

**PROYECTO ACADÉMICO DE DOCTORADO
POSGRADO EN ASTROFÍSICA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**TITULO: ROTACIÓN ESTELAR EN ESTRELLAS JÓVENES- *STELLAR*
ROTATION IN YOUNG STARS**

ESTUDIANTE: JAVIER SERNA QUIÑONES

TUTOR: JESÚS HERNÁNDEZ

COMITÉ TUTOR : CARLOS ROMÁN (IA-UNAM Ensenada), SUSANA LIZANO (IRYA-UNAM Morelia).

INTRODUCCIÓN

La rotación estelar es una cantidad fundamental en los procesos de formación, evolución estelar y planetaria. En este contexto, es una pieza clave para entender la evolución del momento angular y su relación a diversos procesos estelares. El momento angular y su evolución es uno de los problemas abiertos más desafiantes de la astrofísica estelar moderna (Bouvier 2013).

En la actualidad, se han encontrado relaciones de la rotación con otros fenómenos astrofísicos como por ejemplo, el agotamiento del litio en estrellas jóvenes de baja masa (Somers and Pinsonneault 2014; Jeffries 2014; Bouvier et al. 2016, 2018; Somers and Stassun 2017), la generación del mecanismo dínamo en los interiores estelares (Berdyugina 2005), la acreción y la actividad estelar con indicadores como $H\alpha$, CaII, Emisión UV, manchas estelares, emisión de rayos X (Noyes et al. 1984; Soderblom et al. 1991; Biazzo et al. 2009; Affer et al. 2013; Davies et al. 2014; Somers and Stassun 2017; Venuti et al. 2017); el fenómeno de la inflación del radio (Somers and Pinsonneault 2015; Jackson et al. 2016; Somers and Stassun 2017); El campo magnético observado (Barnes 2007; Meibom et al. 2011; Vidotto et al. 2014); la relación con la evolución de sistemas binarios (Stauffer et al. 2018); la pérdida de masa a través de vientos estelares (Matt and Pudritz 2005); la evolución y migración planetaria (Privitera et al. 2016), incluso se ha encontrado que la rotación puede ser un trazador directo de la formación estelar en el disco galáctico (Davenport 2017; Davenport and Covey 2018). Hoy en día sabemos que la relación entre la rotación estelar y estos fenómenos físicos dependen fuertemente de la edad y masa estelar, lo cual aumenta la complejidad hacia un mejor entendimiento del origen y evolución del momento angular de las estrellas y sus potenciales planetas circundantes.

Justificación

Inclinaciones estelares

Múltiples trabajos se han desarrollado en dirección a buscar tendencias globales de la inclinación estelar en la medida del conocimiento de miembros estelares y medidas disponibles de rotación. Por ejemplo, Jackson and Jeffries (2010) encontraron que los polos de rotación estelar se encuentran distribuidos aleatoriamente. Contrario a esto, trabajos más recientes (Kovacs 2018; Corsaro et al 2017; Serna et al in prep 2020) demuestran evidencias de una posible alineación preferencial. Esto ha centrado especialmente un foco de atención, ya que existen muchas preguntas abiertas referentes a los procesos de fragmentación y formación estelar, y la forma de transferencia de momento angular a escalas estelares.

La perspectiva de una alineación global, sugiere que la distribución de la orientación de los polos de rotación estelar son de origen primigenio, y así, una huella de las propiedades globales de la nube que dió origen al grupo estelar. Un escenario alternativo implica que los procesos de fragmentación, colapso y origen de grupos estelares jóvenes convergen a crear rotadores estelares en un cierto grado de alineación en sus polos. Se requieren estudios adicionales que confirmen la hipótesis de alineación y cuales son las condiciones ambientales relacionadas (e.g. densidad estelar, dispersión de velocidades, campos magnéticos globales).

Estamos en la capacidad de combinar mediciones de rotación ($v \sin i$, periodo) y radio estelar a través de estimaciones de luminosidad y temperatura, para derivar una estimación de los ángulos de rotación [i]. Con esto, será posible explorar la distribución de [i] en diferentes regiones de formación estelar jóvenes, y examinar de una manera robusta grados de alineación global para diferentes grupos de estrellas jóvenes con estados evolutivos y propiedades ambientales diferentes.

Conexión rotación estelar - disco protoplanetario

Durante la etapa de pre-secuencia principal, la conservación del momento angular en estrellas de baja masa ($M < 1.2M_{\odot}$) predice que la tasa de rotación debe incrementarse, debido a los procesos de contracción gravitacional y acreción estelar que cambian el radio y la masa de manera sustancial (Palla and Stahler 1992). En este sentido, se ha observado rotaciones moderadamente bajas en objetos jóvenes, lo que implica la activación de mecanismos de pérdida de momento angular en las primeras fases de una estrella. Por ejemplo, Stassun et al. (1999) muestran que miembros de baja masa en la Nebulosa de Orión (1-2 millones de años) manifiestan una rotación moderada, alrededor del 10% de la velocidad de ruptura. Incluso, protoestrellas profundamente embebidas parecen tener una rotación moderada, con un valor promedio de 40 km/s (Covey et al. 2005).

En esta dirección se ha sugerido que la presencia de discos protoplanetarios en acreción puede ejercer un mecanismo de frenado magnético, regulando de esta forma la rotación estelar observada. Sin embargo, algunos trabajos demuestran que no existe diferencia alguna entre la rotación de estrellas acretoras (CTTS) y no acretoras (WTTS) (Stassun et al. 1999; Karim et al. 2016; Rebull et al. 2006). Mientras que otros trabajos confirman diferencias en la distribución de los principales observables de rotación estelar (velocidad rotacional proyectada, $v \sin i$ y periodo de rotación) entre CTTS y WTTS (Rebull 2001; Herbst et al. 2002; Sicilia-Aguilar et al. 2005; Serna Thesis de maestría)

Rebull et al. (2006) enfatizan que la mayoría de estrellas de baja masa con baja rotación (periodos >1.8 días), presentan una distribución de periodos estadísticamente indistinguible entre las estrellas con disco protoplanetario y aquellas estrellas sin disco. Para esto, sugieren dos escenarios, a) La escala de tiempo de la evolución de momento angular es comparable o mayor al tiempo de disipación del disco (Hartmann 2002), y b) Long et al. (2005) propone que una combinación de la tasa de acreción estelar y el campo magnético estelar, puede frenar el disco en diferentes niveles y puede resultar en rotaciones estelares diferentes para estrellas similares.

Motivados por una explicación a este escenario, (Le Blanc et al. 2011) buscaron una correlación entre la rotación y parámetros físicos de los discos protoplanetarios, y finalmente concluyen que no existe un frenado magnético disco-estrella al menos para las estrellas del cúmulo estelar IC 348.

Debido a lo discordante de trabajos previos en relación al posible efecto que puede tener los discos protoplanetarios en la regulación de la evolución del momento angular estelar, nos planeamos hacer un estudio a gran escala, sin precedentes, de la rotación estelar en estrellas jóvenes, y las propiedades físicas de sus discos protoplanetarios derivadas a través de modelos de discos irradiados (D'Alessio et al. 1998). En este sentido se espera contribuir a entender mejor el panorama del momento angular en estrellas T Tauri.

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar la rotación estelar en conexión con las propiedades físicas de las estrellas, sus discos protoplanetarios y sus propiedades ambientes globales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Estimar parámetros estelares y determinar la rotación para estudios a gran escala en regiones de formación estelar.
2. Estudios de inclinaciones de los polos de rotación estelar
3. Conexión entre la rotación y discos protoplanetarios.

Metodología.

1. Estimar parámetros estelares y determinar la rotación para estudios a gran escala en regiones de formación estelar

Basado en una herramienta diseñada en el trabajo de maestría de Javier Serna, planeamos diseñar un dataducto para la extracción de curvas de luz y medidas de rotación de manera automática y homogénea para estrellas miembros a regiones de formación estelar. Para esto, se usará observaciones multiépoca de TESS (Ricker et al. 2014). Cada producto será presentado como una imagen que incluye la curva de luz procesada usando fotometría de apertura, la curva de luz doblada en fase, y el periodograma de Lomb-Scargle para el análisis del periodo (VanderPlas 2017).

Dada la resolución espacial de TESS (1pix~21 arcsec) es posible que exista contaminación de la fotometría en campos poblados de fuentes. Para esto, el algoritmo de manera autónoma definirá cual es la apertura óptima para minimizar el efecto de contaminación y pondrá una bandera en caso inminente de este efecto.

Como proyecto auxiliar, se planea adecuar el dataducto a nuevas observaciones multiépoca del telescopio DDOTI (1pix~2 arcsec) del observatorio San Pedro Martir (Watson et al. 2016). Esto permitirá complementar los datos de TESS, a una cadencia de 30 segundos para regiones de formación estelar como Orión, Tauro, Monoceros, y nos podría ofrecer mejor cobertura para objetos que no están resueltos espacialmente por TESS (1pix~21 arcsec). Otras bases de datos de periodos de rotación como ASAS-SN (Jayasinghe et al. 2019) y OGLE (Udalski et al. 2002) pueden incorporarse para completar información de este proyecto.

Por otro lado, disponemos de espectroscopía en alta resolución de APOGEE ($R \sim 22500$; García Pérez et al. 2016; Kounkel et al 2019), HECTOHELLE (resolución ~ 35000), y M2FS, en todo el complejo de Orión y otras regiones relativamente jóvenes (edad < 100 Millones de años).

Con esto, planeamos implementar dos métodos muy precisos como son el método de Fourier y la técnica CCF (Carroll and A. 1933; Díaz et al. 2010) para estimar $v \sin i$ a partir de esta base de datos. Realizaremos una comparación directa con espectros sintéticos (librería Phoenix, Husser et al. 2013) ensanchados rotacionalmente, lo que permitirá obtener parámetros estelares adicionales como velocidad radial, temperatura efectiva y gravedad estelar.

Contamos con una base de datos de espectros ópticos de baja resolución ($R \sim 1000$) obtenidos con el espectrógrafo B&C del observatorio San Pedro Mártir y obtenidos con otros instrumentos (e.g. HECTOSPEC en el observatorio MMTO, CCDS en el observatorio MDMO, FAST observatorio FLWO). Estos datos fueron procesados con la herramienta SPTCLASS (Hernandez et al. 2017) para obtener temperatura efectiva de las estrellas de interés, la presencia de acreción por la medición de la línea H α y la confirmación de juventud por la medición de la línea de Litio (Hernández et al. 2014; Briceño et al. 2019; Hernández et al en preparación).

Además de los datos de 2MASS, y WISE para detectar la presencia de discos protoplanetarios mediante el exceso de flujo infrarrojo, tenemos disponible datos de GAIA-DR2 y tendremos la tercera remesa de GAIA que saldrá en 2021, y proporcionará distancias, posiciones y movimientos propios excepcionales, los cuales servirán no solo para confirmar cinemáticamente la membresía de nuestras estrellas a grupos jóvenes, sino también verificar su pertenencia usando el diagrama HR. La posición en el diagrama HR, servirá para estimar el radio, la masa y la edad individual a través de comparaciones con modelos evolutivos (Kounkel et al. 2019).

Todo esto nos pone en una posición privilegiada para realizar un estudio estadístico del momento angular en diversas regiones de formación estelar en la vecindad solar (e.g, Monoceros, Serpiente, Orión, Tauro), incluso regiones más evolucionadas (e.g, Upper Sco, Gamma Vel, IC 348, Perseus OB2, Pleiades).

Los resultados en este objetivo serán cruciales para los otros objetivos específicos y colaboraciones planteados en este proyecto (ver apéndice).

2. Alineación de polos de rotación en grupos estelares jóvenes.

Combinando los periodos de rotación y las mediciones de $v \sin i$, se estimará la distribución estadística de inclinaciones del polo de rotación y se estudiará las alineaciones globales de la rotación de grupos estelares jóvenes (Jackson and Jeffries 2010; Corsaro et al. 2017; Kovacs 2018). Realizaremos un estudio comparativo de la distribución acumulada de $v \sin i$ observados con realizaciones de distribuciones $v \sin i$ sintéticas generadas asumiendo un escenario completamente aleatorio y otros escenarios con diversos niveles de alineación del polo de rotación. Resultados preliminares sugieren que los rotadores en el complejo de formación estelar de Orión se encuentran moderadamente alineados (Tesis de Maestría). Se espera aumentar el número de estrellas con medidas de $v \sin i$ para poder realizar un estudio estadísticamente robusto en los diferentes grupos separados que conforman en complejo de Orión e incluir otras regiones observadas con TESS y APOGEE (e.g. Per OB, Upp. Sco, Pleiades). También se incorporará al estudio de alineación en la línea de visión, la alineación espacial 3D incluyendo técnicas de Monte Carlo para explorar el efecto de la distribución de inclinaciones rotacionales en el plano tangencial (perpendicular a $v \sin i$). Con este estudio se espera contribuir en una mejor comprensión de la transferencia de momento angular desde las nubes moleculares a escalas estelares. Planeamos que este trabajo haga parte de la primera publicación de doctorado.

Finalmente, el $v \sin i$ estimado en este objetivo puede ser usado como una primera estimación al estudiar inclinación de discos protoplanetarios (Thanathibodee et al. 2020). Además, nos permitirá determinar la medida en la que afecta el fenómeno de inflación del radio en estrellas de baja masa y corregir este efecto (Jackson et al. 2016; Somers and Pinsonneault 2016).

La amplitud de una curva de luz es un trazador de la cobertura de manchas estelares cuando la variabilidad es asociada a rotación estelar. Usando la formulación de (Eker 1994) estimaremos la modulación de la curva de luz generada por la presencia de manchas y estimaremos la cobertura integrada de manchas sobre la superficie estelar. Este parámetro será usado como un estimador de la corrección de la luminosidad y la temperatura de una estrella por presencia de manchas y su relación al fenómeno de inflación del radio. Además examinaremos la importancia del fenómeno de la inflación del radio en el contexto de las manchas estelares y el estudio de evolución del momento angular en estrellas jóvenes.

3. Conexión entre la rotación y discos protoplanetarios.

Las estrellas CTTS generalmente rotan a velocidades limitadas ($< \sim 30$ km/s), mientras que las estrellas WTTS pueden alcanzar velocidades superiores a los 100 km/s (Tesis de Maestría de Javier Serna). Esto sugiere que el disco de acreción de las estrellas CTTS pueden estar frenando la rotación estelar. Para comprobar este escenario nos planteamos obtener parámetros relacionados a la parte interna del disco para una muestra de estrellas CTTS usando los modelos de discos protoplanetarios irradiados (D'Alessio et al. 1998, 1999, 2001). Para disminuir las variables libres en estos modelos, asumiremos una tasa de acreción inferida a partir de la línea de $H\alpha$ (Hernández et al. 2014; Briceño et al. 2019; Hernández et al. in prep.) y una inclinación estelar similar a $v \sin i$ como aproximación a la inclinación del disco protoplanetario (ver objetivo 2).

Se planea estimar el grado de asentamiento del disco (parámetro epsilon), viscosidad (parámetro alfa), tamaño del grano de polvo, radio de corrotación, altura y radio de la pared interna del disco

(radio de truncamiento del disco) y evaluar estos parámetros en el contexto de los observables de rotación estelar. Se espera obtener tendencias estadísticamente robustas para comprobar la conexión entre la rotación y el disco en acreción en estrellas CTTS. Planeamos que este trabajo haga parte de la segunda publicación de doctorado.

Apéndice

Clasificación morfológica de curvas de luz mediante aprendizaje de máquinas.

Basados en el catálogo de curvas de luz obtenidos en el objetivo específico 1, realizaremos una clasificación morfológica automatizada de las curvas de luz de TESS para diferentes regiones estelares jóvenes a través de un entrenamiento de maquina. Para esto, contamos con la colaboración del Dr. Jose Alejandro Varela (Universidad de los Andes, Colombia), quien nos ayudará en este tema. El objetivo principal será realizar una muestra de control de curvas de luz, las cuales estarán separadas en las diferentes clases morfológicas de interés (e.g. periódicas, aleatorias, eclipsantes, moduladas, amplitud creciente, variaciones profundas o “dippers”). Estas curvas de luz serán usadas como muestra de entrenamiento de los algoritmos de aprendizaje de máquinas. Además de las variables de clasificación de Pérez-Ortiz et al. (2017), se plantea añadir otros observables que pueden separar de forma más eficiente las clases morfológicas de interés. Especialmente estamos interesados en identificar y excluir del estudio aquellas estrellas cuya variabilidad sea ajena a la producida por manchas estelares (e.g. Binarias eclipsantes, pulsantes, transitos planetarios, etc), que puedan producir confusiones en la estimación de periodos de rotación. De acuerdo a Cody and Hillenbrand (2010), estrellas con variabilidad tipo dippers son muy probable de encontrarse en regiones jóvenes, se esperan que aquellas con amplitudes de variación significativa estén relacionadas con apantallamientos generados por un disco protoplanetario sobre el flujo estelar (Hedges et al 2018). Este tipo morfológico también son de particular interés en nuestro estudio, ya que son un indicador muy probable a que estas curvas de luz se relacionen con estrellas CTTS.

Estudios de evolución del momento angular.

A partir de la edad, masa estelar, los observables de rotación estelar y la presencia de discos protoplanetarios obtenidos en el objetivo 1, y como una posible extensión del trabajo de maestría de Javier Serna realizado en la región Orión, exploraremos la evolución del momento angular para diferentes rangos de masa y diferentes ambientes estelares e.g (Upper Sco, Gamma Vel, IC348, Pleiades, entre otros), tomando en cuenta el posible escenario de frenado de rotación por el disco protoplanetario. Además se busca comparar las tendencias evolutivas con modelos disponibles en la literatura (Gallet and Bouvier 2015). Como parte de este esfuerzo, y bajo la colaboración del Dr. Giovanni Pinzón (Universidad Nacional de Colombia), planeamos explorar el diseño de nuevos modelos que tomen en cuenta el frenado magnético del disco, la pérdida de momento angular por vientos y la evolución del radio estelar en estrellas pre-secuencia principal.

En este objetivo, se espera reforzar e interpretar las tendencias evolutivas observadas de vsini con la edad para estrellas tanto CTTS como WTTS (Tesis de Maestría de Javier Serna), como también, se buscarán tendencias evolutivas con el periodo de rotación estelar, aunque debido a los diversos mecanismos de variabilidad en estrellas CTTS (apantallamiento, tasas de acreción variable) la

obtención de periodos de rotación en estos objetos es de mayor complejidad y las tendencias evolutivas serán más inciertas.

Cronograma

Objetivos/Semestre	1	2	3	4	5	6	7	8
Estimar Parámetros Estelares y Determinar la Rotación para Estudios a Gran Escala en Regiones de Formación Estelar	X	X	X	X				
Alineación de Polos de Rotación en Grupos Estelares Jóvenes.		X	X	X				
Finalizar primer Artículo de Doctorado					X			
Conexión Rotación Estelar y Discos Protoplanetarios				X	X	X	X	
Finalizar Segundo Artículo de Doctorado							X	
Escritura de la Tesis								X

Bibliografía

Affer L, Micela G, Favata F, et al (2013) Rotation in NGC 2264: a study based on CoRoT★ photometric observations. *Mon Not R Astron Soc* 430:1433–1446. doi: 10.1093/mnras/stt003

Barnes SA (2007) Ages for Illustrative Field Stars Using Gyrochronology: Viability, Limitations, and Errors. *Astrophys J* 669:1167–1189. doi: 10.1086/519295

Berdugina S V. (2005) Starspots: A Key to the Stellar Dynamo. *Living Rev Sol Phys* 2:8. doi: 10.12942/lrsp-2005-8

Biazzo K, Melo, C. H. F., Pasquini, L., et al (2009) Evidence of early disk-locking among low-mass members of the Orion Nebula Cluster ***. *A&A* 508:1301–1312. doi: 10.1051/0004-6361/200913125

Bouvier J (2013) Observational studies of stellar rotation. doi: 10.1051/eas/1362005

- Bouvier J, Barrado, D., Moraux, E., et al (2018) The lithium-rotation connection in the 125 Myr-old Pleiades cluster. *A&A* 613:A63. doi: 10.1051/0004-6361/201731881
- Bouvier J, Lanzafame AC, Venuti L, et al (2016) The Gaia-ESO Survey: A lithium-rotation connection at 5 Myr? *Astron Astrophys* 590:A78. doi: 10.1051/0004-6361/201628336
- Briceño C, Calvet N, Hernández J, et al (2019) The CIDA Variability Survey of Orion OB1. II. Demographics of the Young, Low-mass Stellar Populations. *Astron J* 157:85. doi: 10.3847/1538-3881/aaf79b
- Carroll JA, A. J (1933) The Spectroscopic Determination of Stellar Rotation and its Effect on Line Profiles. *Mon Not R Astron Soc* 93:478–507. doi: 10.1093/mnras/93.7.478
- Cody AM, Hillenbrand LA (2010) PRECISION PHOTOMETRIC MONITORING OF VERY LOW MASS σ ORIONIS CLUSTER MEMBERS: VARIABILITY AND ROTATION AT A FEW Myr. *Astrophys J Suppl Ser* 191:389–422. doi: 10.1088/0067-0049/191/2/389
- Corsaro E, Lee YN, Garcíá RA, et al (2017) Spin alignment of stars in old open clusters. *Nat Astron* 1:1–6. doi: 10.1038/s41550-017-0064
- Covey KR, Greene TP, Doppmann GW, Lada CJ (2005) The Angular Momentum Content and Evolution of Class I and Flat-Spectrum Protostars. *Astron J* 129:2765–2776. doi: 10.1086/429736
- D’Alessio P, Calvet N, Hartmann L, et al (1999) Accretion Disks around Young Objects. II. Tests of Well mixed Models with ISM Dust. *Astrophys J* 527:893–909. doi: 10.1086/308103
- D’Alessio P, Calvet N, Hartmann L (2001) Accretion Disks around Young Objects. {III}. Grain Growth. *Astrophys J* 553:321–334. doi: 10.1086/320655
- D’Alessio P, Canto J, Calvet N, Lizano S (1998) Accretion Disks around Young Objects. I. The Detailed Vertical Structure. *Astrophys J* 500:411–427. doi: 10.1086/305702
- Davenport JRA (2017) ROTATING STARS FROM *KEPLER* OBSERVED WITH *GAIA* DR1. *Astrophys J* 835:16. doi: 10.3847/1538-4357/835/1/16
- Davenport JRA, Covey KR (2018) Rotating Stars from Kepler Observed with Gaia DR2. *Astrophys J* 868:151. doi: 10.3847/1538-4357/835/1/16
- Davies CL, Gregory SG, Greaves JS (2014) Accretion discs as regulators of stellar angular momentum evolution in the ONC and Taurus–Auriga. *Mon Not R Astron Soc* 444:1157–1176. doi: 10.1093/mnras/stu1488
- Díaz CG, González JF, Levato H, Grosso M (2010) Accurate stellar rotational velocities using the Fourier transform of the cross correlation maximum. doi: 10.1051/0004-6361/201016386
- Eker Z (1994) Modeling light curves of spotted stars. *Astrophys J* 420:373. doi: 10.1086/173567
- Gallet F, Bouvier J (2015) Improved angular momentum evolution model for solar-like stars. *Astron Astrophys* 577:A98. doi: 10.1051/0004-6361/201525660
- García Pérez AE, Prieto CA, Holtzman JA, et al (2016) ASPCAP: THE APOGEE STELLAR PARAMETER AND CHEMICAL ABUNDANCES PIPELINE. *Astron J* 151:144. doi: 10.3847/0004-6256/151/6/144
- Hartmann L (2002) On Disk Braking of T Tauri Rotation. *Astrophys J* 566:L29–L32. doi: 10.1086/339455
- Herbst W, Bailer-Jones CAL, Mundt R, et al (2002) Stellar rotation and variability in the Orion Nebula Cluster. *Astron Astrophys* 396:513–532. doi: 10.1051/0004-6361:20021362
- Hernandez J, Briceño C, Calvet N, et al (2017) SPTCLASS: SPecTral CLASSificator code. ascl ascl:1705.005
- Hernández J, Calvet N, Perez A, et al (2014) A SPECTROSCOPIC CENSUS IN YOUNG STELLAR REGIONS: THE σ ORIONIS CLUSTER. *Astrophys J* 794:36. doi: 10.1088/0004-637X/794/1/36
- Husser T-O, Wende-von Berg S, Dreizler S, et al (2013) A new extensive library of PHOENIX stellar atmospheres and synthetic spectra. *Astron Astrophys* 553:A6. doi: 10.1051/0004-6361/201219058
- J. Serna et al in prep (2020) Stellar Rotation in the Orion Star Forming Complex
- Jackson RJ, Jeffries RD (2010) Are the spin axes of stars randomly aligned within a cluster? *Mon Not R Astron Soc* 402:1380–1390. doi: 10.1111/j.1365-2966.2009.15983.x
- Jackson RJ, Jeffries RD, Randich S, et al (2016) The *Gaia* -ESO Survey: Stellar radii in the young open clusters NGC 2264, NGC 2547, and NGC 2516. *Astron Astrophys* 586:A52. doi: 10.1051/0004-6361/201527507

- Jayasinghe T, Stanek KZ, Kochanek CS, et al (2019) The ASAS-SN Catalog of Variable Stars V: Variables in the Southern Hemisphere. doi: 10.1093/mnras/stz2711
- Jeffries RD (2014) Using Rotation, Magnetic Activity and Lithium to Estimate the Ages of Low Mass Stars. *EAS Publ Ser* 65:289–325. doi: 10.1051/eas/1465008
- Karim MT, Stassun KG, Briceño C, et al (2016) THE ROTATION PERIOD DISTRIBUTIONS OF 4–10 Myr T TAURI STARS IN ORION OB1: NEW CONSTRAINTS ON PRE-MAIN-SEQUENCE ANGULAR MOMENTUM EVOLUTION. *Astron J* 152:198. doi: 10.3847/0004-6256/152/6/198
- Kounkel M, Covey K, Moe M, et al (2019) Close Companions around Young Stars. *Astron J* 157:196. doi: 10.3847/1538-3881/ab13b1
- Kovacs G (2018) Signature of non-isotropic distribution of stellar rotation inclination angles in the Praesepe cluster. *A&A* 612:L2. doi: 10.1051/0004-6361/201731355
- Le Blanc TS, Covey KR, Stassun KG (2011) SPECTRAL ENERGY DISTRIBUTIONS OF YOUNG STARS IN IC 348: THE ROLE OF DISKS IN ANGULAR MOMENTUM EVOLUTION OF YOUNG, LOW-MASS STARS. *Astron J* 142:55. doi: 10.1088/0004-6256/142/2/55
- Long M, Romanova MM, Lovelace RVE (2005) Locking of the Rotation of Disk Accreting Magnetized Stars. *Astrophys J* 634:1214–1222. doi: 10.1086/497000
- Matt S, Pudritz RE (2005) Accretion-powered Stellar Winds as a Solution to the Stellar Angular Momentum Problem. *Astrophys J* 632:L135–L138. doi: 10.1086/498066
- Meibom S, Barnes SA, Latham DW, et al (2011) THE KEPLER CLUSTER STUDY: STELLAR ROTATION IN NGC 6811. *Astrophys J* 733:L9. doi: 10.1088/2041-8205/733/1/L9
- Noyes R ~W., Hartmann L ~W., Baliunas S ~L., et al (1984) Rotation, convection, and magnetic activity in lower main-sequence stars. *\apj* 279:763–777. doi: 10.1086/161945
- Palla F, Stahler SW (1992) The evolution of intermediate-mass protostars. II - Influence of the accretion flow. *Astrophys J* 392:667. doi: 10.1086/171468
- Pérez-Ortiz MF, García-Varela A, Quiroz AJ, et al (2017) Machine learning techniques to select Be star candidates. *Astron Astrophys* 605:A123. doi: 10.1051/0004-6361/201628937
- Privitera G, Meynet G, Eggenberger P, et al (2016) Star-planet interactions. I. Stellar rotation and planetary orbits. *\aap* 591:A45. doi: 10.1051/0004-6361/201528044
- Rebull LM (2001) Rotation of Young Low-Mass Stars in the Orion Nebula Cluster Flanking Fields. *Astron J* 121:1676–1709. doi: 10.1086/319393
- Rebull LM, Stauffer JR, Megeath ST, et al (2006) A Correlation between Pre–Main Sequence Stellar Rotation Rates and IRAC Excesses in Orion. *Astrophys J* 646:297–303. doi: 10.1086/504865
- Ricker GR, Winn JN, Vanderspek R, et al (2014) Transiting Exoplanet Survey Satellite. *J Astron Telesc Instruments, Syst* 1:014003. doi: 10.1117/1.jatis.1.1.014003
- Sicilia-Aguilar A, Hartmann LW, Szentgyorgyi AH, et al (2005) Accretion, Kinematics, and Rotation in the Orion Nebula Cluster: Initial Results from Hectochelle. *Astron J* 129:363–381. doi: 10.1086/426327
- Soderblom D ~R., Duncan D ~K., Johnson D ~R. ~H. (1991) The chromospheric emission-age relation for stars of the lower main sequence and its implications for the star formation rate. *\apj* 375:722–739. doi: 10.1086/170238
- Somers G, Pinsonneault MH (2014) A TALE OF TWO ANOMALIES: DEPLETION, DISPERSION, AND THE CONNECTION BETWEEN THE STELLAR LITHIUM SPREAD AND INFLATED RADII ON THE PRE-MAIN SEQUENCE. *Astrophys J* 790:72. doi: 10.1088/0004-637X/790/1/72
- Somers G, Pinsonneault MH (2016) LITHIUM DEPLETION IS A STRONG TEST OF CORE-ENVELOPE RECOUPLING. *Astrophys J* 829:32. doi: 10.3847/0004-637X/829/1/32
- Somers G, Pinsonneault MH (2015) Older and Colder: The impact of starspots on pre-main sequence stellar evolution. *Astrophys Journal*, Vol 807, Issue 2, Artic id 174, 15 pp (2015) 807:. doi: 10.1088/0004-637X/807/2/174
- Somers G, Stassun KG (2017) A Measurement of Radius Inflation in the Pleiades and Its Relation to Rotation and Lithium Depletion. *Astron J* 153:101. doi: 10.3847/1538-3881/153/3/101

- Stassun KG, Mathieu RD, Mazeh T, Vrba FJ (1999) The Rotation Period Distribution of Pre–Main-Sequence Stars in and around the Orion Nebula. *Astron J* 117:2941–2979. doi: 10.1086/300881
- Stauffer J, Rebull LM, Cody AM, et al (2018) The Rotational Evolution of Young, Binary M Dwarfs. *Astron J* 156:275. doi: 10.3847/1538-3881/aae9ec
- Thanathibodee T, Molina B, Calvet N, et al (2020) Variable Accretion onto Protoplanet Host Star PDS 70. *Astrophys J* 892:81. doi: 10.3847/1538-4357/ab77c1
- Udalski A, Szymanski M, Kubiak M, et al (2002) The Optical Gravitational Lensing Experiment. BVI Maps of Dense Stellar Regions. III. The Galactic Bulge
- VanderPlas JT (2017) Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. doi: 10.3847/1538-4365/aab766
- Venuti L, Bouvier J, Cody AM, et al (2017) CSI 2264: Investigating rotation and its connection with disk accretion in the young open cluster NGC 2264. *Astron Astrophys* 599:A23. doi: 10.1051/0004-6361/201629537
- Vidotto AA, Gregory SG, Jardine M, et al (2014) Stellar magnetism: empirical trends with age and rotation. *Mon Not R Astron Soc* 441:2361–2374. doi: 10.1093/mnras/stu728
- Watson AM, Lee WH, Troja E, et al (2016) DDOTI: the deca-degree optical transient imager. doi: 10.1117/12.2232898