Universiteit
Leiden
The Netherlands

Mid-infrared spectroscopy of starbursts : from Spitzer-IRS to JWST-MIRI

Martínez-Galarza, J.F.

Citation
Martínez-Galarza, J. F. (2012, June 19). *Mid-infrared spectroscopy of starbursts : from Spitzer-IRS to JWST-MIRI*. Retrieved from https://hdl.handle.net/1887/19113

Version:	Corrected Publisher's Version
License:	Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden
Downloaded from:	https://hdl.handle.net/1887/19113

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page

Universiteit Leiden

The handle http://hdl.handle.net/1887/19113 holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Martínez-Galarza, Juan Rafael
Title: Mid-infrared spectroscopy of starbursts : from Spitzer-IRS to JWST-MIRI
Date: 2012-06-19

Resumen en Español

Muchas de las espectaculares imágenes obtenidas hoy en día por los grandes telescopios profesionales, que nos deslumbran en las páginas de las revistas científicas y en los documentales de televisión, tienen su orígen en procesos relacionados con las vidas de las estrellas. Desde su nacimiento en medio de densas nubes de gas y polvo interestelar que dan lugar a masivos cúmulos de estrellas, hasta sus cataclísmicos finales en explosiones colosales llamadas supernovas, que en lapsos de tiempo de tan sólo unos cuantos días pueden llegar a ser tan brillantes como galaxias enteras, los procesos físicos detrás de estos fenómenos no sólo agregan belleza a las imágenes astronómicas, sino que además esconden los secretos sobre cómo la vida de las estrellas está relacionada con la evolución del Universo como un todo.

Esta tesis indaga sobre un aspecto particular de este complejo entramado: la influencia que la radiación proveniente de jóvenes estrellas masivas tiene en el medio interestelar a partir del cual se forman, tal como se deduce de las observaciones hechas con telescopios infrarrojos. En las páginas de esta tesis, ideamos un método certero y robusto para combinar observaciones infrarrojas de regiones de formación estelar con predicciones teóricas. El objetivo es avanzar hacia la comprensión de cómo la interacción entre las estrellas y el medio interestelar puede enseñarnos acerca de la física de la formación de estrellas masivas en el Universo.

Estrellas masivas y su relación con el medio interestelar

La mayoría de las estrellas en una galaxia se forma a partir del colapso gravitacional de una gigante nube de gas molecular, que sucede en escalas de tiempo de cientos de miles de años. Uno de los posibles resultados de este proceso, y tal vez uno de los más espectaculares, es el surgimiento de asociaciones estelares cuyas masas son del orden de cientos de miles de veces la masa de nuestro Sol. Las estrellas más masivas en estas jóvenes aglomeraciones pueden contener individualmente la masa de 100 soles juntos, y emitir intensos campos de radiación y vientos estelares que interactúan notablemente con el gas y el polvo restantes en la nube primigenia de la cual se formaron. La región de formación estelar conocidad como la Nebulosa Tarántula (o 30 Dorado), que estudiaremos en el **Capítulo 2**, es un ejemplo impresionante de esta interacción. (Ver Figura 1).

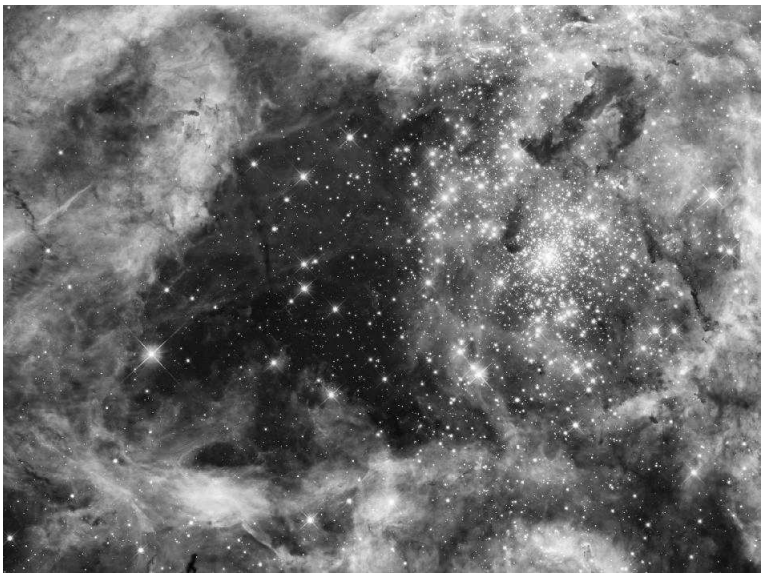

Figure 1 La región de formación estelar masiva 30 Doradus, en la Gran Nube de Magallanes, fotografiada con el Telescopio Espacial Hubble (crédito NASA).

Una parte de la radiación emitida por dichas estrellas ioniza el gas cercano, produciendo la viva gama de colores capturada por los telescopios en las llamadas regiones H II de hidrógeno ionizado. Otra parte de la radiación es absorbida por partículas de polvo en el entorno, que se calientan y brillan en luz infrarroja que podemos detectar con telescopios modernos. Además, la presión mecánica de la radiación estelar, así como las violentas explosiones en las que estrellas más grandes y menos longevas encuentran su fin, comprimen el material interestelar, y pueden incluso producir el colapso de nubes moleculares vecinas, iniciando un nuevo episodio de formación estelar. Todos estos procesos modifican el entorno galáctico, y tienen una influencia en la subsiguiente evolución de las galaxias donde tienen lugar. Entenderlos y cuantificarlos es por tanto uno de los grandes retos de la astronomía actual, y uno de los objetivos de esta tesis.

Estrellas Masivas y Formación Estelar Reciente

Las estrellas que hacen parte asociaciones estelares como la de la Figura 1, nacen todas de manera casi simultánea y con diversas masas individuales. Sin embargo, sólo aquellas estrellas cuya masa es unas cuantas veces la masa del Sol (o más), tienen una influencia notable en el medio interestelar. De hecho, en las regiones donde se forman estas asociaciones, casi toda la luz que detectamos proviene de estrellas masivas, que aunque son mucho menos numerosas que las estrellas de baja masa, son miles de veces más luminosas, y por tanto dominan el presupuesto energético. Pero estas estrellas masivas son

también las primeras en morir, pues agotan su combustible en tan sólo unos pocos millones de años, en comparación con los miles de millones de años que puede vivir una estrella de baja masa como el Sol. Por lo tanto, al estudiar el gas ionizado y el polvo calentado por la luz de estrellas masivas en una región particular de una galaxia, estamos sondeando objetos que se formaron hace menos de 10 millones de años (una etapa de tiempo corta en términos cósmicos), y por lo tanto estamos investigando la historia reciente de formación estelar en dicha región.

Starbursts

Podemos cuantificar el ritmo con el cual se forman estrellas en una región particular midiendo por ejemplo la cantidad de luz infrarroja emitida por el polvo caliente[1]. También podemos medir la cantidad de luz emitida por átomos que han sido ionizados por el intenso campo de radiación de las estrellas jóvenes. Dichas cantidades de luz (o luminosidades) pueden ser interpretadas en términos de cantidades físicamente más intuitivas. Por ejemplo, podemos interpretar la luminosidad infrarroja de una región de formación estelar en términos de la cantidad promedio de gas molecular que ha sido convertida en estrellas cada año. Puesto que las estrellas masivas responsables del calentamiento del polvo tienen períodos de vida muy cortos, esta medida nos da una idea del ritmo *actual* con el que se forman estrellas en una región del Universo. Por ejemplo, nuestra galaxia, la Vía Láctea, forma estrellas a un ritmo aproximado de 1 masa solar por año. En otras palabras cada año, en promedio nace una nueva estrella con la masa del Sol en nuestra galaxia.

Podemos inferir esta *Rata de Formación Estelar* (RFE) en varias regiones del Universo midiendo la luz infrarroja emitida por distintas galaxias. Al hacerlo, rápidamente notamos que no todas las galaxias forman estrellas al mismo ritmo. Una considerable cantidad de objectos tienen RFE de decenas, cientos, e incluso miles de veces la RFE de nuestra galaxia, lo cual se traduce en altísmas luminosidades infrarrojas. De hecho, a medida que nos alejamos de nuestra galaxia, y estudiamos regiones más distantes del Universo, vemos que la fracción de objetos con alta formación estelar, que llamamos *starbursts*, es cada vez mayor. En la actualidad no está totalmente claro por qué estos starbursts forman estrellas a ritmos tan altos. Sabemos que para que esto suceda, grandes cantidades de gas deben ser transportadas, en períodos de tiempo cortos, a regiones relativamente pequeñas de una galaxia. Sin embargo, los procesos que hacen posible este transporte no tienen una explicación definitiva, como tampoco la tienen las etapas de formación estelar sucesivas que pueden desencadenarse por la interacción de estrellas jóvenes con el medio interestelar.

Espectroscopia Infrarroja de Regiones de Formación Estelar

Para intentar encontrar algunas respuestas al fenómeno de los starbursts, en las últimas dos o tres décadas los astrónomos han comenzado a estudiar el Universo en longitudes de onda infrarrojas. Son varias las razones por las cuales estudiamos regiones de formación estelar usando este tipo de luz. Primero, dichas regiones son brillantes en el infrarrojo

[1] Asumiendo, por supuesto, que otros procesos que pueden calentar el polvo, y que no están relacionados con formación estelar, son marginales.

Figure 2 El núcleo de la galaxia NGC 1097 contiene un intenso anillo starburst, visible en esta fotografía infrarroja obtenida con el Telescopio Espacial Spitzer. Este es uno de los objectos que estudiamos en el **Capítulo 4**. (crédito NASA).

debido a la emisión térmica del polvo, como hemos discutido. Pero además, las densas regiones de polvo y gas detrás de las cuales ocurre el proceso de formación estelar, opacas para la luz normal, son transparentes para la luz infrarroja. Por lo tanto, la luz detectada por nuestros telescopios infrarrojos logra atravesar las compactas cortinas de gas y polvo, y alcanzarnos desde las zonas profundas donde nacen nuevas estrellas. Además de las fotografías digitales obtenidas con detectores especialmente diseñados para registrar luz infrarroja, y que revelan la estructura física de la distribución de polvo y material molecular (ver Figura 2), una de las técnicas más sofisticadas usadas por los astrónomos hoy en día es la espectroscopía infrarroja.

Para entender de qué se trata, podemos imaginar los colores del arcoiris. De la misma manera en que podemos tomar un prisma y descomponer la luz del Sol en los colores del arcoiris (el espectro de la luz visible), es posible también obtener un espectro de la luz infrarroja proveniente de los cuerpos astronómicos, usnado instrumentos apropiados. En el caso particular de las zonas de formación estelar, los espectros infrarrojos son de gran utilidad, ya que revelan la distribución de energía con la cual los componentes del medio interestelar emiten su radiación, ofreciendo, para quien pueda interpretarlos, una descripción de las condiciones físicas en dichas regiones. Algunos de los componentes que emiten luz infrarroja y pueden ser identificados en el espectro son el gas atómico, las partículas de polvo y algunas moléculas basadas en carbono, típicas de estos ambientes, llamadas hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs). El análisis de estos espectros permite derivar importantes parámetros físicos de la región, tales como la RFE, la presión

del gas contra la cual trata de abrirse paso la radiación estelar, o la cantidad de estrellas jóvenes que aún están cubiertas por los gruesos envoltorios de gas de los cuales se formaron.

Los espectros infrarrojos son obtenidos con instrumentos especiales abordo de los telescopios. Para interpretarlos correctamente y asignarles un significado físico en el contexto de la formación estelar y su relación con el medio interestelar, los espectros deben ser comparados con modelos teóricos que predicen su intensidad y distribución de energía. La labor no es fácil, pues condiciones físicas diferentes pueden dar lugar a espectros muy semejantes, generando interpretaciones confusas o contradictorias. Además, la mayoría de starburst son objetos lejanos en cuya estructura no podemos diferenciar las estrellas masivas del gas ionizado y el polvo, pues todo aparece muy junto en las imágenes obtenidas. Un método robusto y preciso es necesario para asignar valores confiables a los parámetros físicos de starburst lejanos, y así investigar las verdaderas condiciones de la materia en estos objetos.

Un método Bayesiano para interpretar espectros infrarrojos

En la primera parte de esta tesis (Capítulos 2, 3 y 4) desarrollamos un nuevo método para la interpretación de espectros infrarrojos de starbursts, que arroja resultados inequívocos para los parámetros físicos de estos objetos, y les asigna incertidumbres cuantificables y estadísticamente apropiadas. El método usa estadística Bayesiana[2] para estimar la probabilidad de que ciertos parámetros (el ritmo de formación estelar, por ejemplo), tengan un valor determinado. El método Bayesiano permite incluir en la evaluación de las probabilidades cualquier nueva evidencia obtenida (experimental o teóricamente) sobre los parametros físcios. Intuitivamente, lo que esto quiere decir es que el investigador puede actualizar en cualquier momento el nivel de convicción con que cree en el resultado de un modelo, al incluir nueva evidencia en su análisis. El método ofrece resultados reproducibles y muchos menos confusos que aquellos obtenidos por comparación directa del espectro con las predicciones. En esta tesis aplicamos el método a espectros obtenidos principalmente con el Telescopio Espacial Spitzer. A continuación describimos brevemente los capítulos del presente trabajo.

Capítulo 2

Presentamos nuestro método y lo calibramos usando una región gigante de formación estelar: 30 Dorado, en la cercana Gran Nube de Magallanes (Figura 1). Esta región ofrece dos ventajas: ha sido estudiada en detalle por varios autores y además está lo suficientemente cercana para identificar componentes individuales del sistema (estrellas masivas, gas, polvo, etc.) y relacionarlas con características particulares del espectro infrarrojo. Este primer capiítulo arroja varios resultados. Primero, reportamos el éxito de nuestro método en reproducir las condiciones físicas en 30 Dorado. Además, mostramos que al incluir en nuestr análisis las lineas espectrales generadas a causa de la absorción de luz estelar por gases atómicos en el medio interestelar, reducimos las incertidumbres de

[2]Nombrada en honor de Thomas Bayes (1701-1761), un clérigo y matemático inglés que la formuló por primera vez.

varios parámetros, logrando resultados más precisos que con otros métodos. Finalmente, también descubrimos que el espectro de 30 Dorado es compatible con la presencia de una componente considerable de jóvenes estrellas aún envueltas en sus nubes primigenias. Esto indica una gran cantidad de formación estelar sucediendo actualmente en esta región.

Capítulo 3

Luego de 30 Dorado, la más cercana región gigante de formación estelar es NGC 604, localizada en la galaxia del Triángulo. En este capítulo estudiamos sus condiciones físicas usando nuestro método, combinado con varias observaciones infarrojas, ópticas, y de rayos-X. El resultado principal es el descubrimiento de masivos cúmulos infrarrojos compactos y calientes, donde se están formando actualmente nuevas estrellas, lo cual sugiere que episodios anteriores de formación estelar han desencadenado nuevos eventos en épocas muy recientes. Además nuestro método indica que el starburst NGC 604 está en un estado evolutivo más avanzado que su hermana mayor, 30 Dorado, lo cual no es impedimento para que siga formando estrellas activamente.

Capítulo 4

En este capítulo usamos nuestro método en la interpretación de los espectros infrarrojos de starbursts más grandes y lejanos, ubicados en las zonas nucleares de algunas galaxias en el Universo Local, como el de la Figura 2. La experiencia obtenida en los capítulos precedentes nos permite identificar ciertas tendencias en los condiciones físicas de estos starbursts. Por ejemplo, encontramos evidencia preliminar de que los starburst con mayor combustible de gas molecular, y que por tanto tienen RFE más altas, no son necesariamente los que forman las aglomeraciones estelares más masivas. Por el contrario, estas últimas parecen formarse en zonas con baja RFE. Encontramos también que los starbursts con aglomeraciones estelares más grandes tienden a contener una mayor contribución por parte de estrellas muy jóvenes, aún envueltas en densas capas de polvo. Sin embargo, sólo con un estudio más extenso sería posible inferir una relación entre episodios anteriores de formación estelar, y estos eventos recientes.

Capítulos 5 y 6

Aún cuando nuestros métodos de análisis se hacen cada vez mejores, seguimos limitados en este tipo de investigaciones por la sofisticación y el tamaño de nuestros telescopios. Por lo tanto, sólo mejores observatorios nos permitirán seguir avanzando en la comprensión de la formación de estrellas masivas en el Universo. Al final de esta década, un nuevo y poderoso telescopio infrarrojo será enviado al espacio por las agencias espaciales de Estados Unidos, Europa y Canadá. El Telescopio Espacial James Webb tendrá un espejo principal de 6.5 m d diámetro, y será por lo tanto el más grande telescopio infrarrojo construído hasta la fecha. Uno de los instrumentos que llevará a bordo será el espectrómetro del infrarrojo medio, o MIRI, que se compone de una cámara y un espectrómetro. MIRI estudiará los starbursts y otras regiones de formación estelar con un detalle y sensibiidad nunca vistas.

Figure 3 El Telescopio Espacial James Webb (JWST) estudiará regiones de formación estelar con un detalle nunca visto. Los **Capítulos 5 y 6** están dedicados al espetrómetro infrarrojo abordo de JWST. (crédito NASA).

La segunda parte de esta tesis, que contiene los dos últimos capítulos, está dedicada a MIRI. Este instrumento ha sido construído en Europa, con una participación crucial de los Países Bajos. El autor tomó parte activa en la calibración final del instrumento, que fue realizada en el Laboratorio Rutherford Appleton, en Oxford, Reino Unido. En esta parte de la tesis se describe el funcionamiento del instrumento y la calibración del espectrómetro. Específicamente, se describe el método utilizado para la calibración de la longitud de onda y se aplica este método a los datos obtenidos durante las pruebas realizadas al instrumento. Los resultados indican que MIRI logrará una resolución espectral al menos diez veces mejor que su predecesor, el espectrómetro abordo de Spitzer. Esto significa un gran avance en nuestras capacidades observacionales, y una nueva ventana para estudiar la formación de estrellas masivas en un futuro cercano.