



INAOE

Búsqueda IR de *starburst* y del toroide de polvo oscurecedor en QSO

Por

M. Sc. Mariela Martínez Paredes

Tesis sometida como requisito parcial para obtener
el grado de

Doctora en la especialidad de Astrofísica

en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Tonantzintla, Puebla

Supervisada por:

Dra. Itziar Aretxaga (INAOE),

Dra. Almudena Alonso Herrero

(IFCA, Instituto de Física de Cantabria, España)

©INAOE 2016

Derechos reservados

La autora otorga al INAOE el permiso de reproducir y
distribuir copias de esta tesis en su totalidad o en partes



Resumen

Con el propósito de estudiar la contribución estelar y de un toroide de polvo nuclear a la emisión nuclear ($\lesssim 1$ kpc) en el cercano y mediano IR (2-20 μm) de cuásares (QSO, del inglés *Quasi Stellar Object*) hemos realizado observaciones en el Gran Telescopio CANARIAS de 10.4 m (GTC) de 20 QSO cercanos ($z < 0.1$) y utilizado, además, toda la información IR de alta resolución angular ($\sim 0.3''$) disponible en la literatura (por ejemplo datos del Telescopio Espacial *Hubble* y los espectros de *Spitzer*/IRS) y con estos datos IR hemos restringido los modelos *clumpy* del toroide de polvo propuestos por Nenkova et al., los cuales describen al toroide como una distribución de grumos de nubes en terminos de seis parámetros libres (la anchura angular σ_{torus} , la extensión radial Y , el número de nubes a lo largo de radio ecuatorial N_0 , la distribución radial q , la profundidad óptica τ_V y el ángulo de visión i).

Dada la aproximación *clumpy* del toroide, diferentes temperaturas del polvo pueden coexistir a la misma distancia del mecanismo central, y esto hace que los diferentes parámetros del modelo sean mejor o peor restringidos por las diferentes regiones de la distribución espectral de energía (SED, del inglés *Spectral Energy Distribution*). Hemos comenzado nuestro estudio buscando el conjunto mínimo de datos IR necesarios para restringir los modelos *clumpy*, en galaxias Seyfert, que tienen una cobertura de sus SED mayor que la de los QSO por su cercanía, encontrando que está formado por dos puntos fotométricos en el cercano IR (entre J, K, H y L, M) más el espectro nuclear en la banda N. Además, diferentes regiones de la SED son necesarias para restringir diferentes parámetros del modelo. Por ejemplo, la espectroscopía nuclear en el mediano IR (8-13 μm) sólo restringe de manera confiable el número de nubes a lo largo del radio ecuatorial del toroide (N_0) y la profundidad óptica de sus nubes de polvo (τ_V). Estos resultados han sido extrapolados al estudio de una galaxia IR ultraluminosa, así como al de los QSO, para saber con que confianza están siendo restringidos los parámetros en estas clases de galaxias activas.

Para restringir de manera confiable los parámetros del modelo *clumpy*, también es

importante que la emisión fotométrica y espectroscópica utilizada sea únicamente emisión de polvo calentado por el AGN. Se sabe de trabajos previos reportados en la literatura que la emisión óptica y del cercano IR en los QSO es predominantemente no resuelta, por lo tanto, aún con datos de alta resolución angular es difícil separar la emisión marginalmente extendida que no está asociada con la emisión del polvo del toroide en los QSO. En esta tesis hemos comenzado por analizar la emisión del mediano IR (Si2, $8.7 \mu\text{m}$) de una ULIRG, llamada UGC 5101, que presenta una clara emisión extendida tanto en el óptico como en el cercano y mediano IR para probar nuestra metodología. A partir del análisis de la emisión IR en imagen y espectroscopía de UGC 5101 encontramos que la emisión no resuelta en el mediano IR (a 8.7 y $12 \mu\text{m}$) contribuye $\sim 60\%$ a la emisión de la galaxia y que la profundidad de la región de los silicatos es bien reproducida con un alto factor de cubrimiento geométrico ($f_2 \sim 0.9$) y extinción ($A_V \sim 32 \text{ mag}$), los cuales son consistentes con un AGN fuertemente embebido.

Del análisis de la emisión en el mediano IR de los QSO hemos encontrado que la mayoría de ellos están dominados por emisión no resuelta, excepto IZw1. Al comparar el espectro de IRS/*Spitzer* con el espectro nuclear de CC/GTC de cada QSO observamos que dentro de las incertidumbres la formas espectrales son similares. Por lo tanto, hemos aprovechado la gran señal a ruido y rango espectral cubierto por los espectros de IRS/*Spitzer* y los hemos descompuestos en sus contribuciones estelares (pasivas y starburst) y de AGN. A partir de estas descomposiciones hemos encontrado que la contribución de la emisión nuclear estelar es menor al 20% , lo cual es consistente con una emisión en el mediano IR predominantemente no resuelta.

Hemos utilizado la emisión no resuelta del cercano IR y la contribución del AGN obtenida de la descomposición espectral para restringir los modelos del toroide de polvo *clumpy* de Nenkova et al. Para la mayoría de los QSO en la muestra encontramos que los modelos del toroide *clumpy* son bien restringidos por los datos observacionales. A partir de estos ajustes encontramos que cinco de los seis parámetros libres (Y , N_0 , q , τ_V e i) son estadísticamente diferentes de los de las Seyfert 1, y sólo la distribución angular de las nubes de polvo σ_{torus} muestra una distribución estadísticamente similar. Sin embargo, la probabilidad de escape (P_{esc}), la cual depende del ángulo de visión (i), del número de nubes (N_0) y la anchura angular (σ_{torus}), así como el factor de cubrimiento geométrico (f_2) son consistentes con los valores encontrados para las Seyfert 1, de manera que, aunque el toroide de polvo en los QSO es intrínsecamente diferente del de las Seyfert 1, la combinación de sus propiedades físicas (profundidad óptica τ_V) y geométricas, en ambas clases de AGN, son consistentes con la clasificación en el óptico y con el esquema unificado como

AGN tipo 1. Además, las luminosidades bolométricas predichas por el modelo son consistentes dentro de las incertidumbres con las obtenidas observacionalmente de los rayos-X.

También hemos analizado el cociente de luminosidad del mediano IR ($12\ \mu\text{m}$) al óptico ($L_{12\ \mu\text{m}}/L_B$) como una función del índice espectral IR (α , $5\text{--}16\ \mu\text{m}$) según el esquema evolutivo propuesto por Haas et al., en el cual objetos con un alto cociente de luminosidad e índice espectral más rojo son QSO jóvenes en los que el AGN se encuentra aún oscurecido por el polvo circundante, mientras que los objetos con un bajo cociente de luminosidad e índice espectral más azul son QSO más evolucionados. Sin embargo, en nuestro análisis no hemos encontrado ninguna correlación entre estas dos cantidades, de hecho, hemos observado que uno de los QSO en nuestra muestra que presenta parámetros (P_{esc} y f_2) consistentes con los de las ULIRGs y Seyfert 2 también es consistente con un AGN geoméricamente oscurecido por el toroide de polvo. Por lo tanto, datos de alta resolución angular en la banda Q ($18\ \mu\text{m}$), así como en el cercano IR (banda H de NICMOS/HST), serían necesarios para restringir con mayor confianza la extensión radial del toroide y el ángulo de visión en los QSO, y de esta manera poder discriminar entre los dos escenarios.

Abstract

In order to study the contribution to the nuclear near- and mid-IR emission in Quasi Stellar Objects (QSO) of stars and a dusty torus in the central regions, we have defined a sample of 20 nearby QSO ($z < 0.1$) and obtained high angular resolution data with the 10.4 m Gran Telescopio CANARIAS and complemented it with ancillary data. We have analyzed and used these IR data to constrain the *clumpy* dusty torus models, which describe the torus as a clumpy distribution of clouds through six free parameters (the angular width σ_{torus} , radial extension Y , number of clouds along the equatorial ray N_0 , radial density distribution q , optical depth τ_V and viewing angle i).

Different dust temperatures coexist at the same distance of the central mechanism, and as a consequence, different parameters of the clumpy model will be more or less constrained by different regions of the SED, which are representative of the warm and cold dust in the torus. We have started our study by looking for the minimal IR data set required to constrain the clumpy torus models using Seyfert galaxies, which have much more available data than QSO due to their closeness. We find that the minimal IR data set should be composed of two photometric points in the near IR (J, H, K or L, M) plus the nuclear mid-IR spectrum. In addition, we find that different regions of the SED are necessary to constrain different parameters of the model, for example, the nuclear spectroscopy in the mid-IR ($8 - 13 \mu\text{m}$) only constrains the number of clouds and the optical depth. These results have been extrapolated to the study of the QSO and the ULIRG UGC 5101.

In order to constrain the clumpy dusty torus parameters, it is also important to ensure that the analysis is performed on the emission due to dust heated by the AGN. It is well known that the optical and near-IR emission in QSO is mostly unresolved, however, even with high angular resolution data, it is difficult to separate the extended and unresolved components. In this thesis we have started analyzing the mid-IR emission (Si2, $8.7 \mu\text{m}$) of a ULIRG, called UGC 5101, that shows important optical and near-IR extended emission, as a way to probe our methodology. We find that the unresolved component in UGC 5101 contributes $\sim 60\%$ to the integrate

emission of galaxy at mid-IR (Si2 band) and that the silicate absorption feature is well reproduced with a high geometrical covering factor ($f_2 \sim 0.9$) and foreground extinction ($A_V \sim 32$ mag), which are consistent with a strongly embedded AGN.

Taking into account the previous results, we analyze the mid-IR nuclear emission at Si2 band in QSO and find that the nuclear mid-IR emission is unresolved in all QSO, except for IZw1. Comparing the IRS/*Spitzer* spectrum with the nuclear CC/GTC spectrum we observe that, within the uncertainties, the spectral shape is similar. Therefore, we take advantage of the high signal to noise and large spectral range offered by the IRS/*Spitzer* spectrum to decompose it into its stellar (passive and starburst) and AGN components. We find that the stellar component contributes only 20 % of the galaxy emission at mid-IR ($12 \mu\text{m}$), which is consistent with the predominantly unresolved emission observed in imaging.

We use the near-IR unresolved emission plus the stellar subtracted IRS/*Spitzer* spectrum to constrain the clumpy dusty torus of Nenkova et al using a Bayesian approximation. We find that the SED and spectroscopy are well modeled in all QSO, and that five of the six free parameters (Y , N_0 , q , τ_V and i) are statistically different from those in Seyfert 1s, with only the angular posterior distribution of the clouds (σ_{torus}) showing values statistically similar. However, the posterior distributions of the escape probability, P_{esc} (which is derived from the viewing angle i , the number of clouds along the line of sight N_{LOS} and σ_{torus}) and the covering factor (f_2) are consistent with the values derived for Seyfert 1s. Thus, although the dusty torus in QSO is intrinsically different from the dusty torus in Seyfert 1s, the combination of its physical and geometrical properties are consistent with the optical classification and unification scheme as a type 1 AGN. Furthermore, the bolometric luminosities predicted by the clumpy models are consistent with those obtained from X-ray data, within the uncertainties.

We have also analyzed the mid-IR to optical luminosity ratio ($L_{12\mu\text{m}}/L_B$) as a function of the infrared spectral index (α , $5 - 16 \mu\text{m}$), according to the evolutionary scheme proposed by Haas et al., in which objects with a high mid-IR to optical luminosity ratio and redder spectral index are younger than QSO with a low mid-IR to optical luminosity ratio and bluer spectral index. However, in our analysis we did not find any correlation between these two quantities. In fact, we notice that one object in our sample with escape probability and covering factor consistent with those obtained in Seyfert 2 and ULIRG, also presents obscuring properties (relative low $[\text{Ne V}] 14 \mu\text{m}/[\text{Ne V}] 24 \mu\text{m}$ ratio) consistent with an AGN geometrically obscured. From this analysis we conclude that high angular resolution at data at Q band ($18 \mu\text{m}$) will be necessary to better constrain the torus size in order to discriminate between

the two scenarios.