman D., et al., 2021, *ApJ*, 909, 61
- Vieytes M.C., Mauas P.J.D., Díaz R.F., 2009, *MNRAS*, 398, 1495
- Walkowicz L.M., Hawley S.L., 2009, *AJ*, 137, 3297

***<https://casleo.conicet.gov.ar/wp-content/uploads/sites/42/2023/08/ReoscDC270.pdf>