

## Identificación de objetos estelares jóvenes Clase II en regiones de formación estelar usando IRAC/SPITZER

TÉCNICAS OBSERVACIONALES

MAESTRÍA EN CIENCIAS - ASTRONOMÍA

TALLER 3

Lectura recomendada: Hartmann L., Herczeg G. & Calvet N., Accretion onto Pre-Main Sequence stars, ARAA, 2016, 54

### Resumen

En esta actividad los estudiantes utilizan imágenes de cinco regiones de formación estelar con edades distintas y obtenidas con la cámara IRAC en el telescopio espacial SPITZER, con el fin de identificar la proporción de objetos Clase II en cada región. Esta información se cruza con características típicas de juventud tales como: presencia de Li y emisión en rayos X y Ha con el fin de construir un catálogo confiable de estrellas PMS

### Objetivo

Aplicar los conceptos de fotometría y el código *phot.py* con el fin de obtener las magnitudes en los filtros [3.6], [4.5], [5.8] y [8.0] μm. Posteriormente cruzar con información relevante sobre características típicas de juventud con el objetivo de obtener un catálogo confiable de estrellas jóvenes candidatas a albergar exoplanetas.

### Objetivos de aprendizaje

- Afianzar los conceptos de magnitud aparente, magnitud absoluta y diagrama color-magnitud.
- Demostrar la potencialidad del trabajo en equipo mediante la elaboración de un reporte global con aportes de todos los estudiantes del curso.
- Demostrar la importancia de aplicar las técnicas fotométricas a imágenes de archivo con el fin de evitar pedir tiempo de telescopio innecesario.

### 1.- Introducción

Las estrellas T Tauri son estrellas jóvenes de baja masa <1.5 M<sub>sun</sub>, las cuales se encuentran en su etapa de contracción hacia la secuencia principal y están rodeadas por un disco de gas y polvo. Presentan líneas de emisión prominentes en la serie de Balmer principalmente. Estas estrellas además exhiben excesos de emisión en el infrarrojo medio y lejano en comparación a estrellas más

evolucionadas sin disco, lo cual se explica que la emisión infraroja está asociada a presencia de disco. Además presentan exceso de emisión el UV (alrededor de 400 nm) producto del impacto o choque de las columnas de acreción que conectan la estrella al disco de acreción. Finalmente, estas estrellas tienen cromósferas activas como el Sol pero mucho más potentes con luminosidades en rayos X arriba alrededor de  $10^{30}$  erg/s.

Todas estas características observacionales, han conducido durante las últimas décadas a la construcción del paradigma llamado "acreción magnetosférica" el cual se indica en la Figura 1 de Hartmann et al. 2016 (Annu Rev Astron Astrophys 2016, 54). La emisión en la serie de Balmer en este modelo proviene del gas (Hidrógeno) que se acreta a través de las columnas de acreción, el cual cae balísticamente a velocidades cercanas a 300 km, lo que causa ensanchamiento pero además emisión pues ocurre en un medio ópticamente delgado distinto a una atmósfera estelar.

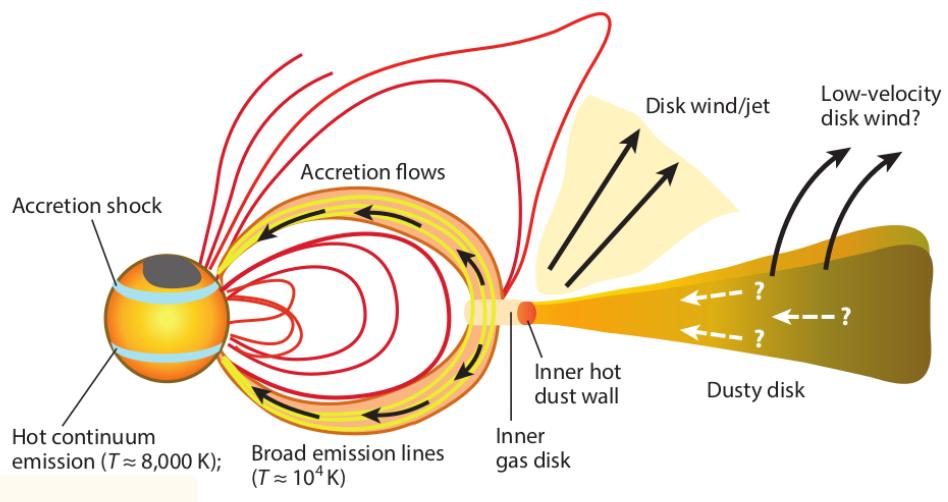


Figura 1. Acreción magnetosférica en una estrella joven que acreta o absorbe gas del disco circunestelar a través de su magnetósfera. El campo magnético de la estrella trunca el disco a cierta distancia y frena la pared interna del disco a la velocidad de la estrella. Desde allí el gas de éste cae balísticamente y se canaliza a través de las columnas de acreción y el impacto sobre la superficie estelar produce un continuo que se asocia con el exceso de UV observado. En este escenario también ocurren eventos de pérdida de masa del sistema a través de vientos que se originan en el disco y en la estrella.

### 1.1.- El litio como indicador de juventud

El litio es un elemento primordial producido poco después del big bang, y por lo tanto presente en las nubes de donde nacen las estrellas. Sin embargo a temperaturas de  $2.5 \times 10^6$  K que se logran fácil en el interior de una estrella joven, el litio entra en una reacción en cadena para producir  $\text{He}^4$  y energía y se destruye ( ${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$ ). Osea, el Litio sobrevive muy poco en las atmósferas de las estrellas de baja masa por lo que es un indicador de

juventud. El Li se absorbe en la atmósfera estelar en una transición electrónica en 6708A (Figura 2) pero su presencia depende fuertemente del tipo espectral, osea de la temperatura efectiva (en la superficie) de la estrella como se indica en la Figura 3.

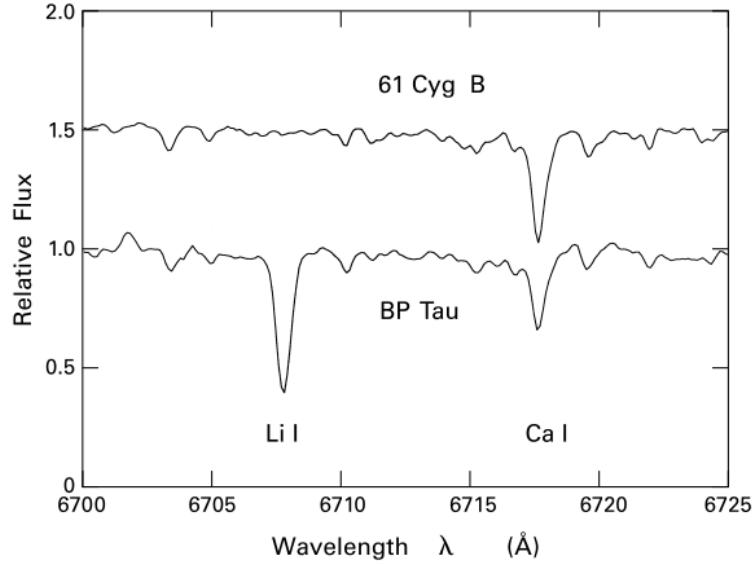


Figura 2. Absorción de litio en BP Tau, una estrella PMS (pre-main sequence star) en comparación a otra de tipos espectral similar pero en la escuencia principal (61 Cy B). Solo la joven tiene 6708A en abosción.

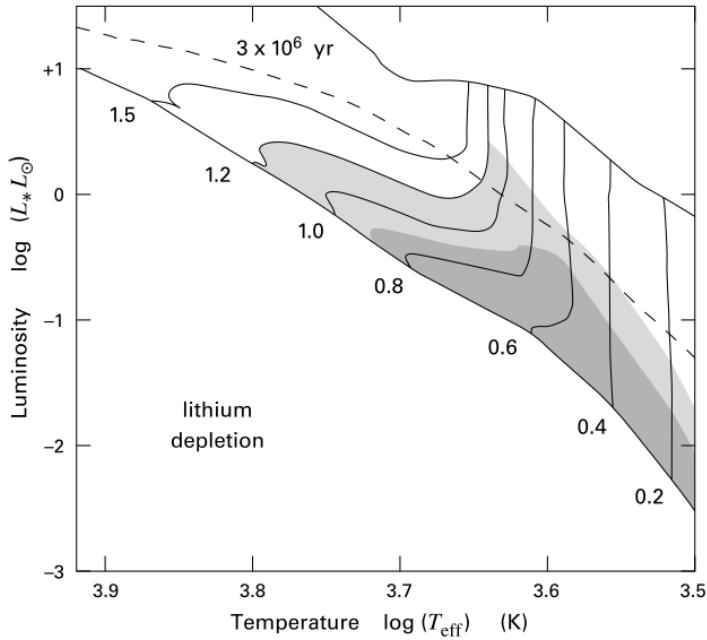


Figura 3. Evolución teórica del agotamiento de Li en los interiores estelares. Dentro del área comprendida entre "birthline" y la ZAMS. La región gris clara contiene objetos que han agotado

el Litio primordial en 10% mientras que la región gris oscura indica agotamiento de más del 10%.

### 1.2.- Excesos en infrarojo

La utilidad de la radiación infrarroja para penetrar las grandes nubes moleculares de polvo en donde nacen las estrellas es evidente de la curva de extinción en la Figura 4. Un fotón en 2.2 micrones tiene una extinción 0.1 veces menor en comparación a un fotón en el visible en 0.55 micrones. La extinción interestelar decrece con el aumento de la longitud de onda.

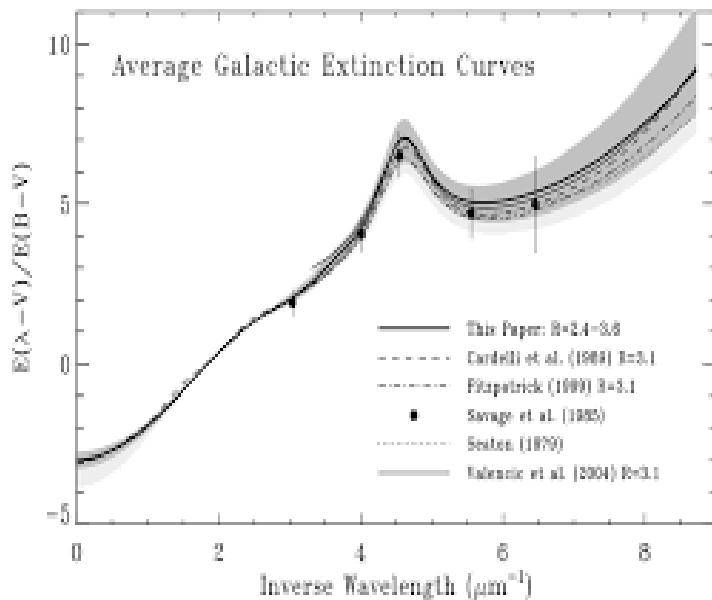


Figura 4. Curva de extinción interestelar como función de la longitud de onda.

La cámara IRAC (Infrared Array Camera) del telescopio espacial SPITZER es uno de los principales instrumentos de SPITZER. Consiste en una cámara con 4 canales los cuales proporcionan imágenes simultáneas en 3.6, 4.5, 5.8 y  $8\mu\text{m}$ . IRAC observa simultáneamente dos campos separados  $6.5'$ . Un campo se obtiene en 3.6 y  $5.8\mu\text{m}$  en tanto que el otro se obtiene en 4.5 y  $8.0\mu\text{m}$ .

La base de datos de las imágenes obtenidas con esta cámara proporciona información en diferentes estadios de procesamiento. Basic Calibrated Data o BCD consiste en imágenes calibradas. Datos "Post BCD level 2" consisten en mosaicos obtenidos a través del agrupamiento de imágenes individuales.

Para descargar las imágenes utilice este enlace:

<https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>

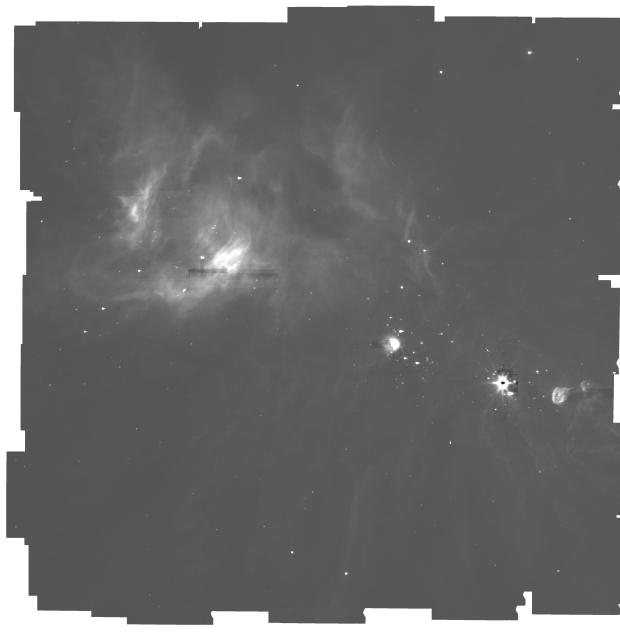


Figura 5. Mosaico (Post BCD level 2) de la región de formación estelar NGC 2264 en la banda de 8.0 mm.

Existe una clasificación dependiendo de la emisión infraroja. Se define  $\alpha = \text{dlog}(\lambda F_\lambda) / \text{dlog}\lambda$  en donde  $F_\lambda$  es el flujo y  $\lambda$  la longitud de onda que va entre 2.2 y 10 microns por definición. Si  $\alpha > 0$  se dice que la estrella es Clase I, Si  $-1.5 < \alpha < 0$  es de Clase II y si  $\alpha < -1.5$  es clase III.

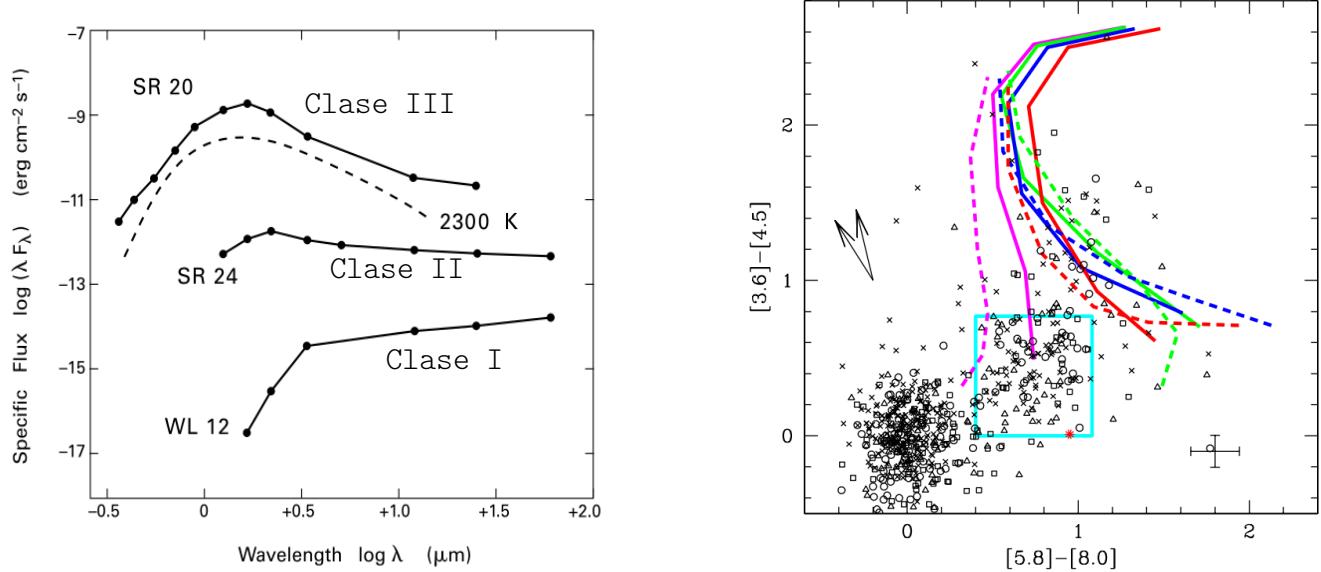


Figura 6. (izq) SED para tres estrellas en la región de rho-ophiucus. 2300K indica el la emisión de cuerpo negro. (der) Diagrama color color IRAC. **El cuadrado delinea la región de estrellas Clase II** mientras que las líneas de colores indican modelos de estrellas Clase I osea objetos con discos muy prominentes y por tanto con bastante emisión en 2.2 microns.

### 1.3.- Luminosidades en rayos X

Existe una tendencia general a creer que es la estrella central y no el disco, la responsable de la emisión de rayos X observada en las estrellas antes de la secuencia principal. Al igual que en el Sol, los rayos X se supone se producen en las regiones activas en las cromósferas. En estas regiones, eventos de reconexión magnética producen una gran cantidad de rayos X. Sin embargo con el tiempo el nivel de rayos X, osea el nivel de actividad, decae como se ve en la Figura 7 que corresponde a un estudio de objetos PMS (izq) y objetos MS. Estas luminosidades se obtienen en una ventana en KeVs dependiendo del instrumento y a partir de las cuentas instrumentales que se encuentran en la base de datos de los observatorios como CHANDRA o ROSAT. Se usan esas cuentas instrumentales con constantes en el manual para determinar el flujo de rayos x y luego la luminosidad.

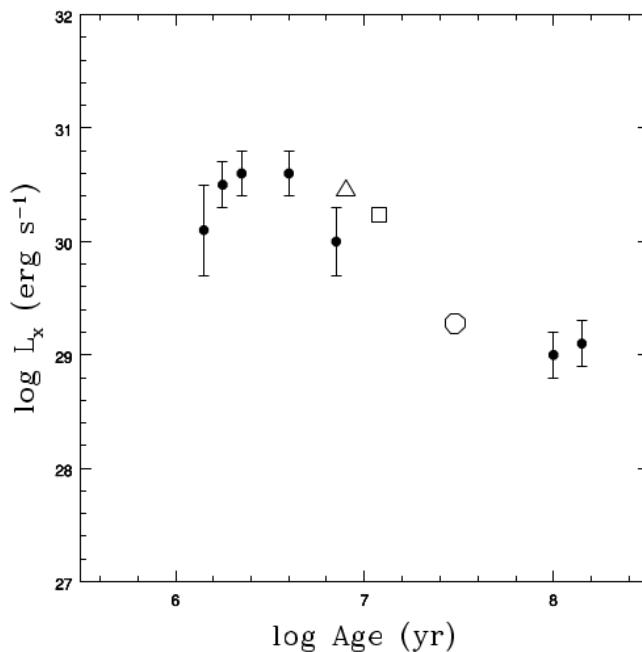


Figura 7. Luminosidad en rayos X Rosat para objetos jóvenes (<10Ma) y evolucionados como las pleiades (120 Ma) y las Hyades (600Ma). Note como la actividad decae de la PMS a la MS  
(Fuente: Delareza & Pinzón 2004)

### Descripción

#### Paso 1 : Seleccionar la región de formación estelar de interés

Dos estudiantes han seleccionado una región de formación estelar entre las siguientes: **NGC2264, IC348, Lambda Orionis, rho Ophiucus y 30 doradus.**

**Todas estas regiones son muy jóvenes con edades <5Ma.**

**NGC2264** ó cúmulo del árbol navideño es una región de formación estelar en Monoceros, que contiene miles de estrellas con edad similar y con movimientos propios y velocidades radiales también parecidas. La edad media de este cúmulo es 3 Myr +- 5Myr (Dahm et al. 2008) y se encuentra a 760 pc (Park et al. 2000). En su interior ocurre formación estelar activa muy bien caracterizada. En particular el reciente estudio de Flaccomio et al. 2023 (A&A, 670, A37) sugiere que la formación estelar inició primero alrededor de la estrella masiva S Mon (Tipo espectral O) hace 4 Ma y se extendió progresivamente hacia el sur hacia la Nebulosa del Cono cuya población estelar es más joven. Esto debido en parte a que la fracción de estrellas con disco es baja alrededor de S Mon y se incrementa hacia el Sur.



Figura 8. Imagen en el visible obtenida con el tel 0.9m Kitt Peak y un arreglo de cámaras CCDs. Abajo la nebulosa "del cono" y arriba a la derecha la nebulosa "piel de zorro".

**IC348** es una región de formación estelar en Perseo, localizada a 315 pc de distancia en la nube molecular de Perseo. Contiene estrellas ópticamente visibles y un sinnúmero de estrellas aún embedidas en la nube que no se ven sino en infrarrojo con extinción Av del orden de 5mag. Stelzer et al.(2012) realizan un completo estudio de este cúmulo utilizando rayos X del telescopio espacial CHANDRA. Los autores detectan cerca de 290 fuentes de rayos X en esta región de formación estelar.

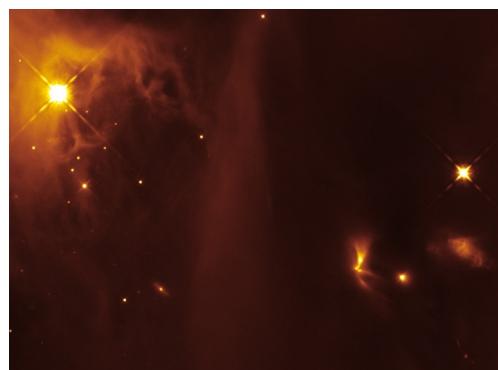


Figura 9. Imagen de IC348 en el visible obtenida con el tel espacial Hubble. Cerca de la mitad de las estrellas en esta región posee discos con acreción activa.

**Rho-Ophiucus** es una región de formación estelar en Ophiucus, a unos 400 años luz de la tierra. Contiene nubes de gas y polvo donde nuevas estrellas están naciendo. Debido a su cercanía (130 pc) esta región es un excelente laboratorio para estudios de exoplanetas y la física de la formación estelar. Morfológicamente, el complejo Rho Ophiuchi aparece dividido en dos nubes principales, que llevan las denominaciones LDN 1688, que forma el núcleo principal, y LDN 1689, de menor masa. A las dos nubes también están conectados varios filamentos nebulosos oscuros.



Figura 10. Imagen de la región de formación estelar rho-ophiucus en el óptico producto de una combinación de imágenes en varios filtros fotométricos, incluído Ha (color naranja).

**30 Doradus** es una región de formación estelar en la gran nube de Magallanes. Tiene 1kpc de diámetro y contiene cerca de 100 estrellas O y también estrellas de baja masa. Imágenes en Ha muestran presencia de celdas bordeando algunos objetos que a su vez emiten rayos X. Esta región está muy contaminada por eventos de supernova.

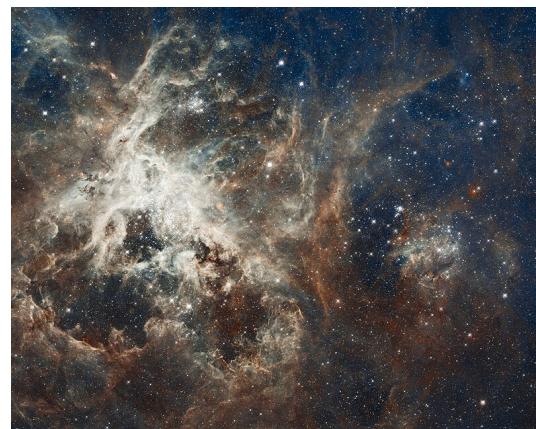


Figura 11. 30 Doradus, región de formación estelar en la LMC

**LDN1588** es una región de formación estelar en el complejo molecular de Orión, que se encuentra sobre el anillo de polvo centrado en la estrella lambda orionis. Previos estudios han sugerido que este anillo es consecuencia de una SN que explotó hace 1Ma, solo que no se encuentra el objeto compacto en el centro que debería estar. (Kounkel 2020).

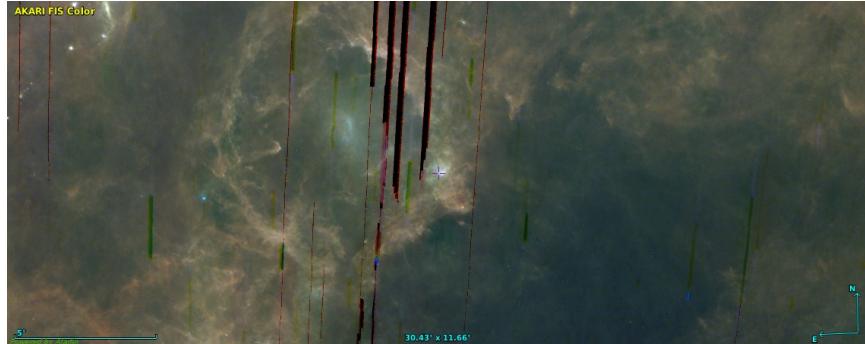


Figura 12. Anillo de polvo alrededor de la estrella Lambda Orionis. LDN1588 se encuentra justo sobre el anillo que parece es producto de una explosión de SN hace 1Ma.

### Paso 2 : Realizar la fotometría de las imágenes IRAC

Para cada canal de la cámara IRAC, realizar la fotometría utilizando el programa **phot.py**

\*\*configure las librerías photutils y astropy como se indica en el código  
Una vez obtenida la fotometría en un filtro IRAC determinado, se genera un archivo con extensión .csv para cada filtro o canal (3.6, 4.5, 5.8 y 8.0 micrones) con la siguiente estructura.

```
OBJECT_ID,RA,DEC,1_mag_0,1_mag_err_0,DATE-OBS_1_mag_0
3326686748983465344,100.2833949118478,9.5112004286488,16.07882,0.034644319,2008-
11-01T22:34:49.428
3326689635200018176,100.24084292365,9.51375177803,15.24327,0.022960374,2008-11-0
1T22:34:49.428
3326689630905613952,100.2364882916978,9.5042241004864,14.57016,0.016656275,2008-
11-01T22:34:49.428
3326689630905623424,100.2406996611728,9.5139966866811,15.237805,0.022899944,2008
-11-01T22:34:49.428
3326689635200025984,100.23678743744,9.50400035724,14.569041,0.016647466,2008-11-
01T22:34:49.428
3326689738280706432,100.2451452716938,9.5157705269727,13.701968,0.011087146,2008
-11-01T22:34:49.428
```

### Paso 3 : Construcción de un diagrama color-color

Construir un diagrama como el panel derecho de la Figura 6 de esta guía, resaltando y cuantificando las estrellas de Clase II. Para esto recuerde corregir por extinción a pesar que trabajamos en infrarojo y ésta es menor.

Para esto use la ley de extinción interestelar que se indica en la Tabla y utilice  $Av=3.1xE(B-V)$  en donde Av es la extinción en el visual y E(B-V) es el exceso de color B-V.

INTERSTELLAR EXTINCTION LAW

$\lambda$	$E(\lambda - V)/E(B - V)$	$A_\lambda/A_V$
<i>U</i> .....	1.64 <sup>a</sup>	1.531
<i>B</i> .....	1.00 <sup>b</sup>	1.324
<i>V</i> .....	0.0 <sup>b</sup>	1.000
<i>R</i> .....	-0.78 <sup>b</sup>	0.748
<i>I</i> .....	-1.60 <sup>b</sup>	0.482
<i>J</i> .....	-2.22 $\pm$ 0.02	0.282
<i>H</i> .....	-2.55 $\pm$ 0.03	0.175
<i>K</i> .....	-2.744 $\pm$ 0.024	0.112
<i>L</i> .....	-2.91 $\pm$ 0.03	0.058
<i>M</i> .....	-3.02 $\pm$ 0.03	0.023
<i>N</i> .....	-2.93	0.052
8.0 $\mu\text{m}$ .....	-3.03	0.020 $\pm$ 0.003
8.5 .....	-2.96	0.043 $\pm$ 0.006
9.0 .....	-2.87	0.074 $\pm$ 0.011
9.5 .....	-2.83	0.087 $\pm$ 0.013
10.0 .....	-2.86	0.083 $\pm$ 0.012
10.5 .....	-2.87	0.074 $\pm$ 0.011
11.0 .....	-2.91	0.060 $\pm$ 0.009
11.5 .....	-2.95	0.047 $\pm$ 0.007
12.0 .....	-2.98	0.037 $\pm$ 0.006
12.5 .....	-3.00	0.030 $\pm$ 0.005
13.0 .....	-3.01	0.027 $\pm$ 0.004

Tabla 1. Ley de extinción interestelar

**Paso 4 : Cruce de los objetos de Clases II con datos de rayos X / Litio / Ha**  
A partir de la información de los objetos Clase II detectados en el Paso 3, , busque para la región de formación estelar de interés, en la literatura información sobre rayos X / Litio / emisión en Ha. (anchos equivalentes o luminosidades son buenos indicadores). Verifique posibles correlaciones a través de gráficos Luminosidad vs [5.0-8.0] y luminosidad vs [3.6-4.5].

**Paso 5 : Elaboración del catálogo de objetos clase II en la región de formación estelar de interés**

Este catálogo tiene la siguiente estructura:

ID RA DEC MAG3.6 MAG4.5 MAG5.8 MAG8.0 Lx(Lo) EWLi(A) EWHa(A)

**Paso 6 : Escriba un reporte sobre todo lo que hizo con la región que seleccionó. De este reporte, es soporte del artículo colectivo.** Muy cuantitativo, soportando sus afirmaciones con argumentos y contrastando con estudios previos sobre esta región no necesariamente en infrarrojo. Cada gráfico debe mencionarse en el texto y el reporte debe contar una historia coherente y precisa, de lo que se hizo para obtener sus miembros jóvenes PMS confiables.