



Simulaciones en Rayos X de la Galaxia Circinus

X-ray simulations of the Circinus Galaxy

Carolina Andonie¹, alumna de 5° año
Claudio Ricci², profesor asistente
Ezequiel Treister¹, profesor asociado

¹Instituto de Astrofísica, Facultad de Física, Pontificia Universidad Católica de Chile

²Núcleo de Astronomía, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Diego Portales

*Autor para correspondencia: cpandonie@uc.cl

Carolina Andonie¹, 5th year student
Claudio Ricci², assistant professor
Ezequiel Treister¹, associate professor

¹Astrophysics Institute, Physics College, Pontificia Universidad Católica de Chile

²Astronomy Nucleus, College of Engineering and Sciences, Universidad Diego Portales

*Corresponding author: cpandonie@uc.cl

RESUMEN

En esta investigación se estudian modelos de distribución de gas y polvo del Núcleo Activo de Galaxia (AGN) que se encuentra en la Galaxia Circinus para tratar de reproducir por simulación los datos que fueron observados en rayos X. Previamente se descubrió que la distribución del polvo en el AGN de la Galaxia Circinus se puede explicar con un modelo a dos grandes componentes en escalas de parsec emitiendo en infrarrojo: un disco acampanado en el plano ecuatorial y una cáscara cónica perpendicular al disco. Esta cáscara cónica no es explicada con el actual Modelo Unificado de los AGN, por lo que es un gran motivo de interés. Los resultados de esta investigación indican que un modelo de distribución del gas que seguiría estas mismas componentes del modelo de distribución del polvo, usado para el infrarrojo, no permite reproducir los datos en rayos X de la Galaxia Circinus. Para reproducir los datos observados, se necesita distribuir el gas en un disco acampanado más grande, lo cual significa que el gas que compone el disco acampanado ocupa más volumen que el polvo.

Palabras claves: active galactic nuclei, galaxia circinus, rayos X, infrarrojo, reprocesor.

ABSTRACT

Within this paper, the gas and dust distribution models of the Active Galactic Nucleus (AGN) found in the Circinus Galaxy where studied in order to reproduce, through simulations, the X-ray observational data. It was previously shown that a two-component model could explain Circinus AGN dust distribution. These large components, in parsec scales, emit in the infrared and correspond to a flared disk, in the equatorial plane, and a conical shell perpendicular to the disk. The current unified model for AGN cannot explain this shell; thus, its study is of great interest.

The results herein suggest that a gas distribution model, following the aforementioned components for dust in the infrared, does not replicate the X-ray observational data for Circinus Galaxy. In order to accurately reproduce the observational evidence, the gas needs to be distributed across a larger flared disk, implying that the gas composing the disk occupies a larger volume than dust.

Keywords: active galactic nuclei, circinus galaxy, X-rays, infrared, reproprocessor.

1. INTRODUCCIÓN

Los agujeros negros son objetos muy densos, en los cuales la gravedad es lo suficientemente fuerte como para no dejar escapar ni materia ni radiación electromagnética. Debido a esto, los agujeros negros son invisibles y no pueden ser observados, por lo que una forma de detectarlos es estudiando el comportamiento de la materia alrededor de ellos (Genzel, Reinhard & Gillesen, 2010), el cual es afectado por la presencia del agujero negro.

Los agujeros negros tienen distintos tamaños; los más pequeños pueden tener el tamaño de un átomo y los más grandes, llamados **AGUJEROS NEGROS** supermasivos (SMBH), pueden tener un millón de veces la masa del sol (Genzel, Reinhard & Gillesen, 2010). No se tiene muy claro cómo se forman los agujeros negros, pero sí se sabe que los agujeros negros estelares, cuya masa es aproximadamente 20 veces la masa del sol, se forman al final de la vida de una estrella, cuando ésta colapsa y cae toda la materia en su centro (Genzel, Reinhard & Gillesen, 2010).

Hay ciertas galaxias que poseen un SMBH en su centro, en el cual se está acretando materia, es decir, la materia que está alrededor cae sobre el agujero negro, haciéndose éste más masivo. En algunos casos, la acreción es muy eficiente

1. INTRODUCTION

BLACK HOLES are very dense objects in which gravity is strong enough to trap matter and electromagnetic radiation. Thus, black holes are invisible and unable to be observed. However, a way to detect them is by studying the behavior of matter around them (Genzel, Reinhard & Gillesen, 2010), which is affected by the presence of the black hole.

Black holes can vary in size; where the smallest can be the size of an atom, and the largest, called supermassive **BLACK HOLES** (SMBH), can be a million times the mass of our sun (Genzel, Reinhard & Gillesen, 2010). The process by which black holes are formed is not entirely understood, but it is accepted that stellar black holes, whose mass is approximately 20 times the mass of our sun, form at the end of the life of a star, when it collapses and all the matter is drawn to its center (Genzel, Reinhard & Gillesen, 2010).

Certain galaxies possess a SMBH at their centers that can accrete material, meaning that the matter around the black hole is falling into it, making it larger. In some cases, accretion can be very efficient, thus generating great luminosity that cannot be explained by a group of stars. In such cases, the areas located at the center of these galaxies

y se produce una gran luminosidad, la cual no puede ser explicada solo por un conjunto de estrellas. En estos casos, estas zona ubicadas en el centro de algunas galaxias se llaman Núcleos Activos de Galaxias (AGN, por sus siglas en inglés).

Una característica muy importante de los AGN es que emiten en casi todo el **ESPECTRO** electromagnético (Elvis et al. 1994). En particular, hay dos bandas que pueden entregar información muy importante acerca de estos: los **RAYOS X** y el **INFRARROJO**. Por un lado, la banda infrarroja entrega una especie de fotografía de la distribución del polvo en los AGN (Feltre et al. 2012), ya que la principal emisión de infrarrojo es debida al polvo. Por otro lado, a través de los rayos X se pueden conocer las condiciones de la materia gaseosa que rodea el SMBH y los procesos físicos que están sufriendo estos fotones.

El modelo unificado de los AGN intenta explicar las distintas componentes de estos objetos, situando al toroide polvoriento (ver **Principio Científico** para más detalles) como el principal emisor de infrarrojo. Recientemente se ha descubierto que hay AGN que presentan una emisión extendida en infrarrojo, más allá del toroide polvoriento, que no se puede explicar con el modelo unificado (Asmus, Hönig & Gandhi, 2016). Una de estas galaxias es la Galaxia Circinus. Circinus se encuentra a 4.200.000 **PÁRSEC** (pc) de la Tierra, distancia que permite estudiar con detalle su AGN. Stalevsky, Asmus y Tristram (2017) hicieron un análisis de Circinus y concluyeron que el AGN de esta galaxia tiene dos componentes en escalas de pc que emiten

are called Active Galactic Nuclei.

A very important feature of AGN is that they emit in almost the entire electromagnetic **SPECTRUM** (Elvis et al. 1994). However, there are two bands that can be used to obtain crucial information about them; namely, **X-RAYS** and **INFRARED**. On the one hand, the infrared band corresponds to an image of dust distribution within the AGN, since the major source of infrared emission is dust (Feltre et al. 2012). On the other hand, the state of the gas material surrounding the SMBH and the physical processes to which those photons are subjected can be analyzed through X-ray emission.

The unified model of AGN tries to explain the different components of these objects by considering the dust torus as the main emission source of infrared radiation (see **Scientific Principle** for further detail). Recently, it has been found that some AGN show an extended infrared emission, beyond the dust torus that cannot be explained by the unified model (Asmus, Hönig & Gandhi, 2016). Circinus Galaxy (hereafter referred to as Circinus) is one such galaxy, located at 4,200,000 **PARSECS** (pc) from Earth, a distance that allows a detailed study of its AGN. Stalevsky, Asmus and Tristram (2017) analyzed Circinus and concluded that its AGN has two components in the pc scale that emit in infrared; thus, composed of dust: a flared disk, replacing the torus, and two conical shells perpendicular to the disk.

Seyfert 2 is the AGN of Circinus and has an inclination

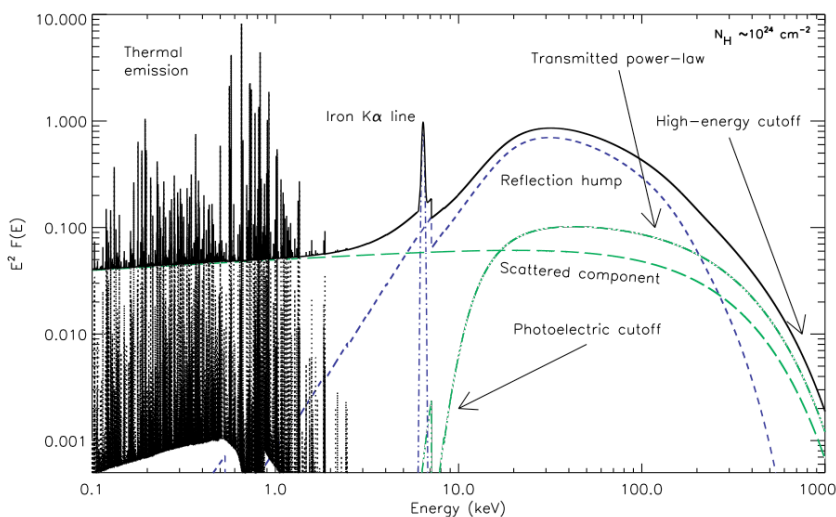


Figura 1. Espectro (Ricci, C. 2011) de un AGN con una densidad de partículas $n_H \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$. El gráfico muestra las diferentes componentes que conforman el espectro de un AGN con una alta densidad. El Reflection hump y la Iron K α line son características espectrales producto de la dispersión y fluorescencia entre los fotones de rayos X y las partículas del gas, las cuales conforman la componente reflejada. Se observa que la componente transmitida (Transmitted power-law en el gráfico) es mucho menor que la componente dispersada y reflejada.

Figure 1. Spectrum of an AGN with particle density $n_H \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$. (Ricci, C. 2011). The graph shows the different components of a high density AGN. The Reflection hump and Iron K α line are spectral characteristics produced by dispersion and fluorescence of the X-ray photons and the gas particles, which corresponds to the reflected component. Note that the transmitted component (Transmitted power-law) is significantly lower than the dispersed and reflected components.

en infrarrojo, es decir, que están compuestas de polvo: un disco acampanado que reemplaza al toroide y dos cáscaras cónicas, perpendiculares al disco acampanado.

El AGN de Circinus es Seyfert 2 y tiene un ángulo de inclinación de 87° , esto quiere decir que desde la Tierra se observa el AGN a través del disco acampanado. Por esto, los fotones tienen que atravesar todo el disco antes de ser detectados por los observatorios. Si el disco tiene una gran densidad de partículas, los fotones tienen más probabilidad de interactuar con la materia a través de procesos de **DISPERSIÓN DE COMPTON** y **FLUORESCENCIA**. Estudiando el **ESPECTRO** de un AGN se puede saber si dominan los fotones que llegan a los detectores sin interactuar con la materia (componente transmitida) o si dominan los fotones que sí hicieron interacción en el camino (componente dispersada y reflejada). En la **Figura 1** se observa un clásico espectro en rayos X de un AGN que tiene una alta densidad de gas, como Circinus. La componente reflejada (Iron $K\alpha$ line y Reflection hump) y la dispersada predomina con respecto a la componente transmitida (Transmitted power-law), debido a la gran densidad del toroide. La Iron $K\alpha$ line es una línea que siempre se observa en el espectro de un AGN. Esta se forma en procesos de fluorescencia, cuando un fotón de rayos X impacta un átomo de Hierro y luego este átomo emite un fotón de 6,4 keV.

La emisión de un objeto está modelada por la forma del emisor, independiente de la longitud de onda en la que se esté estudiando. El objetivo de este trabajo es averiguar si se puede reproducir el espectro de Circinus en rayos X usando el modelo propuesto en infrarrojo, es decir, si la distribución del gas en el AGN es igual a la del polvo. Este resultado sería de gran importancia ya que entrega información sobre cómo se relacionan el gas y el polvo, en las zonas del AGN en que ambos residen, lo que hasta ahora no se conoce. Además, si la emisión en rayos X de una cáscara cónica puede modelar los datos de Circinus, es un punto a favor al replanteamiento de la unificación de los AGN.

2. EXPERIMENTACIÓN

Para el modelo del AGN de Circinus se realizaron simulaciones usando el programa RefleX (Paltani C. & Ricci C. 2017). Este programa sigue a cada fotón y guarda cada proceso físico que sufrió al atravesar la materia, usando un algoritmo de ray-tracing. RefleX indica los fotones que no interactuaron con la materia y los que sí interactuaron, entregando la información de cuántas interacciones sufrieron y en qué parte del AGN. Las herramientas de RefleX que más se utilizaron fueron la creación de espectros y de imágenes.

Las simulaciones se basaron en el modelo en rayos X explicado en la **Figura 2**. Este modelo considera la geometría utilizada en el infrarrojo (componentes color

angle of 87° , meaning that from Earth the AGN is observed through the flared disk. Therefore, the photons have to cross the entire disk before being detected by observatories. If the disk has a high particle density, the photons have greater probability of interacting with the matter through the processes of Compton dispersion and **FLUORESCENCE**. By studying the spectrum of an AGN it can be determined if the photons reach the detectors without interacting with matter (transmitted component) or if the dispersed or reflected component of interacting photons are more prevalent. **Figure 1** shows the classic X-ray spectrum of an AGN with high gas density, such as Circinus. The reflected (Iron $K\alpha$ line and Reflection hump) and dispersed components are dominant compared to the transmitted component (Transmitted power-law), due to the high density of the torus. The Iron $K\alpha$ line is a feature always present in AGN spectra, and results from fluorescence when an X-ray photon impacts an Iron atom, which releases a 6.4 keV photon.

The shape of the emitter models the emission of an object, independent of the wavelength observed. The aim of this study was to replicate the X-ray emission spectrum of Circinus by using the proposed model for infrared emission; thus, assessing if the gas in the AGN and the dust have the same distribution. This result is of great importance, because it sheds light on how gas and dust interact in areas of AGN in which both reside, a subject currently unknown. Furthermore, if the X-ray emission by a conical shell can properly model Circinus observational data it would be a compelling argument to rethink the unified model of AGN.

2. EXPERIMENTATION

Simulations with the software RefleX were used to model the AGN x-ray emission of Circinus (Paltani C. & Ricci C. 2017). This software follows each photon and stores each physical process it underwent when crossing the material by using the ray-tracing algorithm. RefleX accounts for interacting and non-interacting photons, providing information on how many interactions occurred and in which part of the AGN. The most used tools of RefleX were spectrum creation and imaging.

Simulations were based on the X-ray model shown in **Figure 2**. This model considers the geometries used in the infrared (beige color components), the **ACCRETION DISK** and the Broad Line Region (BLR, grey color

beige), el **DISCO DE ACRECIÓN** y la Broad Line Region (BLR, componentes color gris). Estas últimas 2 componentes se agregaron porque son gaseosas, por lo que pueden reprocesar los fotones de rayos X, pero al ser libres de polvo, no emiten radiación en infrarrojo, no siendo consideradas en ese modelo. La fuente de emisión de rayos X, la Corona, es simulada con las esferas rojas que se muestran en la figura. El detalle de las dimensiones de cada componente del modelo están en la **Tabla 1**. Fueron utilizadas las mismas dimensiones del modelo en infrarrojo, excepto para el ángulo de apertura del disco acampanado (θ_{disk}). Se decidió probar con ángulos de apertura mayores que 5° , porque la fracción que ocupa el disco en el espacio es muy pequeña para un AGN de este tipo (Stalevski et al. 2016), del cual a partir de su espectro se desprenden muchos procesos de interacción entre los fotones y la materia. Además, fueron tomadas con un ángulo de inclinación (o ángulo polar) de 89° , es decir, solo es guardada la información de los fotones que atraviesan el disco acampanado.

Para crear cada modelo, se realizaron 100 simulaciones y luego se combinaron. Los modelos creados fueron comparados con datos reales de Circinus, de los observatorios Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) y X-ray Multi-Mirror Mission (XMM-Newton), los cuales había sido obtenidos en la investigación previa de Arévalo et al. (2014).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los modelos aplicados fueron ajustados a los datos reales de Circinus usando un programa de ajuste espectral llamado XSPEC (Arnaud, 1996). Los resultados finales se muestran en la **Figura 3**. Los colores verde y rojo corresponden a los datos de NuSTAR y el color negro a los datos de XMM-Newton. En el panel superior de cada figura, está

components). These last two components were considered here because they are gaseous and can **REPROCESS** X-ray photons. Since these regions have no dust, they do not emit in the infrared and are not considered in those models. The red spheres in the figure simulate the X-ray emission source, the Corona. Dimension details of each component of the model are in **Table 1**. The same dimensions as in the infrared model were used, with the exception of the aperture angle for the flared disk (θ_{disk}). Aperture angles greater than 5° were tested because the fraction of space occupied by the disk is very small for an AGN of this kind (Stalevski et al. 2016), from whose spectrum many photon-matter interaction processes can be derived. Furthermore, the data was acquired with an inclination angle (or polar angle) of 89° ; thus, only the information of photons crossing the disk was stored.

To create the model, 100 simulations were ran and combined. The created models were compared to real data from Circinus obtained from the Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) and X-ray Multi-Mirror Mission (XMM-Newton) observatories, which was previously acquired in Arévalo et al. (2014).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The applied models were fitted to real data from Circinus using a spectral adjustment software called XSPEC (Arnaud, 1996); results are shown in **Figure 3**. Colors green and red correspond to NuSTAR data while black color is from XMM-Newton. The upper panel in each figure shows real spectra (data points with error bars) and

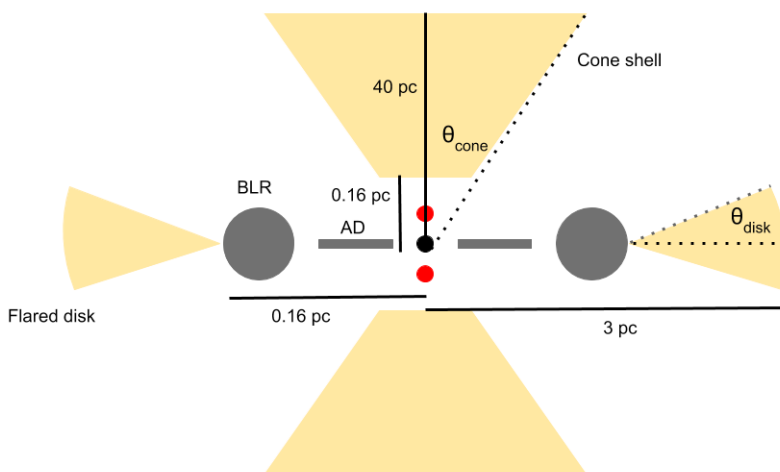


Figura 2. Modelo con el que se hicieron simulaciones en rayos X. El modelo no está a escala. Las figuras color beige son las componentes consideradas para el modelo en infrarrojo y las figuras color gris fueron agregadas para el modelo en rayos X. El disco de acreción (AD en la figura) se simuló usando un disco y la BLR se simuló usando un toroide. En punto negro central representa el SMBH y las esferas rojas representan la Corona.

Figure 2. Model for X-ray simulations. The model is not to scale. Figures in beige color are the components considered by the infrared model while the grey figures were added to the X-ray model. The accretion disk (AD) was simulated using a disk and the BLR using a torus. The central black dot represents the SMBH and the red spheres the Corona.

Accretion disk	$r_{int} = 3.18 * 10^{-8} pc$ $r_{ext} = 2.12 * 10^{-6} pc$ $n = 10^{15} cm^{-3}$
Broad Line Region	$r_{int} = 0.00209 pc$ $r_{ext} = 0.16 pc$ $n = 10^9 cm^{-3}$
Flared disk	$r_{int} = 0.16 pc$ $r_{ext} = 3 pc$ $n = 3 * 10^5 cm^{-3}$ $\theta_{disc} = 40^\circ$
Conical shell	$h_{inferior} = 0.16 pc$ $h_{superior} = 40 pc$ $\theta_{cono} = 40^\circ$ $n = 472.6 cm^{-3}$
Corona	$r_{corona} = 50149927086.8 cm$ $d_{corona-SMBH} = 50149927086.8 cm$

Tabla 1. Dimensiones de las 4 geometrías reprocesoras y la Corona en el modelo de rayos X. En todos los casos n es la densidad volumétrica del gas y para el disco acampanado y la cáscara cónica, θ es el ángulo de apertura. En el caso de la Corona, r_{corona} es el radio de las esferas y $d_{corona-SMBH}$ es la distancia entre la Corona y el SMBH.

Table 1. Dimensions of the 4 reprocessing geometries and the Corona for the X-ray model. In all cases, n is the volumetric density of the gas. For the flared disk and the conical shell, θ is the aperture angle. In the case of the Corona, r_{corona} is the radius of the spheres and $d_{corona-SMBH}$ is the distance between the Corona and SMBH.

mostrado el espectro real (puntos con barras de error) y el espectro simulado (línea continua). En el panel inferior se muestra la razón entre el modelo y los datos reales. Para un ángulo de apertura de $\theta_{disc} = 5^\circ$, se puede observar que el modelo no logra reproducir los datos. La línea Iron Ka está subestimada, al igual que el Reflection hump. Esto es debido a que la cantidad de procesos de interacción (dispersión de Compton y fluorescencia) no son suficientes para reproducir las características espectrales previamente mencionadas. Esto no es sorprendente, ya que el ángulo de apertura del disco es demasiado pequeño y solo ocupa el 9% del espacio en el plano en el que se encuentra. En nuestros resultados se observa que a partir de un ángulo de apertura del disco $\theta_{disc} = 20^\circ$ (equivalente a ocupar el 34% del espacio) se comienza a reproducir el espectro sobre 10 keV. Hasta ahora, no se conoce una relación entre el polvo y el gas en otros AGN, ya esta la primera vez que se realiza una investigación en la que se comparan las geometrías de cada uno. Nuestros resultados indican que el modelo que logra reproducir los datos en infrarrojo, no es capaz de reproducir los datos en rayos X para Circinus, lo que indica que el polvo y el gas tienen geometrías distintas.

Por otro lado, se puede observar que para ninguno de

the simulated spectra (full line). The lower panels show the ratio between model and real data. For an aperture angle $\theta_{disc} = 5^\circ$, the model fails to replicate the observational data. The Iron Ka line is underestimated, as well as the Reflection hump. This is because the amount of interaction processes (Compton dispersion and fluorescence) is not enough to reproduce the aforementioned spectral characteristics. This is not surprising, since the aperture angle of the disk is too small and only occupies 9% of the space in the plane it is allocated. Our data show that at disk aperture angles from $\theta_{disc} = 20^\circ$ (equivalent of occupying 34% of the space in the plane), and larger, the spectrum beyond 10 keV can be reproduced. So far, the relation between gas and dust in other AGN is unknown, and this is the first time that a comparative study of their geometries is done. Our results indicate that the model is able to reproduce the infrared data, but not the X-ray data for Circinus, suggesting that dust and gas have different geometries.

On the other hand, it can be observed that none of the 4 generated spectra was able to replicate the Iron Ka line. One possible explanation is that NuSTAR and XMM-Newton data are contaminated with two sources of intense emission below 10 keV energies, corresponding to the X-ray

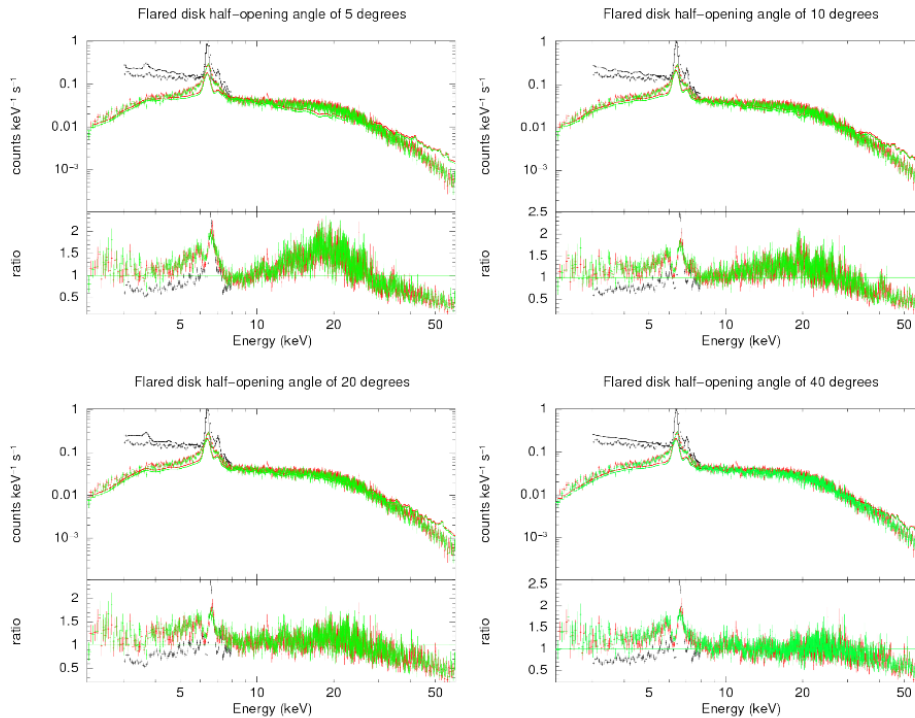


Figura 3. Espectros resultantes para 4 distintos ángulos de apertura del disco acampanado. Los colores verde y rojo corresponden a los ratos de NuSTAR y el color negro a los datos de XMM-Newton. El panel superior de cada imagen se muestra el espectro, en donde los puntos con las barras de error corresponden a los datos reales y la línea continua corresponde al modelo. En el panel inferior de cada espectro se muestra la razón entre los datos reales y el modelo.

Figure 3. Spectra using four different aperture angles for the flared disk. Colors green and red show data from NuSTAR while black correspond to XMM-Newton data. The upper panel of each image shows spectra, where data points with error bars correspond to real data and the filled line to the modeled data. The lower panel of each spectrum shows the ration between real and model data.

los 4 espectros se logró reproducir la línea Iron K α . Una explicación a esto es que los datos de NuSTAR y XMM-Newton están contaminados por dos fuentes que emiten intensamente a energías menores de 10 keV, las cuales corresponden a la binaria de rayos X CGX1 y el remanente de supernova CGX2 (Bauer et al., 2001). Esto quiere decir, que dentro de las observaciones del AGN de Circinus también están incluidas las fuentes CGX1 y CGX2. Este modelo no incorpora las fuentes de contaminación, lo que explica que no se logre ajustar bien el espectro bajo 10 keV.

También se hicieron simulaciones en las que se aumentaba la densidad del disco acampanado hasta $n=10^6 \text{ cm}^{-3}$, en vez de aumentar el ángulo de apertura del disco. Estas simulaciones no reproducen bien los datos, obteniendo resultados similares que los obtenidos con la densidad inicial. Esto confirma que el principal problema del modelo en infrarrojo, es que el disco acampanado ocupa un volumen muy pequeño en el espacio, produciendo menos interacciones físicas de las necesarias.

En esta investigación se logró construir modelos que reproducen parcialmente el espectro real de Circinus. Sería

binary CGX1 and the supernova remnant CGX2 (Bauer et al., 2001). This means, that within the observational data from Circinus AGN, there is also information from the sources CGX1 and CGX2. This model did not include the contaminations sources, which might explain the difficulties for spectral fit below 10 keV.

Furthermore, simulations with increased density within the flared disk, up to $n=10^6 \text{ cm}^{-3}$, were performed instead of changing the aperture angle. These simulations were not able to properly replicate the data, giving similar results to the ones with the initial density. This further confirms that the main problem with the infrared model is that the volume occupied by the flared disk is too small in space, leading to less physical interactions than needed.

In this research it was possible to build models that partially reproduce the real spectrum of Circinus. It would be interesting to include the contamination sources for the spectral adjustment in order to obtain more precise data and check if the model shows increased fitness.

interesante incorporar las fuentes de contaminación en el ajuste espectral, para obtener resultados más precisos y ver si el modelo logra ajustar los datos en ese caso.

CONCLUSIONS

Después de varias simulaciones realizadas (aproximadamente 100), fue demostrado que el modelo en infrarrojo no puede reproducir el espectro en rayos X de Circinus. Para lograr reproducir las interacciones físicas producidas en fotones de rayos X con una energía mayor que 10 keV, es necesario considerar un ángulo de apertura del disco acampanado de al menos 20°, en vez de los 5° que considera el modelo en infrarrojo. Esto apunta que la razón gas a polvo no es la misma en todos los lugares del AGN y que el disco acampanado ocupa un volumen mayor para el gas que para el polvo.

Por otro lado, no se logró reproducir el espectro de Circinus para energías menores a 10 keV, siendo siempre subestimada la prominencia de la línea Iron K α . Una posible explicación a esto son las fuentes de contaminación que afectan el espectro a bajas energías, las cuales no están incorporadas en el modelo.

Esta investigación es un gran paso para la construcción de un posible modelo en rayos X que logre reproducir los datos de Circinus y encontrar la geometría del gas en su AGN, ya que ahora sabemos que el disco acampanado para los rayos X debe tener un ángulo de apertura mayor que para el infrarrojo. Un modelo que logre explicar los datos en rayos X de Circinus, el cual considere una cáscara cónica, sería un gran paso para un futuro replanteamiento en la Unificación de los AGN.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Stephane Paltani por haber incorporado las herramientas a RefleX para el desarrollo de este trabajo y a Marko Stalevski por haber compartido en detalle la información del modelo en infrarrojo de Circinus con nosotros.

CONCLUSIONS

After several performed simulations (approximately 100), it was shown that the infrared model could not reproduce the X-ray spectrum of Circinus. In order to achieve the physical interactions of X-ray with higher energies than 10 keV, it is necessary to consider an aperture angle higher than 20° for the flared disk, instead of the 5° considered in the infrared model. This suggests that the ration of gas to dust is not the same across the AGN and that the flared disk occupies a larger volume for gas than for dust.

On the other hand, it was not possible to reproduce the spectrum of Circinus at energies lower than 10 keV, and the Iron K α line was always underestimated. One possible explanation for this could be the effects of the contamination sources that affect the spectrum at lower energies, which are not included in the model.

This research is a great step in the construction of an X-ray model that replicates Circinus data, and towards finding the geometry of its gas at the AGN. Up until now, it is clear that the flared disk for X-ray must have a greater aperture angle than for infrared. A model that is able to explain the X-ray data from Circinus, which considers a conical shell, would be a great step towards a rethinking of the unified model of AGN.

Acknowledgments

The authors would like to thank Stephane Paltani for incorporating the necessary tools to RefleX for the development of this work and to Marko Stalevski for sharing in detail the information about the infrared model of Circinus. Also, thanks to Patricia Arévalo and her

GLOSARIO

AGUJERO NEGRO: materia altamente comprimida que crea un campo gravitacional muy intenso, que no deja escapar nada, ni siquiera la luz. Se habla de un agujero negro supermasivo cuando la masa de este es mayor a 50 veces la masa del sol.

ACRECIÓN: es cuando existe material rodeando un cuerpo, el cual va creciendo producto de que el material cae sobre él.

GLOSSARY

BLACK HOLE: highly compressed matter that creates a very intense gravitational field that does not allow anything to scape, not even light. A supermassive black hole corresponds to black holes with sizes bigger than 50 times the mass of the sun.

ACCRETION DISK: when there is matter surrounding a celestial body, which, in turn, gets bigger due to the material falling into it.

REPROCESAR: es cuando los fotones de rayos X (en este caso) interactúan una o más veces con la materia, realizando procesos de dispersión de Compton Inverso y fluorescencia, cambiando su energía, pero continuando como rayos X

LÍNEAS ESPECTRALES DE EMISIÓN: líneas que se observan en el espectro cuando un átomo absorbe un fotón y después re-emite otro fotón. El fotón re-emitado es el que se observa en el espectro.

RAYOS X: fotones que no son visibles para el ojo humano, que poseen una energía entre 100 eV y 1000000 eV.

INFRARROJO: fotones que no son visibles para el ojo humano, que poseen una energía entre 0.001 eV y 1 eV.

ULTRAVIOLETA: fotones que son invisibles al ojo humano que poseen una energía entre 1 eV y 100 eV

PÁRSEC: escala de distancia usada en astronomía que equivale a 3×10^{18} cm.

FLUORESCENCIA: interacción entre un fotón y un átomo. El fotón choca con el átomo, lo que produce que un electrón dentro del átomo salte de un nivel de energía menor a uno mayor. Para volver al equilibrio inicial, el electrón vuelve a su nivel de energía original emitiendo un fotón

ESPECTRO: es un gráfico en 2 dimensiones, en donde el eje x representa la energía de los fotones y el eje y representa el flujo (proporcional a la cantidad de fotones que tienen una determinada energía)

REPROCESSING: when X-ray photons (for this case) interact one or more times with matter through the process of inverse Compton dispersion and fluorescence, changing their energy levels, but still within the X-ray band.

SPECTRAL LINES OF EMISSION: lines that can be observed in spectra when an atom absorbs a photon and then re-emits another photon. This new photon is the one observed in the spectra.

X-RAYS: photons invisible to the human eye that possess energies between 100 and 1,000,000 eV.

INFRARED: photons invisible to the human eye that possess energies between 0.001 and 1 eV.

ULTRAVIOLET: photons invisible to the human eye that possess energies between 1 and 100 eV.

FLUORESCENCE: interaction between a photon and an atom. The photon impacts the atom, which produces the movement of an electron within the atom to a higher energy level. In order to return to the initial state, the electron goes back to the original energy level by emitting another photon.

SPECTRUM: a two-dimensional graph in which the x-axis represents the energy of photons and the y-axis represents flux (proportional to the amount of photons with a specific energy).

PARSEC: scale of distance used in astronomy equivalent to 3×10^{18} cm.

También agradecer a Patricia Arévalo y su equipo por haber compartido los datos en rayos X de Circinus.

Por último, agradecer al grupo del cluster de Geyon2 por haber facilitado el equipo para el desarrollo de esta investigación.

PRINCIPIO CIENTÍFICO

Los Núcleos Activos de Galaxias (AGN, por sus siglas en inglés), son unos curiosos objetos compactos ubicados en el centro de algunas galaxias, que tienen un agujero negro supermasivo en su centro, el cual tiene un disco alrededor que está acretando materia, produciendo una gran cantidad de energía y por lo tanto emitiendo más luminosidad que una galaxia normal.

El modelo unificado de los AGN (ver **Figura 4**), consiste en un agujero negro supermasivo en el centro, rodeado por un disco de acreción y este a su vez rodeado por un toroide. El toroide es una componente de gas y polvo encargado de REPROCESAR y re-emitar radiación proveniente de otras partes del núcleo. Además, hay una componente llamada Broad Line Region (BLR), la cual se encuentra entre el toroide y el disco de acreción que emite **LÍNEAS ESPECTRALES DE EMISIÓN** anchas. Luego hay una

team for sharing the X-ray data of Circinus. Finally, the authors thank the Geyon2 cluster group for facilitating the equipment needed for this research.

SCIENTIFIC PRINCIPLE

Active galactic nuclei (AGN) are curious compact objects located at the center of galaxies that have a supermassive black hole at their center that have a disk accreting matter, generating a large amount of energy and emitting higher luminosities than a normal galaxy.

The unified model of AGN (see **Figure 4**) consists of a supermassive black hole at the center, surrounded by an accretion disk, the latter encircled by a torus. This torus is composed of gas and dust and it reprocesses and re-emits radiation incoming from other parts of the nucleus. Furthermore, there is another component, called the Broad Line Region (BLR), which is in between the torus and the accretion disk that emits the broad **SPECTRAL LINES OF EMISSION**. Additionally, there is a more extended component called the Narrow Line Region (NLR) that emits narrow spectral lines.

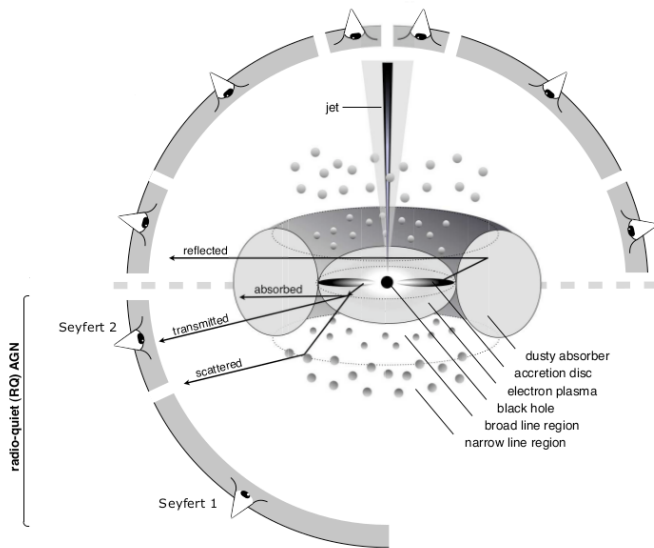


Figura 4. Esta imagen representa el esquema de los Núcleos Activos de Galaxias, de acuerdo al modelo unificado (Beckmann & Shrader, 2012). Se muestra cada componente del AGN, como también de dónde nacen las distintas componentes del espectro. De la imagen también se desprende la diferencia entre AGN Seyfert 1 y Seyfert 2.

Figure 4. This image represents the schematics of Active Galactic Nuclei according to the unified model (Beckmann & Shrader, 2012). Every component of the AGN is shown, together with the origin of the different components of the spectra. From the illustration, the difference between AGNs Seyfert 1 and Seyfert 2 can be distinguished.

componente más extendida que se llama Narrow Line Region (NLR), que emite líneas espectrales delgadas.

Los AGN se pueden clasificar de acuerdo a sus líneas espectrales de emisión. Los AGN que en su espectro muestran líneas anchas y delgadas, se denominan Seyfert 1, y los que muestran solo líneas delgadas, se denominan Seyfert 2. Esta diferencia en el espectro es producida por la inclinación en que está el AGN con respecto a la Tierra. Si la inclinación es similar a 0° , se observa el AGN desde arriba pudiendo resolver la BLR y la NLR. En cambio, si la inclinación del AGN es aproximadamente 90° , se observa a través del toroide, solo viendo la NLR, ya que la BLR es cubierta por éste. En la **Figura 4** se esquematiza este suceso.

Los AGN emiten radiación en casi todo el espectro electromagnético. En particular, los RAYOS X y el INFRARROJO son bandas que entregan importante información sobre los procesos físicos y condiciones de la materia de los AGN. Los rayos X son creados cuando los fotones ULTRAVIOLETA (UV) provenientes del disco de acreción chocan con una zona llamada Corona, la cual está compuesta por electrones muy energéticos y que se encuentra muy cercana al disco de acreción. En este proceso, parte de la energía de los electrones es transferida a los fotones UV, transformándose en rayos X. Este proceso se llama Dispersión de Compton Inverso. Por otro lado, la radiación de infrarrojo se forma cuando los fotones UV provenientes del disco de acreción son absorbidos por el polvo del toroide y luego re-emitidos en infrarrojo. El toroide es el lugar en donde más se concentra polvo en el AGN, mientras que las componentes que están más cercanas al agujero negro (el disco de acreción y la BLR) no tienen polvo, porque en esa zona las temperaturas son muy

The AGN can be classified according to their spectral emission lines. AGNs with lines broad and narrow are called Seyfert 1, while the ones only showing narrow lines are called Seyfert 2. This difference in spectra is generated by the angle of inclination of the AGN with respect to Earth. If the inclination is near 0° , the AGN is observed from above, allowing for the resolution of BLR and NLR. In turn, if the AGN inclination is near 90° it is observed through the torus, only appreciating the NLR, since the BLR is hidden by it. **Figure 4** summarizes this.

AGN emit radiation in almost the entire electromagnetic spectrum. Particularly, X-ray and infrared can be used to study the physical processes and matter conditions in AGN. X-rays are created when ULTRAVIOLET (UV) photons, coming from the accretion disk, hit the Corona, a region composed of highly energetic electrons that is located near the accretion disk. When this occurs, some of the energy is transferred from electrons to UV photons, converting them into X-rays. This process is called inverse Compton dispersion. On the other hand, when UV photons coming from the accretion disk are re-emitted in the infrared when absorbed by the dust in the torus. The torus is the portion of the AGN with the highest dust concentration, while the components near the black hole (accretion disk and BLR) do not have dust because they reach high temperatures, over 2,000 K, and the dust sublimates (Kishimoto et al., 2018).

X-rays can be reprocessed or they can reach Earth without interacting with matter. Reprocessing consists mainly in the process of Compton dispersion and fluorescence. In the spectra of the AGN, the reprocessed fraction can be

altas, mayores a 2000 K, y el polvo sublima (Kishimoto et al., 2018).

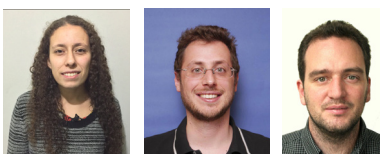
Los rayos X pueden ser reprocesados o llegar hasta la Tierra sin haber interactuado con la materia. La reprocesación consiste principalmente en procesos de dispersión de Compton y FLUORESCENCIA. En el ESPECTRO de un AGN se puede distinguir la componente reprocesada (reflected component y scattered component) y la componente transmitida (transmitted component), la cual llega a la Tierra sin haber sufrido interacción alguna. Estos sucesos están esquematizados en la **Figura 4**.

distinguished (reflected component y scattered component) from the transmitted component, which reaches Earth without suffering any type of physical interaction. These processes are illustrated in **Figure 4**.

REFERENCES

- Arévalo P., Bauer F., Puccetti S., Walton D., Koss M., Boggs S., Brandt W., et. The 2-79 keV X-Ray Spectrum of the Circinus Galaxy with NuSTAR, XMM-Newton, and Chandra: A Fully Compton-thick Active Galactic Nucleus (2014). *The Astrophysical Journal*, V. 791.
- Arnaud K. (1996). XSPEC: The First Ten Years. *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, V. 101.
- Asmus D., Hönig S. & Gandhi P. (2016). The Subarcsecond Mid-infrared View of Local Active Galactic Nuclei. III. Polar Dust Emission. *The Astrophysical Journal*, V.822.
- Bauer F., Brandt W., Sambruna R., Chartas G., Garmire G., Kaspi S. & Netzer H. A (2001). Chandra Study of the Circinus Galaxy Point-Source Population. *The Astronomical Journal*, V.22.
- Beckmann V. & Shrader C. (2012). The AGN phenomenon: open issues. Procde de la conferencia "An INTEGRAL view of the high-energy sky (the first 10 years)". Bibliotheque Nationale de France, Paris, France.
- Elvis M., Wilkes B., McDowell J., Green R., Bechtold J., Willner S., Oey M., Polomski E., Cutri R. (1994). Atlas of quasar energy distribution. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, V. 95.
- Feltre A., Hatziminaoglou E., Fritz J. & Franceschini A. (2012). Smooth and clumpy dust distributions in AGN: a direct comparison of two commonly explored infrared emission models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V.426.
- Genzel R., Reinhard F. & Gillesen S. (2010). The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster. *Reviews of Modern Physics*, V.82.
- Kishimoto M., Hönig F., Antonucci R., Millour F., Tristram K. & Weigelt G. Mapping the radial structure of AGN tori (2011). *Astronomy & Astrophysics*, V.536.
- Paltani C. & Ricci C. (2017). Reflex: X-ray absorption and reflection in active galactic nuclei for arbitrary geometries. *Astronomy & Astrophysics*, V.607.
- Ricci C. (2011). Active Galactic Nuclei at hard X-ray energies: Absorption, Reflection and Unified Model. Tesis de Doctorado. Université de Genève.
- Stalevski M., Asmus D. & Tristram C. (2017). Dissecting the active galactic nuclei in Circinus - I. Peculiar mid-IR morphology explained by a dusty hollow cone. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V.472.
- Stalevski M., Ricci C., Ueda Y., Lira P., Fritz J. & Baes M. (2016). The dust covering factor in active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, V.458.

EQUIPO DE INVESTIGADORES / RESEARCH TEAM



Carolina
Andonie

Claudio
Ricci

Ezequiel
Treister