

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN ASTROFÍSICA

INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Simulated observations of star forming regions: physical properties and comparison to observations

PROYECTO

DOCTORAL

PRESENTA

JESÚS MIGUEL JÁQUEZ DOMÍNGUEZ

DIRECTORES DE TESIS

DR. ROBERTO GALVÁN MADRID

INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

&

DR. JACOPO FRITZ

INSTITUTO DE RADIOASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA

Morelia, Michoacán. Junio de 2020

1. Introducción

Las nubes moleculares (NM's o MC's por sus siglas en inglés) son estructuras compuestas por gas y polvo en las cuales ocurre la formación de estrellas bajo todas las condiciones conocidas (Kennicutt & Evans, 2012; Shu et al., 1987). Sin embargo, muchas preguntas fundamentales del proceso de formación estelar siguen sin responderse: ¿cuáles son las escalas de tiempo involucradas?, ¿cuáles son los mecanismos físicos dominantes y sus efectos observables?, ¿Cómo podemos utilizar las simulaciones numéricas para aprender más sobre la física del universo?

En galaxias espirales como la Vía Láctea estas regiones se encuentran en el disco. Dentro de nuestra Galaxia, el gas molecular ocupa una pequeña fracción volumétrica del medio interestelar, pero al ser tan denso ocupa la mitad de la masa total de gas en el interior de la órbita galáctica del Sol (Ferriere, 2001). En estas nubes moleculares la densidad promedio del material es relativamente alta (10^2 a 10^3 cm^{-3}) y la temperatura promedio muy baja (10-30 K), lo cual permite que pueda existir hidrógeno en forma molecular. Las masas de estas nubes son del orden de 10^3 a 10^7 M_{\odot} , con tamaños de 5 a 200 pc de diámetro (Solomon et al., 1987; Heyer et al., 2009).

Debido a sus propiedades, las NM's son ópticamente gruesas a longitudes de onda óptico-UV, por lo que las regiones de formación estelar pueden quedar totalmente opacadas en estas frecuencias. Como consecuencia, para estudiar y analizar las NM's es preferible utilizar observaciones en un rango espectral en donde el efecto de la absorción del polvo sea mínimo. Esto se obtiene a longitudes de ondas largas, o sea en el infrarrojo, submilimétrico e incluso en el radio. A estas frecuencias se logra que una NM se vuelva transparente, y además podemos observar la contribución energética debida al reprocesamiento de la radiación óptica-UV por el polvo, por lo que las nubes brillan en el infrarrojo y (sub)milimétrico.

Se ha inferido que las regiones Galácticas de formación estelar son ineficientes en convertir el gas en estrellas a una tasa del orden 1% por tiempo de caída libre (Evans et al., 2009). Diferentes familias de modelos y simulaciones han alcanzado a reproducir este y otros observables globales de las NM's (e.g., Vázquez-Semadeni et al., 2019; Padoan & Nordlund, 2011). Las simulaciones numéricas se han vuelto en una herramienta extremadamente importante para avanzar en la comprensión de los mecanismos físicos que toman parte en la formación y evolución de estas estructuras.

Sin embargo, a la fecha, hay una carencia de estudios sistemáticos que comparen observaciones en espectroscopio y fotometría con observaciones sintéticas obtenidas a partir de dichas simulaciones. Análisis de este tipo tienen una doble ventaja: por un lado, pueden ayudar en la identificación de características o procesos físicos que no están todavía implementados en las simulaciones, o que necesitan ser mejorados. Por el otro lado, observaciones sintéticas de simulaciones se pueden utilizar para calibrar conversiones de observables a propiedades intrínsecas (como la tasa de formación estelar, la masa, etc.). Además, el conocer las propiedades resueltas de las NM's dentro de nuestra Galaxia se convierte en herramienta fundamental para poder entender la formación estelar no resuelta en galaxias externas.

En esta tesis planteamos hacer simulaciones de transferencia radiativa a simulaciones hidrodinámicas, ambas en el estado del arte, para comparar las propiedades de NM's reales con las propiedades obtenidas a partir de "observaciones" sintéticas.

2. Marco teórico

2.1. Simulaciones hidrodinámicas.

Una herramienta muy importante para nuestra comprensión de la formación de estrellas son las simulaciones hidrodinámicas, las cuales son obtenidas a través de códigos numéricos e intentan reproducir las propiedades físicas de las NM's, tales como sus estructuras morfológicas, tasa de formación estelar, dinámica, etc. Hoy en día la complejidad de estas herramientas ha llegado a un nivel que permite, no solo simular la formación y evolución de estos objetos por fenómenos gravitacionales e hidrodinámicos, sino también incluir otros procesos físicos importantes en la formación estelar, entre ellos la acreción continua del medio circundante y efectos de retroalimentación por radiación. Estos avances han permitido reproducir las complejas estructuras morfológicas que resultan en la formación de cúmulos y asociaciones estelares.

La simulación numérica con la que empezaremos el proyecto fue presentada en [Zamora-Avilés et al. \(2019\)](#) con el objetivo de estudiar la estructura y propiedades evolutivas de regiones HII que se expanden en nubes moleculares realistas, las cuales son formadas autoconsistentemente por la compresión de flujos en el medio neutro tibio (MNT) ([Vázquez-Semadeni et al., 2007](#)). En estas simulaciones se modela la evolución completa de una NM desde su formación hasta su destrucción por radiación ionizante. La NM nace por una compresión en el MNT, en donde la capa comprimida sufre un cambio de fase al medio neutro frío debido a la inestabilidad térmica ([Field, 1965](#)). La compresión naturalmente inyecta la turbulencia característica observada en NM's a través de varias inestabilidades dinámicas. La capa sigue acumulando material vía acreción del exterior hasta que finalmente se vuelve molecular y gravitacionalmente inestable.

En este punto la NM entra en un estado de colapso gravitacional jerárquico en el que las escalas pequeñas, al tener un tiempo de caída libre más pequeño, colapsan primero para formar estrellas (ver [Vázquez-Semadeni et al., 2019](#), y referencias allí citadas). Una vez que las estrellas masivas aparecen, estas empiezan a ionizar y dispersar la NM madre.

La simulación numérica arriba descrita fue hecha con el código Euleriano de malla adaptiva FLASH (v2.5) ([Fryxell et al., 2000](#)), en tres dimensiones e incluyendo los procesos físicos relevantes para el modelado de la formación y evolución de NM's, tales como auto-gravedad, formación de partículas tipo estelar o sumidero (sinks), campos magnéticos, procesos de enfriamiento y calentamiento, radiación ionizante, entre otros. Las condiciones iniciales de la simulación de [Zamora-Avilés et al. \(2019\)](#) son: una caja numérica de dimensiones $L_x = 256$ pc, $L_y = L_z = 128$ pc que contiene inicialmente gas neutro tibio con densidad y temperatura uniformes de $n = 2$ cm⁻³ y $T = 1450$ K, lo cual corresponde al equilibrio térmico. La masa del gas en toda la caja es de $\approx 2.6 \times 10^5 M_\odot$. La compresión se modela mediante dos corrientes cilíndricas de radio $R_{\text{flow}} = 32$ pc y longitud $L_{\text{flow}} = 112$ pc, los cuales están completamente contenidos en el dominio numérico y se mueven en direcciones opuestas a lo largo del eje x con velocidades supersónicas de $v_{\text{flow}} = 7.5$ kms⁻¹.

Si bien la simulación arriba descrita es la que está siendo usada en la primera etapa de la tesis, ampliaremos nuestra muestra de simulaciones para así cubrir diferentes escalas y masas (entre 10^4 y $10^6 M_\odot$), así como variaciones sobre la física incluida. Las observaciones sintéticas obtenidas a partir del ensamble de simulaciones permitirán una mejor comparación con las observaciones disponibles.

2.2. Código de transferencia radiativa

SKIRT ¹ (Baes et al., 2011; Camps & Baes, 2015; Camps & Baes, 2020) es un código que, utilizando técnicas Monte Carlo, modela el campo de radiación resultante de la interacción de fotones con el polvo interestelar. Esta escrito completamente en C++ y está diseñado para ser un programa que se corre y configura desde una terminal. El código tiene un tratamiento completo de la absorción y dispersión de los fotones por el polvo, calcula la distribución de temperatura del polvo, así como su reemisión térmica, además de soportar el calentamiento estocástico de los granos más pequeños. Es capaz de manejar cualquier distribución geométrica 3D tanto en la distribución de fuentes primarias de fotones, así como para el gas y del polvo, además de poder cargar los resultados de simulaciones hidrodinámicas en varios formatos, ya sean SPH o AMR. SKIRT ofrece la posibilidad de tratar múltiples mezclas de polvo, incluyendo las propiedades ópticas y los coeficientes de absorción y dispersión de una variedad de tipos de granos de polvo (silicatos, carbonáceos, PAH, entre otros). El código se puede instalar en computadoras de alto rendimiento que cuenten con memoria compartida para correr de forma paralela y así ahorrar tiempo de cómputo. Esta instalación no es trivial, pero se logró hacer en los servidores del IRyA.

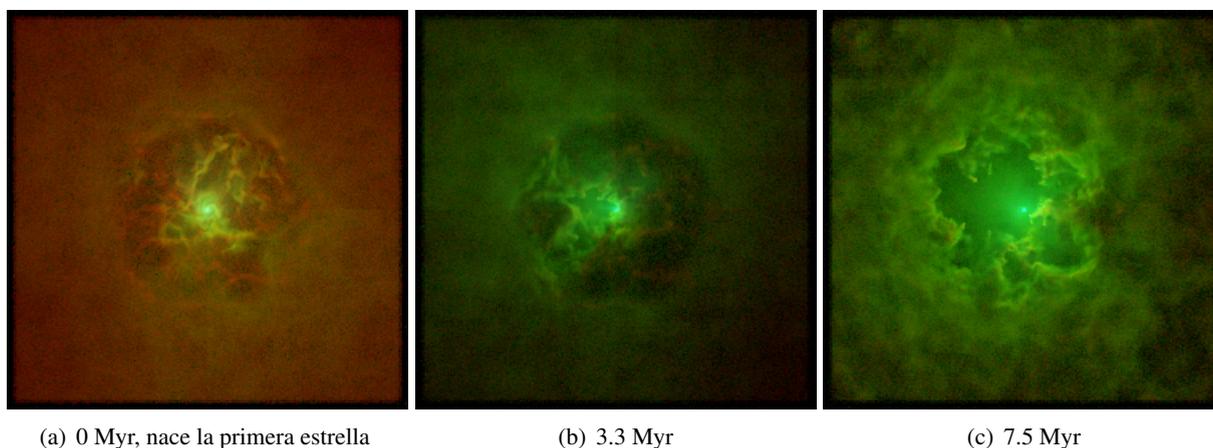


Figura 1: Imágenes sintéticas RGB obtenidas de simulaciones de transferencia radiativa con SKIRT. Las bandas usadas están centradas a $B=0.23$, $G=70$ y $R=1000 \mu\text{m}$.

El funcionamiento básico de SKIRT es como sigue: se introduce la distribución de gas (simulación hidrodinámica) y de fuentes (partículas sink y su SED). A partir de la distribución de gas y usando una fracción de gas a polvo se define la distribución de este último. Seleccionamos una mezcla de polvo (que incluye composición y distribución de tamaños) y definimos los bins en que serán distribuidos los tamaños de los granos (típicamente de 0.001 a $1000 \mu\text{m}$). Se lanzan fotones “primarios” desde las fuentes en direcciones aleatorias dadas por una función de probabilidad, estos viajan de celda en celda, y mediante números aleatorios se decide si el fotón interactúa o no con el ISM contenido en las celdas, de interactuar se selecciona entre absorción o dispersión. Los fotones primarios que no interactúan con el ISM son capturados por los instrumentos sintéticos. Después, una vez que todos los fotones primarios completan su viaje, se calcula la temperatura del polvo en cada una de las celdas y comienza la reemisión. Estos fotones reemitidos vuel-

¹<http://www.skirt.ugent.be/>

ven a pasar por el ISM. Los fotones a cada longitud de onda que salen de la región son capturados por los instrumentos.

Los resultados de una simulación de transferencia radiativa usando SKIRT son guardados a través de instrumentos sintéticos los cuales permiten recolectar los fotones que salen de la simulación imitando imágenes, distribuciones espectrales de energía de banda ancha tanto integradas como espacialmente resueltas, espectros y unidades de campo integral. Estos instrumentos pueden ser colocados en cualquier posición respecto al objeto simulado y a cualquier distancia de él, lo cual permite comparar directamente simulaciones y observaciones (e.g., [De Looze et al. 2012a](#), [De Looze et al. 2012b](#), [De Geyter et al. 2014](#), [De Geyter et al. 2015](#), [Viaene et al. 2017](#)). En la figura 1 podemos ver 3 imágenes RGB, que corresponden a diferentes estados evolutivos de una nube simulada, compuestas por las bandas de ALMA, Herschel y GALEX (centradas a $R=1000$, $G=70$ y $B=0.23 \mu\text{m}$ respectivamente) obtenidas con los instrumentos sintéticos de SKIRT.

Las opciones de mezclas de polvo usadas por SKIRT se encuentran en la literatura (por citar las más usadas: [Weingartner & Draine 2001](#), [Jones, A. P. et al. 2017](#), [Li & Draine 2001](#)). Cada modelo usualmente incluye una combinación específica de silicatos, grafitos, e hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), cuyas propiedades están en una lista de tablas o son aproximadas mediante fórmulas, además de contener las distribuciones de tamaños de los granos, generalmente distribuciones lognormales y leyes de potencia con exponente -3.5 .

En SKIRT se cuenta con la opción de crear mezclas de polvo usando bloques preestablecidos. Una mezcla configurable tiene una población configurable de cada tipo de material. Para cada tipo de grano de cada material las poblaciones especifican las propiedades ópticas y calorimétricas, además de la distribución de tamaños. Las propiedades ópticas incluyen los coeficientes de absorción y dispersión $\kappa^{abs}(\lambda, a)$ y $\kappa^{sca}(\lambda, a)$, así como el parámetro de asimetría $g(\lambda, a)$, el cual determina la función fase de dispersión $\Phi_{\lambda, a}(\mathbf{k}, \mathbf{k}')$ para cada longitud de onda λ y tamaño del grano a . Las propiedades calorimétricas de los granos incluyen la capacidad calorífica $C(T)$ o su equivalente la energía interna $U(T)$, así como la densidad de masa ρ_{bulk} del material.

Usaremos la versión 9 del código SKIRT, la cual recién fue lanzada en 2020 e incluye cambios importantes en la definición de la malla de longitudes de onda y una actualización de instrumentos ([Camps & Baes, 2020](#)). Con este cambio se podrá incluir en un futuro, además del polvo, gas de hidrógeno y de electrones, así como el tratamiento a fotones polarizados.

2.3. Antecedentes

Al momento de redactar este documento existen en la literatura pocos estudios sobre la obtención de imágenes sintéticas a partir de simulaciones hidrodinámicas y su posterior comparación con propiedades observadas de NM's, en particular, hay una escasez de estudios que cubran el continuo desde el cercano infrarrojo hasta el submilimétrico. En las escalas más grandes relacionadas al campo de formación de galaxias, recientemente [Rodriguez-Gomez et al. \(2019\)](#) ha usado SKIRT para obtener imágenes sintéticas y medir las morfologías de galaxias en las simulaciones cosmológicas Illustris. En las escalas que nos interesan de nubes moleculares (~ 1 a 100 pc) existe el trabajo de [Koeperl et al. \(2017b,a\)](#), quien usó el código Hyperion ([Robitaille, 2011](#)). Sin embargo, esos autores usan simulaciones con nubes menos masivas que las nuestras

por varios órdenes de magnitud y condiciones iniciales menos realistas. Con toda la física incluida en el código SKIRT, podemos comparar los resultados de las simulaciones hidrodinámicas con observaciones de manera robusta.

3. Hipótesis

Nuestro trabajo plantea explorar la existencia de observables en imágenes angularmente resueltas y en la distribución espectral de energía de las nubes moleculares, principalmente en longitudes de onda del cercano infrarrojo al milimétrico, que nos permitan obtener información sobre la distribución de luminosidades (y por lo tanto de masas) de las estrellas formadas en una región de formación estelar embebida en su nube progenitora, la tasa de conversión de gas a estrellas, así como las propiedades intrínsecas de dicha nube (masa, subestructura) y su evolución temporal.

4. Objetivos

Los objetivos de esta tesis incluyen:

1. Entender y cuantificar los efectos del muestreo estocástico de la IMF en las poblaciones estelares inferidas y en las características observacionales de la nube.
2. Cuantificar el efecto de los indicadores observables (flujos en varias bandas, morfología multifrecuencia) sobre las características físicas de las regiones, y cómo dependen los resultados de las variables de cada modelo (IMF, razón gas a polvo y de la composición del polvo en la nube).
3. Entender si la evolución temporal de las nubes moleculares se refleja en una evolución temporal de sus observables que pueda ser diagnosticada en surveys.
4. Aplicar métodos de diagnóstico observacionales a nubes sintéticas, para así inferir sus propiedades físicas de manera observacional y compararlas con las propiedades intrínsecas de las simulaciones hidrodinámicas. Con ello podremos calibrar dichos métodos observacionales para poder inferir de una manera más precisa las propiedades físicas de las nubes y su población estelar.

5. Metodología

Para cumplir los objetivos mencionados vamos a utilizar varias simulaciones hidrodinámicas de nubes moleculares, que contengan la mayoría de los procesos físicos relevantes para la formación realista de grupos y cúmulos estelares. Utilizaremos resultados de las simulaciones hidrodinámicas a distintas fases evolutivas como base para usarlas como (input) distribución del gas y partículas sink en SKIRT.

El modelado de la SED para las partículas sinks se generarán usando los modelos de poblaciones estelares de [Charlot & Bruzual \(En prep\)](#), que junto con la elección de una mezcla de polvo generará un modelo de región de formación estelar. Después utilizaremos el código de transferencia radiativa SKIRT para generar observaciones sintéticas a cada uno de estos modelos, cuyos resultados compararemos con datos

observacionales para así lograr la calibración de métodos ya existentes para obtener propiedades físicas de las NM's.

5.1. Modelos de poblaciones estelares

En las simulaciones con las que iniciamos este proyecto doctoral las partículas sumidero no superan $500 M_{\odot}$, por lo que no podemos usar espectros de población estelar simple, calculados con técnicas estándares, ya que no contamos con la suficiente masa para tener un muestreo completo de la IMF. Por esto vamos a tener que tomar un muestreo estocástico de la IMF (usaremos [Kroupa 2002](#) y [Salpeter 1955](#)) hasta que alcancemos la masa de cada partícula sumidero. Una vez que tenemos las masas de las estrellas procedemos a usar los modelos de [Charlot & Bruzual \(En prep\)](#) para asignarles la distribución espectral de energía que les corresponde, y así el espectro de la partícula sumidero (cúmulo estelar).

De estos modelos de poblaciones estelares tendremos diferentes formas de distribuir la masa de cada cúmulo estelar. Para poder analizar la forma en que el muestreo estocástico de la IMF afecta a la distribución espectral de energía final, usaremos aquellos espectros que nos den parámetros estadísticos relevantes tales como el espectro con luminosidad bolométrica máxima, mínima, mediana y promedio.

5.2. Simulaciones de transferencia radiativa

El primer paso para proceder con las simulaciones de transferencia radiativa es seleccionar la distribución espacial del gas y partículas sumidero.

Los primeros snapshot de la simulación de [Zamora-Avilés et al. \(2019\)](#) que tomaremos están basados en la eficiencia de formación estelar (Star Formation Efficiency, SFE) que tiene la nube. Usaremos $SFE = 0.001\%$, $SFE = 1.0\%$, $SFE = 5.5\%$, $SFE = 10\%$ y $SFE = 11.3\%$, que corresponden a las edades de la nube de 0 (nace la primera estrella), 1.1, 3.5, 6.3 y 7.6 Myr que es cuando la nube ha sido dispersada por el feedback.

Los ingredientes principales de una simulación en SKIRT son la distribución del gas, distribución y espectro de las estrellas y la mezcla de polvo. Cada combinación posible de estos tres nos generará una nube sintética a la cual le aplicaremos la transferencia radiativa.

Usaremos SKIRT, con la configuración adecuada para que la transferencia radiativa se dé sin pérdida de información (por ejemplo, la correcta elección de las longitudes de onda de cada componente) y que el resultado final, la imagen, tenga la resolución adecuada. Seleccionamos las longitudes de onda para que las imágenes sintéticas contengan las bandas de los siguientes observatorios: GALEX, SDSS, WISE, Spitzer, IRAS, Herschel, JWST, ALMA y PLANCK. Con ello podremos hacer análisis fotométricos resueltos espacialmente considerando los efectos de resolución angular y ruido.

5.3. Datos observacionales

Existen en la literatura suficientes bases de datos para obtener la fotometría de nubes moleculares en la Galaxia en longitudes de onda que van del cercano infrarrojo (e.g., [Churchwell et al., 2009](#)), pasando por el mediano y lejano infrarrojo (e.g., [Molinari et al., 2010](#)) hasta el (sub)mm (e.g., [Schuller et al., 2009](#)). En una primera instancia usaremos las observaciones compiladas por [Binder & Povich \(2018\)](#) sobre nubes moleculares masivas como Orión, W51A, W49A, Carina y otras 24 nubes. Estos datos observacionales incluyen

a los observatorios Spitzer, MSX, IRAS, Herschel y Planck. A los datos se les realizó un ajuste multicomponente que incluye el modelado de la emisión de polvo como un cuerpo negro modificado, bandas de las PAH's y una ley de potencia para el radio continuo. Inicialmente compararemos estos datos observacionales con nuestras observaciones sintéticas obtenidas con SKIRT de la nube simulada en [Zamora-Avilés et al. \(2019\)](#).

Conforme ampliamos nuestras simulaciones de transferencia radiativa a otras simulaciones hidrodinámicas con diferentes condiciones iniciales, consideraremos usar otras muestras observacionales. Los archivos de telescopios como Spitzer, WISE y Herschel ofrecen mosaicos procesados listos para uso científico. Además, existen suficientes datos públicos de surveys (sub)milimétricos de la Galaxia.

6. Cronograma

Semestre 1

- Familiarizarse a fondo con el uso del código SKIRT 9 ([Camps & Baes, 2020](#)).
- Crear las herramientas para procesar las simulaciones hidrodinámicas.
- Búsqueda de literatura sobre los diferentes aspectos de la tesis.

Semestre 2

- Correr SKIRT de forma totalmente paralela en clusters del IRyA para disminuir significativamente los tiempos de cómputo.
- Validaciones técnicas como el efecto del campo de radiación interestelar Galáctico (ISRF) y los efectos de variaciones en los parámetros de entrada en los resultados de la transferencia radiativa.
- Búsqueda de literatura sobre los diferentes aspectos de la tesis.

Semestre 3

- Redactar el artículo sobre los efectos del muestreo estocástico de la IMF (**artículo 1**).
- Compilar y analizar datos observacionales para su comparación con los resultados de las simulaciones.
- Presentar examen de candidatura.

Semestre 4

- Enviar a una revista arbitrada el artículo 1.
- Análisis de la evolución temporal de los SEDs y morfología de la simulación de ([Zamora-Avilés et al., 2019](#)), así como su comparación con observaciones.
- Familiarizarse con la muestra extendida de simulaciones hidrodinámicas.
- Estancia de investigación con desarrolladores de SKIRT en la Universidad de Gante, Bélgica.

Semestre 5

- Redacción del artículo sobre la evolución temporal de la simulación inicial y su comparación con observaciones (**artículo 2**).
- Hacer las simulaciones de transferencia radiativa sobre la muestra extendida de simulaciones.
- Intentar reproducir la emisión infrarroja de una galaxia usando el ensamble de nubes sintéticas.
- En el verano de 2022, presentación en congresos nacionales e internacionales de los resultados parciales de la tesis.

Semestre 6

- Enviar a una revista arbitrada el artículo 2.
- Estancia de investigación con Manuel Zamora en el INAOE.
- Redacción del artículo con el análisis de la transferencia radiativa sobre el ensamble de simulaciones y su comparación con observaciones (**artículo 3**).

Junto con las actividades antes mencionadas, buscaré asistir a una estancia con Peter Camps, desarrollador de SKIRT en la universidad de Ghent Bélgica, para una familiarización completa con el código, además de unas estancias cortas con Manuel Zamora del INAOE en Puebla para aprender sobre simulaciones hidrodinámicas y poder así aportar al desarrollo y crecimiento en ambos campos.

También planeo asistir a una escuela sobre polvo interestelar, escuela de transferencia radiativa y a las escuelas que tengan que ver el procesamiento de datos de observatorios astrofísicos en la banda del infrarrojo (por ejemplo del JWST).

Por nombrar algunos de los posibles congresos de los que nos gustaría poder asistir se encuentran:

- Star Formation: From Clouds to Discs. A Tribute to the Career of Lee Hartmann 16 Aug 2021 - 19 Aug 2021 • Malahide, Ireland
- From Stars to Galaxies II - Connecting our understanding of star and galaxy formation DateMonday, 20 June 2022 - Friday, 24 June 2022 Location Chalmers University, Gothenburg, Sweden

Además, voy asistir en las varias actividades de divulgación programadas por la UNAM, así como talleres especializados impartidos en el Instituto de Radioastronomía y Astrofísica (Morelia), y en el Instituto de Astronomía (CU).

7. Índice tentativo

1. Resumen

2. Índice

3. Introducción

- Nubes Moleculares
- Función inicial de masa
- Síntesis de Poblaciones estelares
- Transferencia radiativa
- Objetivos

Semestre 7

- Enviar el artículo 3 a una revista arbitrada.
- Empezar la redacción de Tesis.
- En el verano de 2023, presentación en congresos nacionales e internaciones de los resultados de la tesis.

Semestre 8

- Finalizar la redacción de la tesis y entregar al sínodo.

- Descripción capítulo a capítulo

4. Código de transferencia radiativa SKIRT.

- Optimización de las simulaciones
- Malla de gas
- Malla de longitudes de onda para cada componente
- Instrumentos sintéticos

5. Resultados

- Resultados artículo 1.
- Resultados artículo 2.
- Resultados artículo 3.

Referencias

- Baes, M., Verstappen, J., De Looze, I., et al. 2011, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 196, 22
- Binder, B. A. & Povich, M. S. 2018, *The Astrophysical Journal*, 864, 136
- Camps, P. & Baes, M. 2015, *Astronomy and Computing*, 9, 20
- Camps, P. & Baes, M. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2003.00721
- Charlot, S. & Bruzual, G. En prep, en preparación
- Churchwell, E., Babler, B. L., Meade, M. R., et al. 2009, , [121](#), [213](#)
- De Geyter, G., Baes, M., Camps, P., et al. 2014, [MNRAS](#), [441](#), [869](#)
- De Geyter, G., Baes, M., De Looze, I., et al. 2015, [MNRAS](#), [451](#), [1728](#)
- De Looze, I., Baes, M., Fritz, J., & Verstappen, J. 2012a, [MNRAS](#), [419](#), [895](#)
- De Looze, I., Baes, M., Bendo, G. J., et al. 2012b, [MNRAS](#), [427](#), [2797](#)
- Evans, Neal J. I., Dunham, M. M., Jørgensen, J. K., et al. 2009, [ApJS](#), [181](#), [321](#)
- Ferriere, K. M. 2001, *Reviews of Modern Physics*, 73, 1031
- Field, G. B. 1965, [ApJ](#), [142](#), [531](#)
- Fryxell, B., Olson, K., Ricker, P., et al. 2000, [The Astrophysical Journal Supplement Series](#), [131](#), [273](#)
- Heyer, M., Krawczyk, C., Duval, J., & Jackson, J. M. 2009, *The Astrophysical Journal*, 699, 1092
- Jones, A. P., Köhler, M., Ysard, N., Bocchio, M., & Verstraete, L. 2017, [A&A](#), [602](#), [A46](#)
- Kennicutt, R. C. & Evans, N. J. 2012, [Annu. Rev. Astron. Astrophys](#), [50](#), [531](#)
- Koepferl, C. M., Robitaille, T. P., & Dale, J. E. 2017a, [ApJ](#), [849](#), [1](#)
- Koepferl, C. M., Robitaille, T. P., Dale, J. E., & Biscani, F. 2017b, [ApJS](#), [233](#), [1](#)
- Kroupa, P. 2002, *Science*, 295, 82
- Li, A. & Draine, B. 2001, *The Astrophysical Journal*, 554, 778
- Molinari, S., Swinyard, B., Bally, J., et al. 2010, [A&A](#), [518](#), [L100](#)
- Padoan, P. & Nordlund, Å. 2011, [ApJ](#), [730](#), [40](#)
- Robitaille, T. P. 2011, *Astronomy & Astrophysics*, 536, A79
- Rodriguez-Gomez, V., Snyder, G. F., Lotz, J. M., et al. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483, 4140

- Salpeter, E. E. 1955, *The Astrophysical Journal*, 121, 161
- Schuller, F., Menten, K. M., Contreras, Y., et al. 2009, *A&A*, 504, 415
- Shu, F. H., Adams, F. C., & Lizano, S. 1987, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 25, 23
- Solomon, P., Rivolo, A., Barrett, J., & Yahil, A. 1987, *The Astrophysical Journal*, 319, 730
- Vázquez-Semadeni, E., Gómez, G. C., Jappsen, A. K., et al. 2007, *The Astrophysical Journal*, 657, 870
- Viaene, S., Baes, M., Tamm, A., et al. 2017, *A&A*, 599, A64
- Vázquez-Semadeni, E., Palau, A., Ballesteros-Paredes, J., Gómez, G. C., & Zamora-Avilés, M. 2019, arXiv preprint arXiv:1903.11247
- Vázquez-Semadeni, E., Palau, A., Ballesteros-Paredes, J., Gómez, G. C., & Zamora-Avilés, M. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1903.11247
- Weingartner, J. C. & Draine, B. 2001, *The Astrophysical Journal*, 548, 296
- Zamora-Avilés, M., Vázquez-Semadeni, E., González, R. F., et al. 2019, arXiv e-prints, arXiv:1903.01644