
Estudio de la formación estelar en el universo temprano usando simulaciones de observaciones en bandas milimétricas

Luis Fernando Icu Son

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
LICENCIATURA EN FÍSICA

INFORME FINAL
AÑO DE PRÁCTICAS

SUPERVISADO POR:
DRA. EMMALY AGUILAR (INAOE/GTM)
DR. RODRIGO SACAHI (ICFM-USAC)

23 de mayo de 2023

1. Introducción

A principios de la década de los 80 el observatorio espacial *IRAS* realizó el primer censo de cielo completo en longitudes de onda de infrarrojo lejano. Este censo resultó en la detección de decenas de miles de galaxias cuya gran mayoría eran débiles en longitudes de onda ópticas. Se detectaron galaxias que emitían más energía en infrarrojo que en todas las otras longitudes de onda combinadas. A estas galaxias se les llamó como "galaxias luminosas en infrarrojo" (*LIRGs*, por sus siglas en inglés *Luminous InfraRed Galaxy*) las cuales tienen una luminosidad en infrarrojo $L_{IR} \sim 10^{11} L_{\odot}$ y tasas de formación estelar de $10 - 100 M_{\odot}/\text{año}$ (siendo L_{\odot} y M_{\odot} luminosidades solares y masas solares, respectivamente) (Sanders and Mirabel, 1996). Similarmente pero en menor cantidad se encontraron las "galaxias ultra-luminosas en infrarrojo" (o *ULIRGs* por sus siglas en inglés *UltraLuminous InfraRed Galaxy*) cuya luminosidad en infrarrojo es $L_{IR} \sim 10^{12} L_{\odot}$ y que fueron resultado principalmente de la fusión entre dos galaxias ricas en gas con altas tasas de formación estelar de $100 - 1000 M_{\odot}/\text{año}$ (e.g. Clements et al., 1996).

Los primeros intentos para determinar la historia global de formación estelar en el Universo usando los datos ópticos/UV existentes en esa época mostraron que la tasa de formación estelar (o *SFR*, por sus siglas en inglés *Star formation Rate*) era hasta 10 veces más grande a $z \approx 1$ que en el universo local, alcanzando un pico a $z \approx 1.5 - 2$ (Fall et al., 1996).

Por otro lado, a principios de los 90s, el observatorio espacial COBE/FIRAS midió el espectro absoluto de energía en longitudes de onda de infrarrojo lejano y submilimétrico. Esta medición mostró que el universo a estas longitudes de onda emite una densidad de energía comparable a la emitida en el óptico/ultravioleta (UV). Lo que sugería que observar exclusivamente en bandas ópticas/UV nos daba acceso solamente a la mitad de la actividad de formación estelar en el universo. Posteriormente se encontrarían galaxias con características de luminosidad similares a las ULIRGs que componen un porcentaje significativo de la formación estelar en el universo temprano (Hughes et al., 1998).

Estas galaxias, análogas a las ULIRGs locales, debido al corrimiento al rojo, tienen su pico de emisión corrido a las bandas submilimétricas ($200 - 4000 \mu m$), así que se les conocen como galaxias submilimétricas (galaxias sub-mm, e.g. ver revisión de Blain et al., 2002). Típicamente, la población de galaxias sub-mm se encuentra a corrimientos al rojo ~ 2.5 y tiene $L_{IR} \sim 10^{12.5} - 10^{13} L_{\odot}$ lo que implica tasas de formación estelar extremas de $\gtrsim 100 M_{\odot}/\text{año}$ (e.g. revisión de Casey et al., 2014). La detección de las galaxias sub-mm es posible gracias a la emisión de las grandes masas de polvo interestelar que residen en ellas. A continuación se explica este proceso.

1.1. Emisión del polvo interestelar

Las estrellas nacen dentro de las nubes moleculares gigantes las cuales están formadas por gas molecular (principalmente constituido por hidrógeno molecular o H_2) y por granos de polvo. De esta manera las estrellas recién formadas emiten principalmente radiación óptica/UV que

es absorbida por los granos de polvo de la vecindad y luego emitida a longitudes de onda más largas, esto es, Infrarrojo lejano (ó *FIR* por sus siglas en inglés Far Infrared, $15\ \mu\text{m}$ - 1 mm).

La densidad espectral de energía (ó *SED* por sus siglas en inglés *Spectral Energy Distribution*) en el FIR generada por la emisión térmica del polvo depende de la temperatura así como del tamaño, masa y propiedades ópticas de los granos. La forma de la SED para una componente de polvo con temperatura T_d se puede modelar con la ecuación de cuerpo negro modificado.

Teniendo el registro de emisión óptica, UV, IR y sub-mm de la formación estelar a lo largo de la edad del Universo se pueden resolver preguntas como: ¿Hay una época característica para la formación de estrellas y elementos pesados en las galaxias? ¿Existen leyes de formación estelar universales? ¿Las galaxias son responsables de la reionización del universo temprano ($z > 6$)? ¿Cómo se forman las galaxias masivas?, entre otras preguntas. Particularmente la emisión IR/sub-mm nos da acceso fácil al proceso de formación estelar a altos corrimientos al rojo z ($z \sim 1-10$) pero la observación en estas bandas requiere telescopios de gran tamaño e instrumentos muy sensibles como es el Gran Telescopio Milimétrico cuya descripción viene a continuación.

1.2. Gran Telescopio Milimétrico

El Gran Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano (GTM) es el telescopio de plato único, y movable, más grande del mundo con 50m de diámetro diseñado para hacer observaciones astronómicas en longitudes de onda de 0.85 - 4mm. Es un proyecto binacional entre México y los Estados Unidos de América. Situado en la cima del Volcán Sierra Negra (Puebla) a una altitud de 4600 metros (según su Web Oficial).

Los nuevos instrumentos de continuo, ya instalados y en etapa de caracterización, de GTM son MUSCAT y TolTEC. La cámara MUSCAT (Mexico-UK Sub-mm Camera for AsTro-nomy) es un receptor diseñado para 1500 detectores de inductancia cinética de elementos concentrados (LEKIDs por sus siglas en inglés *Lumped Element Kinetic Inductance Detectors*) y opera en una banda centrada alrededor de 1.1mm. Entre sus objetivos científicos está hacer el seguimiento de galaxias sub-mm brillantes para estudiar sus ambientes y realizar un mapa de gran área en alguno de los campos H-ATLAS para caracterizar su población de galaxias (ver sección 1.3) y explorar así la evolución de estas.

Por otro lado, la cámara TolTEC fue diseñada para proporcionar imágenes simultáneas en bandas centradas en longitudes de onda de 1.1mm, 1.4mm y 2.0mm. TolTEC realizará durante el año 2023 una serie de censos de legado usando 100 horas de observación. Entre estos censos a realizar se encuentra el censo ultra-profundo de un grado cuadrado, limitado por confusión, el cual servirá también para caracterizar la población de galaxias sub-mm y explorar la evolución de galaxias (según su Web Oficial).

Con un telescopio de plato único y de gran tamaño en combinación con instrumentos de gran

sensibilidad como es la configuración GTM-ToLTEC/MUSCAT es posible, por primera vez, realizar censos sub-mm de gran área ($1\text{-}20\text{ deg}^2$), resolución intermedia ($\theta \sim 5.5\text{ arcsec}$) con un costo observacional razonable (hasta unas cuantas decenas de horas de integración) y con un nivel de ruido $\lesssim 1\text{ mJy}$ en la banda de 1.1mm .

1.3. Caracterización de censos de gran área

La identificación de fuentes sub-mm puntuales (galaxias con $z > 1$ en este trabajo) requiere la caracterización de las diferentes componentes de ruido en una señal observada. Por ejemplo, es importante caracterizar la emisión extendida debida a la atmósfera, el ruido instrumental (principalmente gaussiano) y el ruido de confusión (debido a la gran cantidad de fuentes débiles no resueltas) ya que todas estas señales contaminan la señal astronómica de interés (e.g ver figura 1, Smith et al., 2017). Una vez que se han distinguido las fuentes puntuales (toda señal con la forma del haz del telescopio) respecto al fondo de ruido se pueden construir catálogos de fuentes cuya robustez puede ser evaluada a través de diferentes pruebas estadísticas en función de la razón señal a ruido (S/N) de las fuentes.

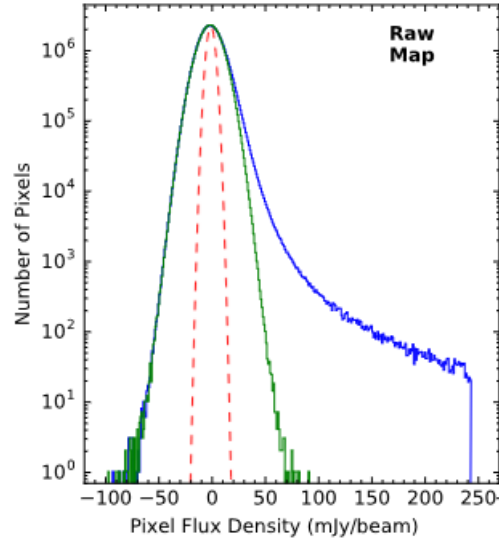


Figura 1: Histograma de flujo por pixel. La línea azul corresponde a las fuentes del mapa, la línea verde al ruido instrumental gaussiano y la línea roja corresponde a un ajuste al ruido de confusión Smith et al. (2017).

La técnica estadística más eficiente para la caracterización de catálogos de fuentes pertenecientes a censos de gran área consiste en realizar simulaciones Monte Carlo (e.g. Scott et al., 2008) para calcular el nivel de completez de los mapas (probabilidad de detección de una fuente con una S/N dada), la tasa de falsas detecciones (número de detecciones debidas a picos de ruido) y la incertidumbre en posición de las fuentes (cambio en la posición de la fuente debido al ruido).

Por otro lado, la densidad de flujo de una fuente sub-mm robusta ($S/N > 4$) debe corregirse por el efecto causado por el ruido de confusión el cual genera una sobre-estimación de la densidad del flujo (corrección conocida en inglés como *flux deboosting*). El factor de corrección se obtiene a través de simulaciones y se estima en función de la S/N . Se espera que una fuente con S/N alta tenga una contribución despreciable a su densidad de flujo observada del ruido de confusión.

Respecto a las fuentes sub-mm más robustas se puede obtener el conteo de fuentes con una densidad de flujo dada por unidad de área, con el objetivo de identificar cuáles son las fuentes que dominan el fondo de radiación IR extragaláctico o bien para identificar una posible sobre densidad respecto a la de los campos sin sesgo. La figura 2 muestra el conteo de fuentes acumulativa realizada por Scott et al. (2010).

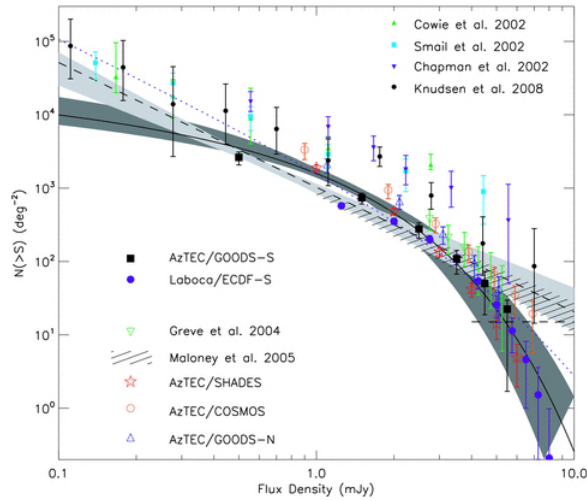


Figura 2: Conteo de fuentes acumulativo. Scott et al. (2010)

2. Objetivos de la práctica profesional

Como se mencionó anteriormente, para poder identificar galaxias sub-mm (fuentes puntuales) se deben entender las propiedades de ruido (instrumental y confusión) de los mapas observados así como la forma del haz para distinguir las fuentes del fondo de ruido.

El objetivo principal de este trabajo es crear las primeras herramientas que nos ayuden a caracterizar y analizar las observaciones de censos de gran área realizados con los instrumentos del continuo de GTM, estos son, ToLTEC y MUSCAT. Ambos instrumentos ya están instalados y realizando observaciones de caracterización de los instrumentos. Se espera que a mediados del año 2023 ya estén disponibles sus primeras observaciones de ciencia.

Para poder probar estas herramientas así como para tener una introducción a los conceptos fundamentales en el área de astronomía milimétrica, es necesario simular un mapa de gran

área de fuentes puntuales observado a 1.1mm y considerando las características de la configuración GTM-MUSCAT/ToLTEC, como son la forma del haz del telescopio, la sensibilidad de los instrumentos y la velocidad de mapeo. Al final se podrá tener un entendimiento de detección y conteo de fuentes puntuales así como la caracterización de las principales componentes de ruido.

2.1. Objetivos específicos

- Estudiar los conceptos fundamentales en el área de astronomía milimétrica.
- Entender los factores que intervienen en la observación con telescopios milimétricos.
- Generar un programa que simule datos (mapas) observados por un telescopio con características específicas.
- Generar el paquete de programas que nos ayuden a analizar/recuperar las señales tanto astronómicas como de ruido consideradas en el mapa simulado.
- Comparar los resultados obtenidos de la simulación con los de los datos observacionales reales a través de técnicas estadísticas.

3. Propiedades de los telescopios

A continuación se describen los conceptos necesarios para realizar la simulación de un mapa de gran área en bandas sub-mm. Las principales a tomar en cuenta para esta simulación fueron la forma del haz del telescopio el cual nos da información de la respuesta del sistema óptico del telescopio; la resolución angular que es la que definirá nuestra capacidad de distinguir las fuentes y finalmente, la sensibilidad de los instrumentos la cual depende del nivel de ruido electrónico de los detectores y que añaden una contaminación a la señal astronómica. Como primera aproximación se considerará que el ruido instrumental está dominado por una componente gaussiana de tal forma que su desviación estándar (nivel de ruido) es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del tiempo de integración.

3.1. Función de dispersión de punto (PSF)

El análisis de un sistema de imagen (i.e. una imagen de entrada en el plano del objeto es procesada por un sistema dando como resultado una imagen de salida en el plano de la imagen) se puede simplificar si el sistema es lineal e invariante. Un sistema lineal implica que las imágenes de entrada son independientes, de esta manera una misma imagen de salida puede ser obtenida de dos formas 1) se pueden sumar las imágenes de entrada y luego la suma ser procesada por el sistema, 2) se puede procesar cada imagen de entrada por separado y luego sumar todas las imágenes de salida. Si existe una constante, esta puede multiplicar la imagen de entrada o bien la imagen de salida para cualquiera de los 2 casos anteriores. Por otro lado, un sistema es invariante si la forma de la imagen de un punto no cambia al mover el punto

en el plano del objeto (isoplanatismo).

Para caracterizar la calidad de un sistema de imagen (grado de desenfoque) en el dominio espacial es necesario construir la PSF (por sus siglas en inglés Point Spread Function que significa Función de dispersión puntual) la cual es una función de transferencia que relaciona la intensidad de radiación de una fuente puntual unitaria en el plano objeto (imagen de entrada) con la distribución de intensidad de radiación de la fuente puntual en el plano imagen (imagen de salida).

Los conceptos anteriores son transferibles al caso de un sistema óptico como es el de un telescopio donde el espejo primario es una apertura circular de cierto diámetro que produce una distribución de intensidad de radiación con la forma de un patrón de un "disco de Airy" para una fuente puntual. Corresponde a un círculo con el máximo de irradiancia en el centro y rodeado de anillos cada vez más tenues hasta desaparecer. Podemos usar la siguiente ecuación para representarla:

$$I(\theta) = I_0 \left[\frac{2J_1\left(\frac{2\pi ar}{\lambda R}\right)}{\frac{2\pi ar}{\lambda R}} \right]^2, \quad (1)$$

donde r es la distancia radial desde el centro (eje óptico) a cualquier punto del patrón de difracción, λ la longitud de onda observada, a y R son parámetros asociados a la geometría del telescopio y J_1 es una función de Bessel de primer orden (Lundén, 2019).

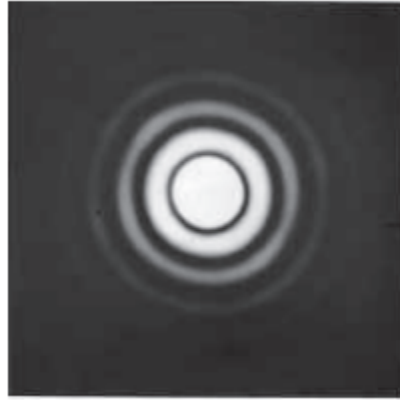


Figura 3: Patrón del disco de Airy (Hecht, 2016)

Para el caso de una distribución continua de intensidad podemos considerar a esta distribución como un conjunto infinito de contribuciones puntuales con diferentes intensidades. A cada punto del plano imagen le corresponde un punto del plano del objeto como resultado de la multiplicación de la PSF por su respectivo factor de intensidad y luego sumando todos los puntos del objeto que conforman la imagen. La operación matemática que nos permite hacer esto es conocida como la *convolución* que junto con el PSF simulan el proceso llevado a cabo por el sistema óptico de un telescopio sobre un objeto de entrada (astronómico) (Rossmann,

1969).

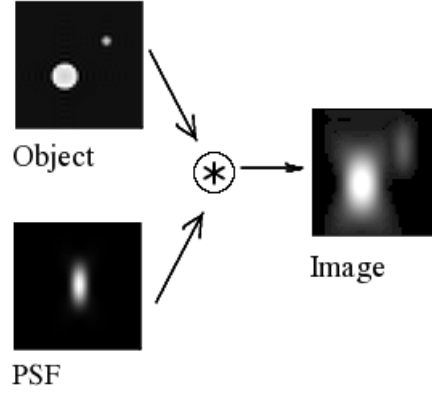


Figura 4: Convolución de dos fuentes puntuales y cierto PSF

Para el caso continuo, la convolución se expresa como:

$$[f(x, y) \otimes g(x, y)]_{(x, y)} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau_u, \tau_v) g(x - \tau_u, y - \tau_v) d\tau_u d\tau_v, \quad (2)$$

donde $f(x, y)$ es nuestra distribución de fuentes puntuales y $g(x, y)$ es el PSF que estemos usando.

3.2. Resolución angular

Consideremos el radio del disco de Airy ocupa un ángulo $\Delta\theta$ y la separación angular entre las dos fuentes es $\Delta\varphi$. Si se cumple que $\Delta\varphi \gg \Delta\theta$ decimos que las fuentes están resueltas. Esto quiere decir que podremos distinguir las dos fuentes en la imagen resultante (Hecht, 2016).

El criterio de Rayleigh nos dice que dos fuentes están "justamente resueltas" cuando el centro de uno de los discos Airy está sobre el primer mínimo del patrón de Airy de la segunda fuente. Esto se refiere a:

$$(\Delta\varphi)_{min} = \Delta\theta = 1.22\lambda/D, \quad (3)$$

donde λ es la longitud de onda observada y D es el diámetro de la apertura del telescopio. El criterio de Sparrow considera 2 fuentes resueltas cuando aparece un mínimo en el punto medio de la distancia entre los picos de ambas fuentes (Hecht, 2016).

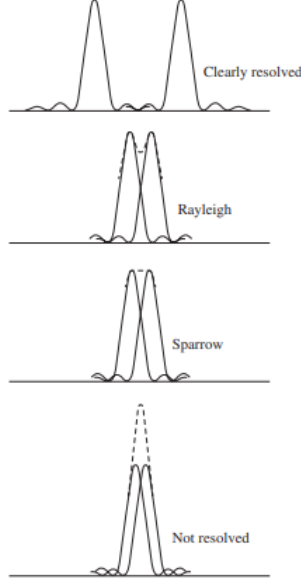


Figura 5: Comparación entre distintos criterios de resolución (Hecht, 2016)

3.3. Simplificaciones

El caso más sencillo para comenzar una simulación astronómica de fuentes puntuales es suponer que la PSF tiene un perfil gaussiano. Para aproximar el lóbulo central usaremos una función gaussiana del tipo:

$$G(r) = Ae^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}, \quad (4)$$

donde A es la amplitud y σ es la desviación de la gaussiana. De este modo la resolución del sistema es la anchura a altura media ($FWHM$, por sus siglas en inglés) la cual está dada por:

$$FWHM = \Delta\theta = 2\sqrt{2\ln(2)}\sigma \approx 2.355\sigma. \quad (5)$$

En la figura 6 se muestra una comparación entre un perfil gaussiano y el disco de Airy.

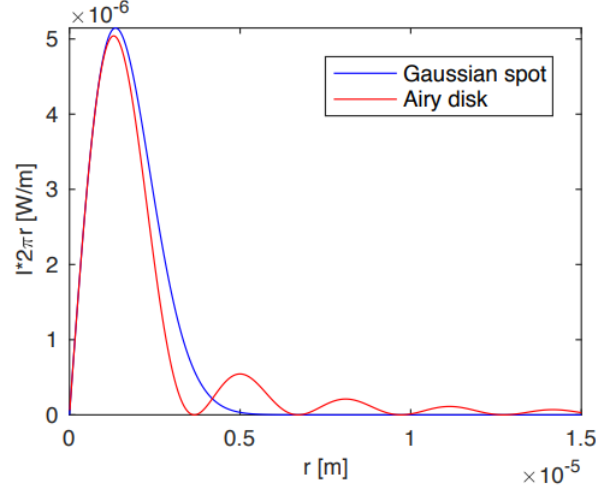


Figura 6: Comparación entre la forma del disco de Airy y una función Gaussiana (Lundén, 2019)

4. Simulación de un censo de 1 deg²

Cuando se realiza un mapa del cielo con un telescopio en combinación con un instrumento sensible para detectar una población de galaxias sub-mm (i.e. fuera del plano galáctico), la señal astronómica (principalmente fuentes brillantes, fuentes débiles, atmósfera) se mezcla con el ruido instrumental (principalmente gaussiano). La señal mezclada se puede separar en sus diferentes componentes a través de técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales (e.g. (Scott et al., 2008)) para remover la contaminación de la atmósfera (aunque siempre quedan remanentes) y componentes de ruido correlacionado (electrónico externo a los detectores, interferencia electromagnética). De esta manera, la señal resultante se espera que esté dominada por fuentes brillantes y componentes de ruido no correlacionadas como es el ruido instrumental propio de cada detector y el ruido de confusión, el cual se compone por una población masiva de fuentes débiles que al no ser resueltas se mezclan para formar un fondo.

De esta manera podemos entender la observación de un censo de galaxias sub-mm con un telescopio como la convolución de fuentes puntuales (densidad de flujo concentrada en un píxel) con la forma del haz del telescopio (PSF) lo que produce fuentes puntuales ensanchadas al tamaño del haz y sus respectivas densidades de flujo distribuidas siguiendo la forma del haz.

4.1. Consideraciones iniciales

Para comenzar con la simulación usaremos las características físicas del Gran Telescopio Milimétrico. Como se mencionó en la sección 1.2, el GTM se encuentra operando en su configuración de 50 metros y cuenta con dos instrumentos de continuo: ToLTEC y MUSCAT,

ambos observando de manera independiente a 1.1mm.

Tomando en cuenta la longitud de onda de 1.1mm y el diámetro de 50m, usamos la ecuación 3 para obtener que el tamaño del haz es de 5.5 arcsec. Para facilitar el análisis, un píxel del mapa simulado corresponde a 1 arcsec y se ha redondeado el tamaño de haz a 6 arcsec:

$$FWHM \approx 6 \text{ arcsec} \Rightarrow \sigma \approx 2.55 \text{ arcsec}, \quad (6)$$

que son los parámetros a utilizar de aquí en adelante. Además se considerarán como despreciables las componentes de ruido correlacionado. Las unidades de densidad de flujo se presentan en mJy/pix. Finalmente, como ya se mencionó en la sección 3.3, para simplificar la simulación se modelará la forma del haz del telescopio como un perfil gaussiano.

Para la simulación se utilizó Python versión 3.10.6 y distintas librerías que pueden encontrarse ahí. Los códigos generados pueden encontrarse en el siguiente repositorio.

4.2. Creando el mapa de fuentes puntuales

El primer paso es simular una fuente sub-mm puntual sin ruido (instrumental+confusión). Esto se realizó mediante la función *convolve* de la librería *astropy*. Utilizamos un PSF gaussiano variando su FWHM con valores de 3, 6 y 9 arcsec y lo convolucionamos con una fuente puntual (o "función delta", cuya densidad de flujo está concentrada en un punto o pixel). El resultado puede verse en la figura 7:

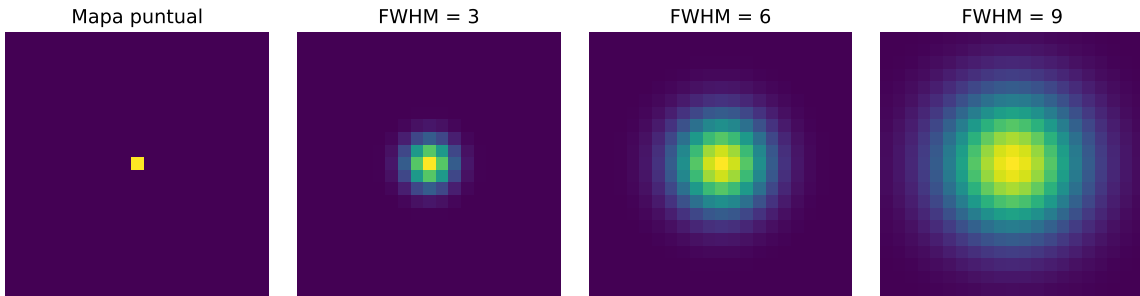


Figura 7: Fuente puntual convolucionada con un PSF gaussiano de distintos FWHM.

Si se integra el volumen debajo de una fuente convolucionada recuperaremos la densidad de flujo de la fuente puntual. Por otro lado, la densidad de flujo de la fuente puntual debe conservarse no importando el FWHM del PSF usado para la convolución. De esta manera, mientras se aumenta el valor de FWHM (i.e. ecuación 6) se disminuye la amplitud o pico máximo de la distribución de densidad de flujo debida a la convolución.

Por el principio de superposición se puede crear un mapa de "deltas" o fuentes puntuales en posiciones aleatorias para luego convolucionarlas con el PSF y producir el mapa de fuentes puntuales a la resolución angular de TolTEC/MUSCAT en GTM que se presenta en la figura 8:

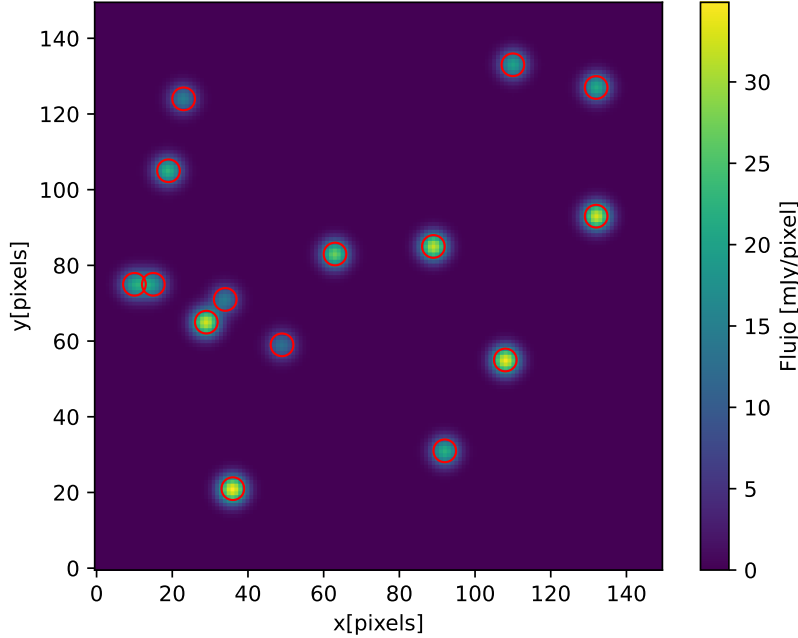


Figura 8: Mapa de fuentes puntuales convolucionadas

El mapa se compone de 15 fuentes puntuales convolucionadas sin ruido. El siguiente paso es intentar recuperar la densidad de flujo de cada una de estas fuentes para comprobar que la convolución se realizó correctamente.

4.3. Recuperando la densidad de flujo de las fuentes

Para recuperar la densidad de flujo se estudiaron dos métodos: la fotometría de apertura y el ajuste gaussiano.

4.3.1. Fotometría de apertura

Este método consiste en ubicar el pico máximo de cada una de las fuentes e ir integrando el flujo aumentando el radio de apertura centrado en el máximo. Para una fuente aislada el porcentaje del flujo recuperado según el radio de apertura es:

$$f(r) = 1 - e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}}. \quad (7)$$

Para recuperar el flujo total bastaría con hacer tender r a infinito, pero en un mapa real eso no es posible por la presencia de otras fuentes en la vecindad. Por lo que fue necesario buscar el radio mínimo para el cual se recuperara la mayor parte del flujo posible. Esto se realizó para una fuente puntual y el resultado se muestra en la figura 9 en la cual se observa que para recuperar un 90 % basta con integrar hasta un radio de 2σ y para obtener el 100 % puede utilizarse un 3.5σ .

Esta aproximación funciona para una fuente puntual aislada. El siguiente paso es estudiar el caso de dos fuentes cercanas. Para realizar esto se generó un mapa con dos fuentes iguales

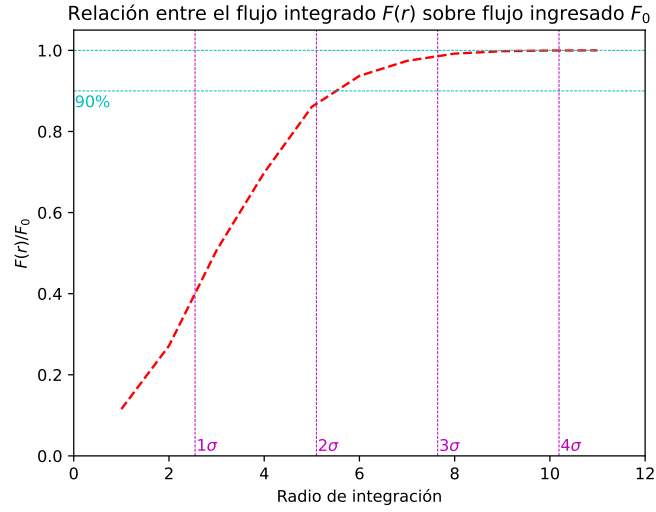


Figura 9: Fotometría de apertura de una fuente aislada. El eje vertical indica el porcentaje del flujo total recuperado y el eje horizontal el radio de integración en arcsec.

en flujo en la cual la distancia entre ellas pudiera variar. Se realizó la fotometría de apertura alrededor de una de las fuentes y el resultado se muestra en la figura 10.

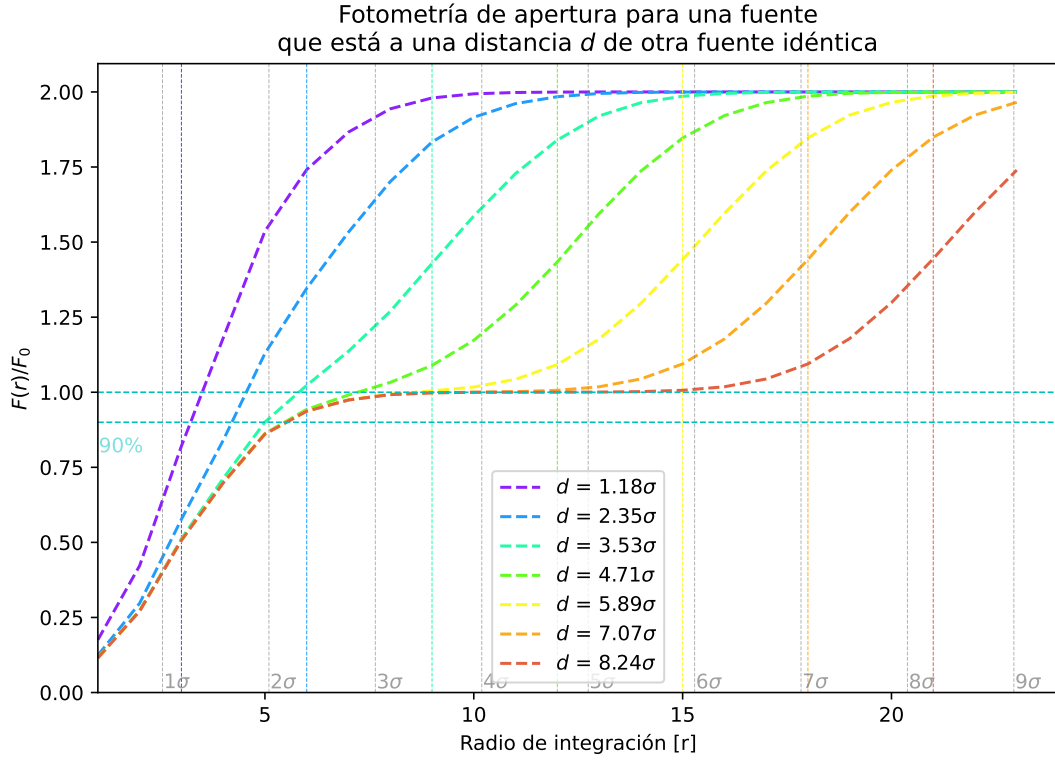


Figura 10: Consideramos dos fuentes idénticas a cierta distancia d entre sí y realizamos fotometría de apertura en una de ellas. La línea roja puede considerarse como referencia para una fuente aislada por el gran valor de d en ese caso.

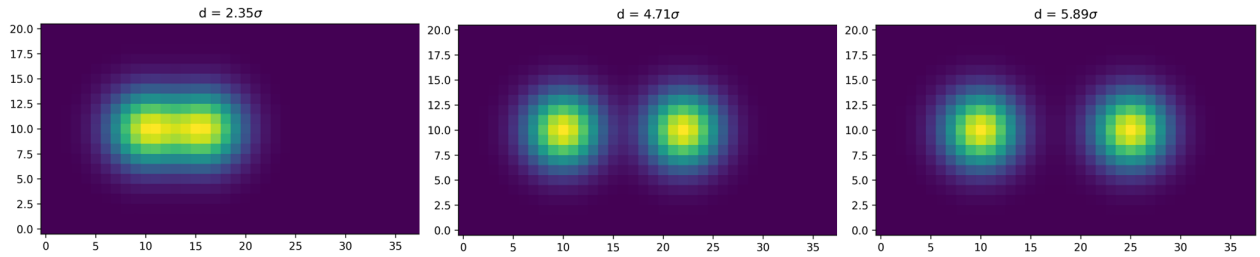


Figura 11: Cómo se ven las fuentes a $d = 2.35\sigma$, 4.71σ y 5.89σ correspondientes a las líneas celeste, verde y amarillo respectivamente en la figura 10.

En el primer panel de la figura 11 las fuentes se encuentran a una distancia de $d = 2.35\sigma = 1FWHM$. Este caso corresponde justo al criterio de Rayleigh y al revisar su fotometría de apertura en la figura 10 es indistinguible de una fuente puntual con el doble de flujo. Para el caso de la línea verde en la figura 10 cuando están a una distancia de 4.71σ se observa que la fotometría de apertura es idéntica al caso aislado hasta una distancia aproximada de 2.35σ en el cual ya hemos recuperado más del 90 % del flujo total. A partir de ahí la fotometría ya empieza a integrar el flujo de la segunda fuente. Finalmente, la línea amarilla es idéntica a la curva de la figura 9 hasta una distancia de 3.5σ el cual corresponde al límite encontrado en

la figura 9, por lo se concluye que para una fuente que esté a distancias mayores a $d = 5.89$ de cualquier otra fuente puede considerarse como aislada.

4.3.2. Ajuste gaussiano

Tal y como menciona el nombre, este método consiste en ajustar los datos del mapa a una superficie gaussiana. Para probar el algoritmo se realizó sobre un mapa con dos fuentes con la superficie:

$$G(x, y) = A_1 e^{-\frac{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}{2\sigma^2}} + A_2 e^{-\frac{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

con la que podemos hallar la posición y la amplitud de cada uno de los picos. Integrando la ecuación 4 sobre el espacio vemos que podemos encontrar el volumen con la siguiente ecuación:

$$F = 2\pi A\sigma^2. \quad (9)$$

Para probar esto generamos un mapa con dos fuentes con las siguientes características:

$F_1 = 700$	$F_2 = 1200$
$x_1 = 20$	$x_2 = 31$
$y_1 = 20$	$y_2 = 31$

Con esto el ajuste dio los siguientes resultados:

$A_1 = 17.16431046$	$A_2 = 29.4245469$
$x_1 = 19.99999557$	$x_2 = 31.0000026$
$y_1 = 19.99999557$	$y_2 = 31.0000026$
$F_1 = 700.0465301971767$	$F_2 = 1200.0803652971574$

Para verificar esto de otra forma se graficaron los datos originales junto a una superficie dada por la ecuación 8 y los parámetros obtenidos:

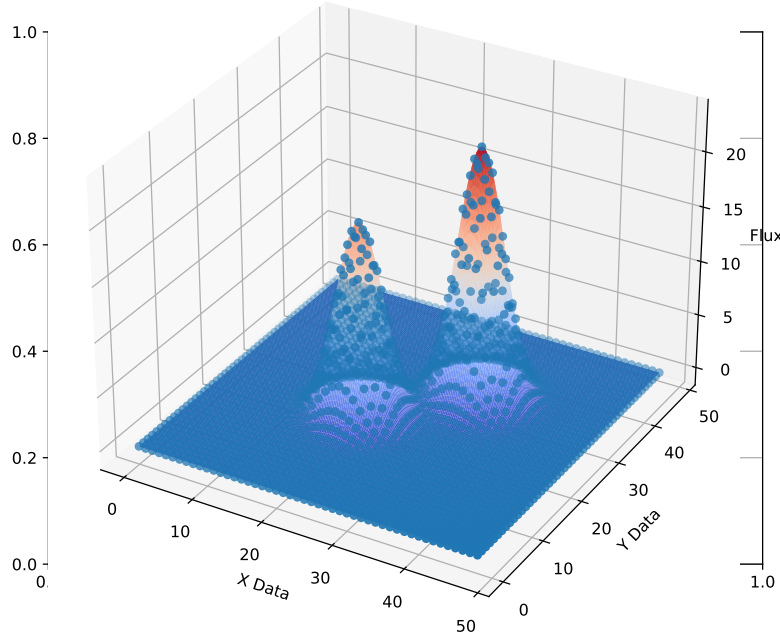


Figura 12: Ajuste gaussiano. Los puntos azules corresponden a nuestros datos de densidad de flujo y la superficie roja corresponde a la función gaussiana dada por los parámetros conseguidos.

4.4. Componentes de ruido no correlacionado

4.4.1. Ruido instrumental

Para el ruido instrumental se creó un mapa de las mismas dimensiones que la figura 8. Este mapa tiene valores aleatorios en cada una de las celdas siguiendo una distribución gaussiana. El nivel de ruido está dado por la desviación σ_N de la distribución gaussiana aleatoria. El mapa de ruido instrumental se creó con $\sigma_N = 2mJy$ y se sumó al mapa de fuentes creado en la figura 8 y el resultado se muestra en la figura 13.

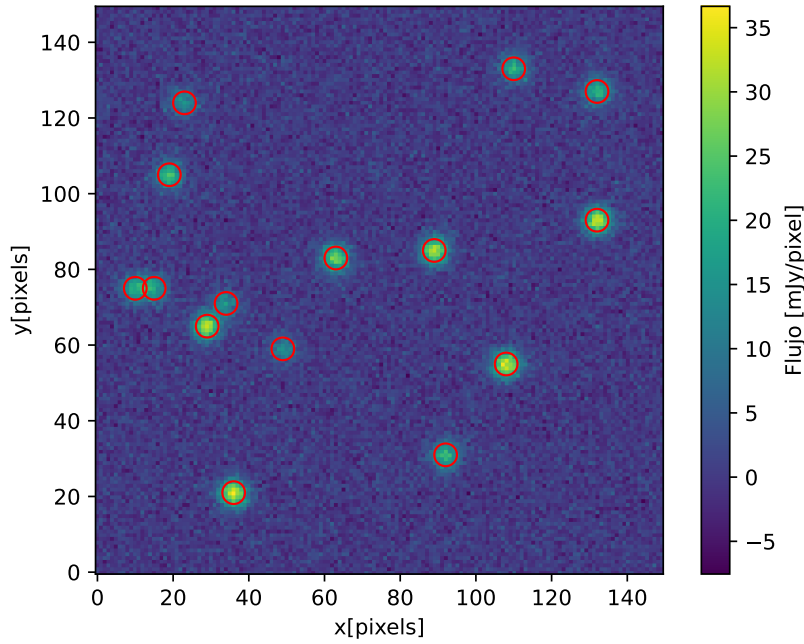


Figura 13: Mapa de fuentes puntuales convolucionadas en combinación con ruido aleatorio gaussiano.

Para verificar que el mapa de ruido instrumental siguiera la distribución gaussiana deseada se realizó un histograma del mapa. El resultado con su respectivo ajuste gaussiano se muestra en la figura 14.

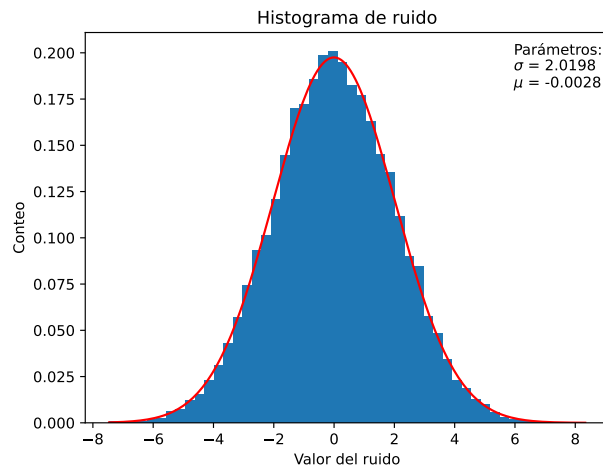


Figura 14: Histograma del mapa de ruido gaussiano. La línea roja corresponde al ajuste gaussiano y los parámetros de ajuste se muestran como leyendas en la esquina superior derecha.

4.5. Catálogo de fuentes de la simulación.

En primer lugar es necesario saber la contribución del ruido instrumental en la escala de un radio de fuente aislada. Este ruido, al ser aleatorio, tuvo que ser caracterizado tomando una gran cantidad de muestras. Para considerar esto se generaron 100 mapas de ruido distintos y en cada mapa se midió cuánto flujo se aporta en un radio $R = 3.5\sigma$ en 20 posiciones distintas, con lo que se obtuvieron 2000 mediciones. Para obtener una desviación significativa, calculamos el promedio y la desviación estándar de los valores absolutos de las mediciones:

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{|N|} &= 22.4175761073285 \\ STDV_{|N|} &= 16.907254793122547\end{aligned}$$

Con esto en cuenta se procedió a realizar fotometría de apertura en cada una de las fuentes en el mapa con ruido 13. Se graficó el flujo obtenido por la integración de cada una de las fuentes contra el flujo que fue ingresado en cada una. La figura 15 muestra esta comparación donde los símbolos de colores representan a cada una de las 15 fuentes simuladas, las líneas punteadas representan la dispersión máxima esperada en las densidades de flujo considerando el nivel de ruido instrumental. Los triángulos rojos resaltan las fuentes no resueltas (fuentes no aisladas).

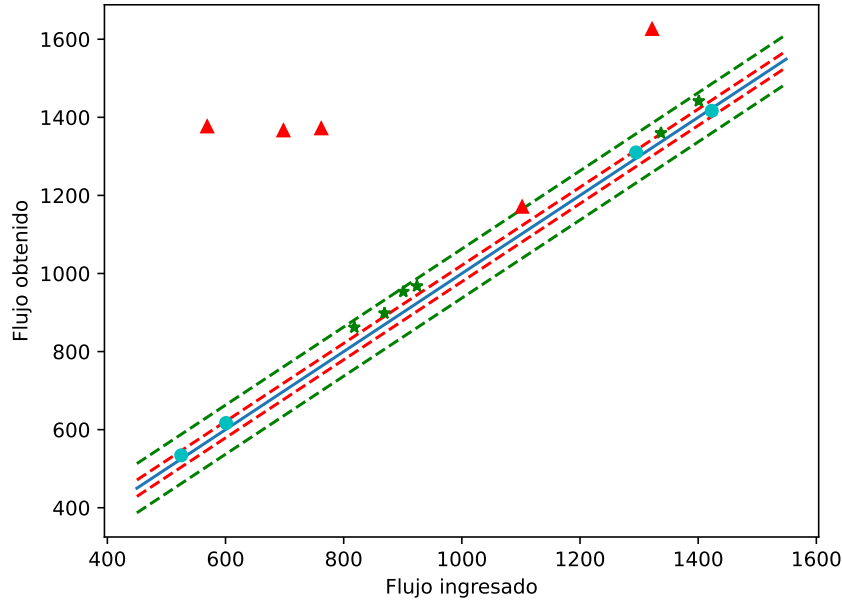


Figura 15: Flujo obtenido contra el flujo ingresado.

Los datos numéricos se resumen en la siguiente tabla:

y	x	F_0	$F(r)$	$F_N(r)$	$F_N(r)/F_0$	F_{conv}
127	132	869	867.280294	898.1857	1.03358539	21.3082817
65	29	1322	1674.20914	1626.28282	1.23016855	32.5431128
31	92	901	899.216968	953.302959	1.0580499	22.0929365
105	19	924	922.173393	967.576682	1.04716091	22.6569071
75	15	698	1392.30261	1366.45703	1.95767483	19.8389959
124	23	601	599.813636	617.057115	1.02671733	14.7367978
93	132	1337	1334.35415	1359.80344	1.01705567	32.783858
71	34	569	1391.55448	1376.60241	2.41933639	14.2473549
21	36	1423	1420.18396	1416.72177	0.99558803	34.8926178
133	110	818	816.381221	861.850139	1.05360653	20.0577381
55	108	1401	1398.22749	1441.69869	1.02904974	34.3531676
59	49	525	523.971527	534.311917	1.01773699	12.8732427
85	89	1295	1292.43726	1310.10341	1.01166286	31.7539986
75	10	762	1397.20395	1371.72972	1.80017024	21.1795422
83	63	1102	1099.8192	1170.88582	1.06250981	27.0215494

Cuadro 1: Datos obtenidos con la fotometría de apertura en el mapa 15

donde y y x son las coordenadas de cada una de las fuentes en el mapa, F_0 es el flujo que nosotros ingresamos, $F(r)$ es el flujo integrado en el mapa sin ruido, $F_N(r)$ es el flujo integrado en el mapa con ruido, $F_N(r)/F_0$ es el porcentaje obtenido y F_{conv} es la amplitud de cada una de las fuentes después de convolucionarse. Si hacemos el promedio del porcentaje del flujo obtenido tenemos:

$$\overline{F} = \frac{F_N(r)}{F_0} = 1.250671545 \quad (10)$$

que muestra que el uso de la fotometría de apertura es una aproximación buena para recuperar cada uno de los flujos.

4.6. Conteo de fuentes

Un método muy eficiente para estudiar a una población de galaxias de manera estadística (no requiere la identificación individual de estas) es realizando su conteo en función del brillo aparente de las fuentes. De esta manera, la comparación entre conteos de fuentes de distintos campos del cielo, detectadas en la misma banda, nos brinda información de la densidad típica de galaxias brillantes y débiles en el cielo lo que nos permite distinguir los censos de galaxias sobredensos y/o amplificadas. Para un vecindario cercano (en términos cosmológicos) se espera que la cantidad de fuentes por unidad de área más brillantes que alguna densidad de flujo S sea $N(> S) \propto S^{-3/2}$ (un conteo acumulativo), aunque esta distribución se ve afectada por la densidad volumétrica de fuentes o su evolución temporal. Del mismo modo, se define el conteo diferencial como:

$$n(s) \equiv -\frac{dN(> S)}{dS}, \quad (11)$$

como el conteo diferencial de fuentes (e.g Patanchon et al., 2009).

En este trabajo, para efectos prácticos, se realizó el conteo de fuentes respecto al catálogo obtenido por la colaboración de TolTEC usando la rutina de python PyBDSF la cual proporciona densidades de flujo tanto integradas como por ajuste gaussiano, además de coordenadas de las fuentes. El conteo de fuentes pyBDSF fue comparado con el conteo de fuentes respecto al catálogo de entrada (input, PhD Araceli Nava en progreso) el cual fue usado para simular un mapa observado por TolTEC a 1.1mm y al cual se aplicó la rutina de extracción de fuentes PyBDSF.

El catálogo input está basado en una simulación cosmológica de halos de materia oscura (Rodríguez-Puebla et al. 2016, 2017). Los halos de materia oscura son poblados con galaxias mediante la metodología desarrollada por Rodríguez-Puebla et al. obteniendo así la masa estelar, la tasa de formación estelar y posiciones de las galaxias. Dicha simulación de halos nos permite construir el volumen del Universo a observar (cono de luz), y obtener información espacial sobre su distribución en la red cósmica a través de sus posiciones. Con la información anterior y haciendo uso de resultados observacionales, es posible inferir que tan oscurecidas están las galaxias según su masa estelar y corrimiento al rojo. Después, mediante relaciones empíricas se asignan propiedades infrarrojas de las galaxias como SFR infrarroja u oscurecida, luminosidad infrarroja, temperatura del polvo y finalmente densidades de flujo observadas.

La simulación de un mapa de fuentes en un contexto cosmológico está fuera de los objetivos de este trabajo, por lo que se realizó el conteo de fuentes respecto a los catálogos generados por la colaboración, los cuales son más realistas que los generados en este trabajo. En la figura 16 se muestra la comparación del conteo de fuentes diferencial entre el catálogo de entrada (input) y el catálogo PyBDSF (output).

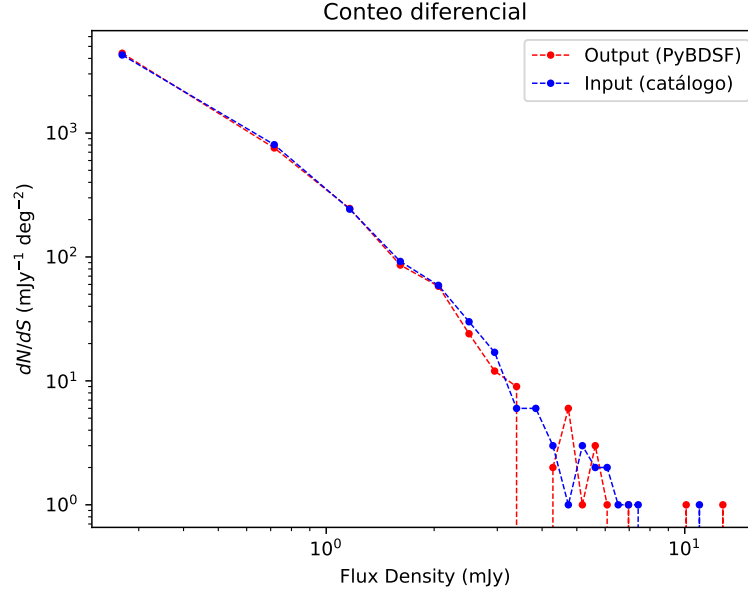


Figura 16: Comparación entre conteo diferencial de los catálogos input y el recuperado con PyBDSF

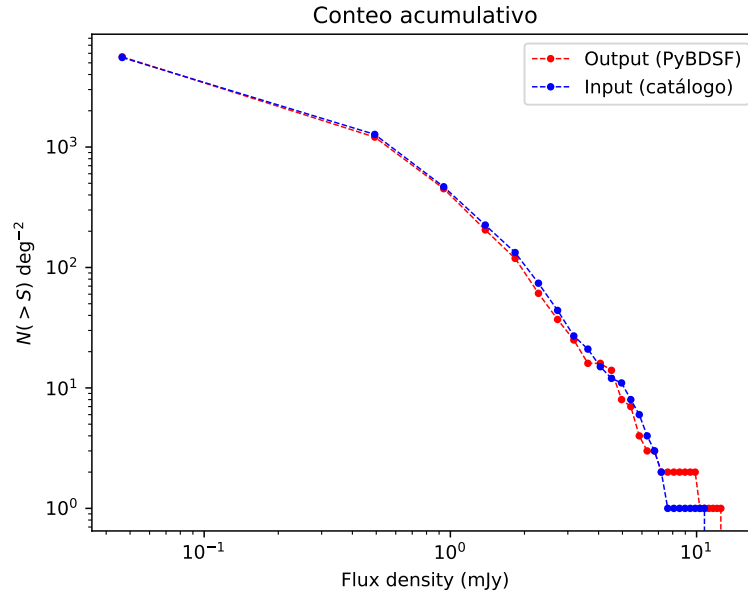


Figura 17: Comparación entre conteo acumulativo de los catálogos input y el recuperado con PyBDSF

En la figura 17 se muestra el conteo de fuentes acumulativo tanto para el catálogo input como output. Se observa que la rutina PyBDSF encuentra más fuentes con densidades de flujo

$$\sim 10mJy$$

de las que se insertaron en el mapa simulado. Esto podría deberse a la configuración en los parámetros de búsqueda en la rutina. De igual forma, no se han incluido barras de error en

las gráficas, lo que podría aliviar la aparente discrepancia en la comparación.

5. Discusión de resultados y conclusiones

El objetivo principal del proyecto fue simular un mapa de gran área (1 grado cuadrado) observado en la banda de 1.1mm que ayudara a generar las primeras herramientas de análisis de datos que se observarán pronto en la misma banda por los instrumentos de continuo de GTM. El trabajo se realizó utilizando librerías de Python que facilitaron la realización del mismo.

El primer paso de la simulación del mapa fue considerar una forma de haz (PSF) gaussiana para las fuentes puntuales (sección 4.1), pero ya que este es simplemente una aproximación al lóbulo central del disco de Airy (sección 3.1), debe considerarse la posible desviación en la validez de los resultados finales. Sin embargo, esta aproximación permitió el uso de funciones más simples para la caracterización y el análisis de la resolución angular y posteriormente, para la densidad de flujo. Como trabajo a futuro queda repetir este análisis con un PSF de la forma del patrón de Airy, el cual se espera sea más realista.

El siguiente paso fue convolucionar el mapa de fuentes puntuales (deltas) con el haz gaussiano para producir un mapa observado a la resolución angular de GTM y considerando diferentes densidades de flujo (sección 4.2). De esta manera la densidad de flujo de una fuentes puntual (delta) se distribuye como la forma del haz de telescopio. Posteriormente se generó el código para recuperar la densidad de flujo de cada una de ellas dada la convolución. Para fotometría de apertura se encontró que el radio mínimo para el cual se recupera el $\sim 100\%$ del flujo fue $\sim 3.5\sigma$, con lo que de manera preliminar consideramos que si una fuente se encuentra a dos veces esta distancia (es decir $\sim 7\sigma$) de otra fuente puede considerarse como aislada. Pero al realizar este análisis con dos fuentes idénticas, vemos que este límite disminuye a $\sim 5.89\sigma$ para recuperar el 100 % del flujo (línea amarilla en la figura 10). Si consideramos el recuperar solo el 90 % del flujo podemos integrar hasta $2.35\sigma = 1FWHM$ antes de comenzar a integrar el flujo de la fuente vecina (línea verde en la figura 10). Si tomamos esto último como límite para definir a una fuente aislada, la distancia que debe tener una fuente a otra para considerarse como tal debe ser 4.71σ o $\sim 2FWHM$.

En el caso del ajuste gaussiano los datos de coordenadas y flujo fueron las más exactas y el problema de la multiplicidad no es significativo. Pero debe considerarse que en este trabajo se realizó con un mapa de solo dos fuentes. Este detalle es importante a considerar en un mapa de mayor tamaño con una gran cantidad de fuentes, puesto que el costo computacional puede aumentar considerablemente si no es optimizado de la manera adecuada, análisis que no se estudió en este trabajo.

Por simplicidad, se supuso que el ruido instrumental seguiría una distribución gaussiana y que se sumaría de manera directa al mapa de fuentes previo. Al realizar fotometría de apertura en cada una de las fuentes con ruido, se recuperó de manera satisfactoria la mayoría de

flujos dentro de un margen considerable como bueno, esto es, mayor al 90 %. Como trabajo a futuro queda realizar la estimación de las coordenadas de cada una de las fuentes previo a la fotometría de apertura. Esto se realizará mediante la utilización de programas como PyBDSF o bien creando un código a la medida de las necesidades.

Finalmente, considerando catálogos de fuentes obtenidos mediante la colaboración de TolTEC los cuales se crearon bajo un contexto cosmológico y condiciones observacionales realistas, se produjo una rutina para calcular el conteo de fuentes. Se encontró una discrepancia entre los conteos de fuentes del catálogo de entrada y del catálogo de salida en el régimen de altas densidades de flujo. Esto podría deberse a los parámetros utilizados en la búsqueda de fuentes que se introducen en PyBDSF. Cabe resaltar que no se agregaron barras de error, lo que podría aliviar la discrepancia, así que el cálculo de estas queda como trabajo a futuro, así como la consideración de los posibles sesgos de los censos. Una vez terminado el código se podrá aplicar a las observaciones hechas con TolTEC/MUSCAT en GTM para caracterizar los diferentes censos.

Referencias

- A. W. Blain, I. Smail, R. J. Ivison, J. P. Kneib, and D. T. Frayer. Submillimeter galaxies. *Physics Reports*, 369(2):111–176, Oct. 2002. 10.1016/S0370-1573(02)00134-5.
- C. M. Casey, D. Narayanan, and A. Cooray. Dusty star-forming galaxies at high redshift. *Physics Reports*, 541(2):45–161, 2014. ISSN 0370-1573. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.02.009>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157314000477>. Dusty star-forming galaxies at high-redshift.
- D. L. Clements, W. J. Sutherland, R. G. McMahon, and W. Saunders. Optical imaging of ultraluminous IRAS galaxies: how many are mergers? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 279(2):477–497, Mar. 1996. 10.1093/mnras/279.2.477.
- S. M. Fall, S. Charlot, and Y. C. Pei. Cosmic Emissivity and Background Intensity from Damped Lyman-Alpha Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement*, 464:L43, June 1996. 10.1086/310081.
- E. Hecht. *Optics*. Always learning. Pearson, 2016. ISBN 9781292096933. URL <https://books.google.com.gt/books?id=Bv1RrgEACAAJ>.
- D. H. Hughes, S. Serjeant, J. Dunlop, M. Rowan-Robinson, A. Blain, R. G. Mann, R. Ivison, J. Peacock, A. Efstathiou, W. Gear, S. Oliver, A. Lawrence, M. Longair, P. Goldschmidt, and T. Jenness. High-redshift star formation in the Hubble Deep Field revealed by a submillimetre-wavelength survey. , 394(6690):241–247, July 1998. 10.1038/28328.
- H. Lundén. *Nonlinear materials for optical power limiting : characterization and modelling*. 05 2019. ISBN 9789176851135. 10.3384/diss.diva-156612.
- G. Patanchon, P. A. R. Ade, J. J. Bock, E. L. Chapin, M. J. Devlin, S. R. Dicker, M. Griffin, J. O. Gundersen, M. Halpern, P. C. Hargrave, D. H. Hughes, J. Klein, G. Marsden, P. Mauskopf, L. Moncelsi, C. B. Netterfield, L. Olmi, E. Pascale, M. Rex, D. Scott, C. Semisch, N. Thomas, M. D. P. Truch, C. Tucker, G. S. Tucker, M. P. Viero, and D. V. Wiebe. Submillimeter Number Counts from Statistical Analysis of BLAST Maps. , 707(2):1750–1765, Dec. 2009. 10.1088/0004-637X/707/2/1750.
- K. Rossmann. Point spread-function, line spread-function, and modulation transfer function: tools for the study of imaging systems. *Radiology*, 93(2):257–272, 1969.
- D. B. Sanders and I. F. Mirabel. Luminous infrared galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 34(1):749–792, 1996. 10.1146/annurev.astro.34.1.749. URL <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.34.1.749>.
- K. S. Scott, J. E. Austermann, T. A. Perera, G. W. Wilson, I. Aretxaga, J. J. Bock, D. H. Hughes, Y. Kang, S. Kim, P. D. Mauskopf, D. B. Sanders, N. Scoville, and M. S. Yun. AzTEC millimetre survey of the COSMOS field - I. Data reduction and source catalogue. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 385(4):2225–2238, Apr. 2008. 10.1111/j.1365-2966.2008.12989.x.

- K. S. Scott, M. S. Yun, G. W. Wilson, J. E. Austermann, E. Aguilar, I. Aretxaga, H. Ezawa, D. Ferrusca, B. Hatsukade, D. H. Hughes, D. Iono, M. Giavalisco, R. Kawabe, K. Kohno, P. D. Mauskopf, T. Oshima, T. A. Perera, J. Rand, Y. Tamura, T. Tosaki, M. Velazquez, C. C. Williams, and M. Zeballos. Deep 1.1 mm-wavelength imaging of the GOODS-S field by AzTEC/ASTE – I. Source catalogue and number counts. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405(4):2260–2278, 07 2010. ISSN 0035-8711. 10.1111/j.1365-2966.2010.16644.x. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16644.x>.
- M. W. L. Smith, E. Ibar, S. J. Maddox, E. Valiante, L. Dunne, S. Eales, S. Dye, C. Furlanetto, N. Bourne, P. Cigan, R. J. Ivison, H. Gomez, D. J. B. Smith, and S. Viaene. The Herschel-ATLAS Data Release 2, Paper I. Submillimeter and Far-infrared Images of the South and North Galactic Poles: The Largest Herschel Survey of the Extragalactic Sky. *The Astrophysical Journal Supplement*, 233(2):26, Dec. 2017. 10.3847/1538-4365/aa9b35.