

Comparación de modelos físicos de emisión multi-onda de núcleos activos de galaxias a partir de su distribución espectral de energía

Laura Natalia Martínez Ramírez

¹Grupo de investigación en Relatividad y Gravitación, GIRG, UIS

²European Organization for Astronomical Research in the Southern Hemisphere
(ESO) Alemania

Director: Juan Carlos Basto Pineda¹

Codirectores: Gabriela Calistro Rivera², Luis Alberto Núñez¹



Contenido

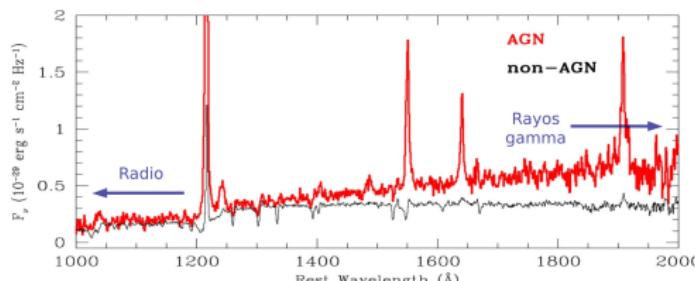
- 1** Planteamiento del problema
- 2** Contribución a AGNfitter 2.0
- 3** Resultados de los ajustes de SED
- 4** Impacto de los modelos en las propiedades
- 5** Conclusiones

Pregunta de investigación

¿Cómo son afectadas las propiedades físicas inferidas de los AGN por los modelos físicos de emisión empleados para ajustar su distribución espectral de energía?

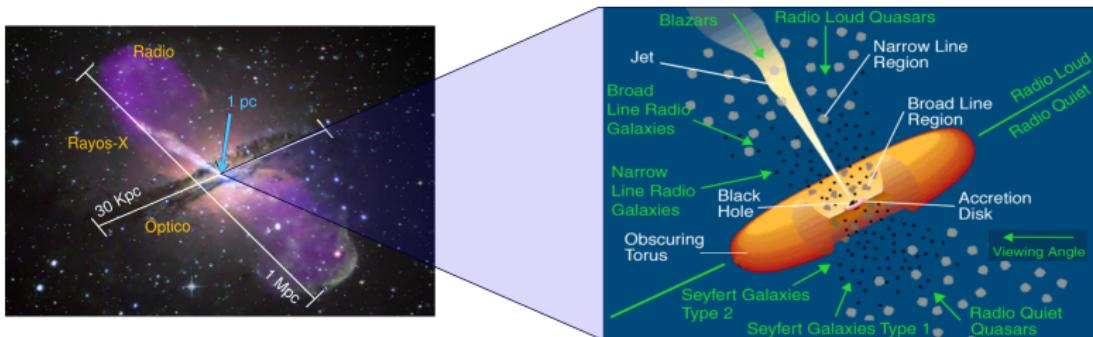
Planteamiento del problema

Galaxias activas



¿Por qué estudiar AGN?

- AGN feedback¹.
- Co-evolución con la galaxia anfitriona².

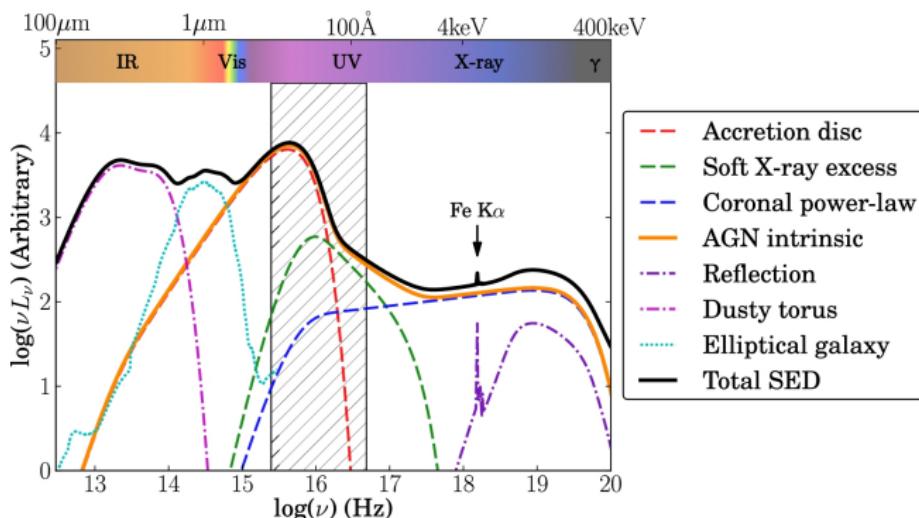


Editada de: Hainline, et al. (2011). *Astrophys. J.*, 733(1), 31, https://apod.nasa.gov/apod/image/0801/cena_comp.jpg y Urry, C & Padovani, P. (1995) *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 107(715), 803.

¹ Suresh, J., et al. (2015). *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, 448(1), 895-909.

² Kauffmann, G., et al. (2003). *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, 346(4), 1055-1077.

Distribución espectral de energía (SED)



SED típica de una galaxia activa. Tomada de: Collinson et al. (2016). Mon. Notices Royal Astron. Soc., stw2666.

Componentes de emisión

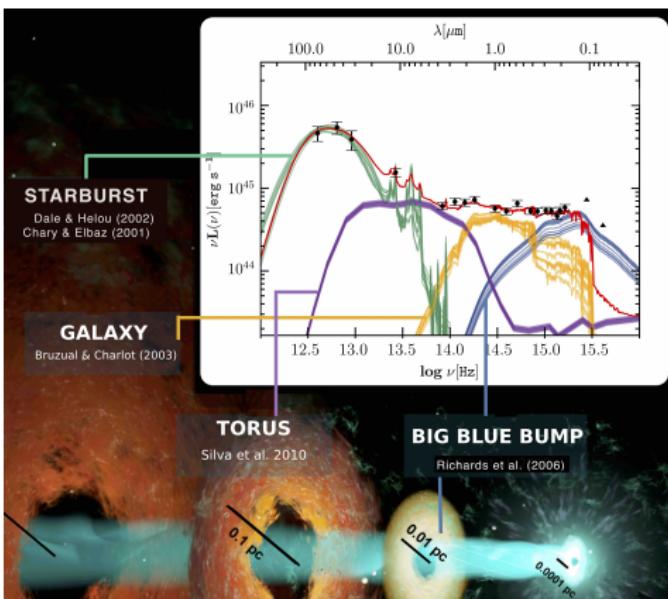
- | | | |
|--------------------------|------------------------|--------------|
| ■ Disco de acreción | ■ Chorros relativistas | ■ Polvo frío |
| ■ Corona de gas caliente | ■ Población estelar | ■ Toro |

Ajuste de SED de galaxias activas

Permite inferir las propiedades físicas y los procesos de formación y evolución de las galaxias.

Estado actual

- Inferencia bayesiana: CIGALE, MAGPHYS, BAYESED, BEAGLE, AGNfitter, etc.
- SED poco detalladas y límitadas en frecuencia.
- AGNfitter³: modelo del toro homogéneo es inconsistente⁴.



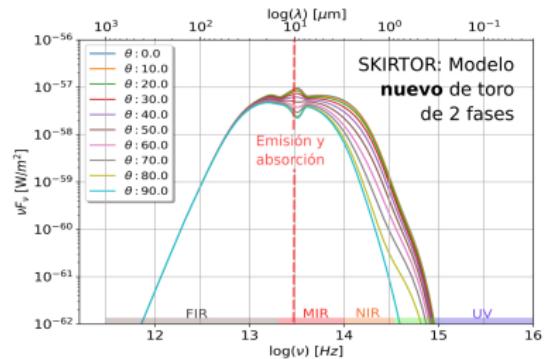
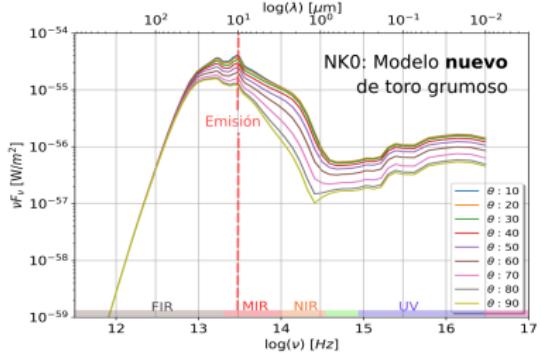
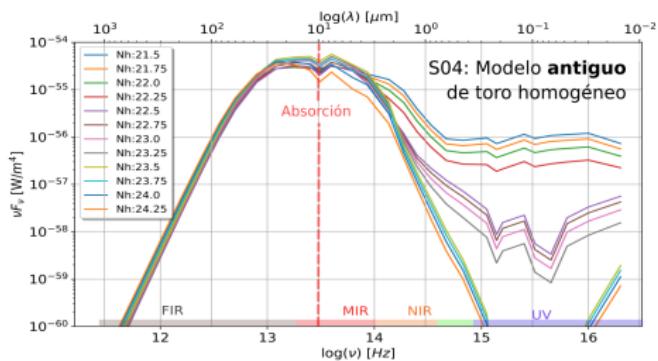
Tomado de: <http://www.eso.org/~gcalistr/>

³Rivera, G.C. et al.(2016). *Astrophys. J.*, 833(1), 98.

⁴Tanimoto, Atsushi. et al.(2019). *Astrophys. J.*, 877(2), 95.

Contribución a AGNfitter 2.0

Modelos de toro de polvo caliente



Modelo S04 de Silva, L., Maiolino, R., & Granato, G. L. (2004). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 355(3), 973-985; NK0 de Nenkova, M., et al. (2008). Astrophys. J., 685(1), 160 y SKIRTOR de Stalevski, M., et al. (2016). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 458(3), 2288-2302.

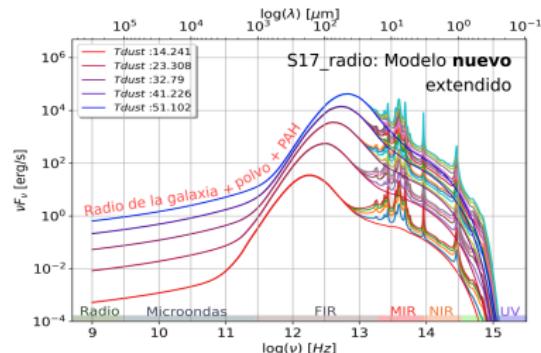
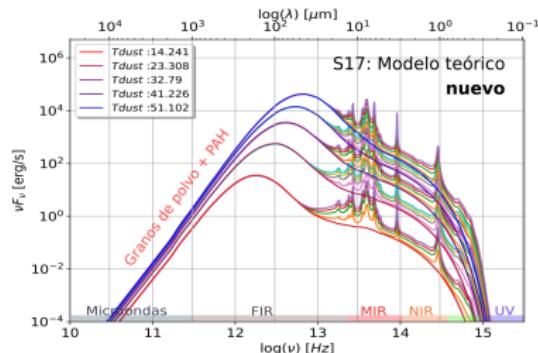
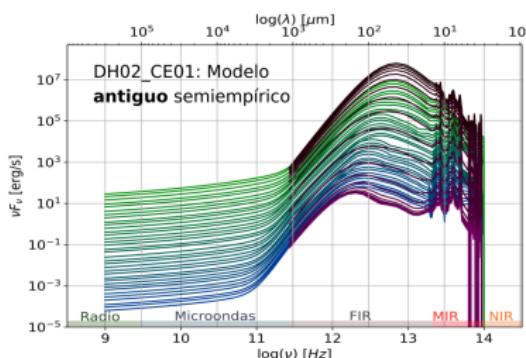
Modelos de polvo frío de las regiones de formación estelar

Correlación FIR-radio

$$q_{IR} = \log \left(\frac{L_{IR}}{3,75 \times 10^{12} L_{1,4\text{GHz}}} \right)$$

$$q_{IR} = 2,64 \pm 0,26$$

Sincrotrón + frenado: $L_\nu \propto \nu^{-\alpha}$.



Modelo DH02_CE01 de Dale, D. A., & Helou, G. (2002). *Astrophys. J.*, 576(1), 159 y Chary, R., & Elbaz, D. (2001). *Astrophys. J.*, 556(2), 562. Modelo S17_newmodel de Schreiber, C., et al. (2018). *Astron. Astrophys.*, 609, A30.

Modelos de disco de acreción y corona

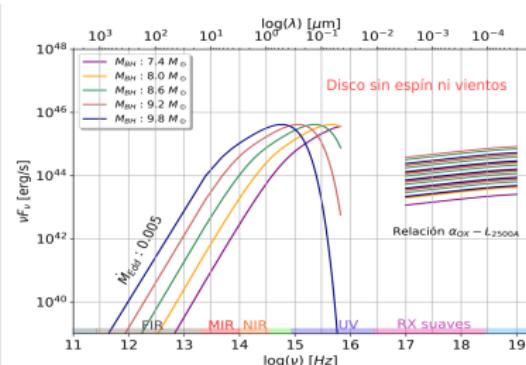
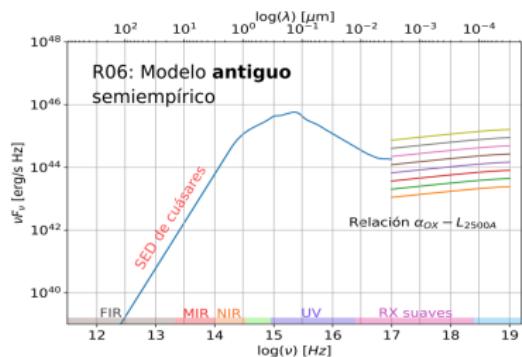
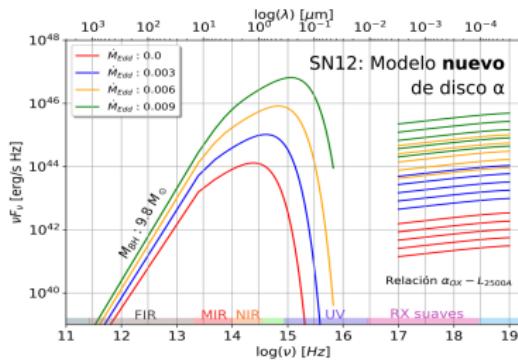
Correlación UV-rayos X

$$\alpha_{ox} = -0,137 \log(L_{2500\text{\AA}}) + 2,638$$

$$\alpha_{ox} = -0,384 \log(L_{2500\text{\AA}}/L_{2\text{keV}})$$

Dispersión inversa de Compton

$$L_\nu \propto E^{-\Gamma+1} \exp(-E/E_{corte})$$



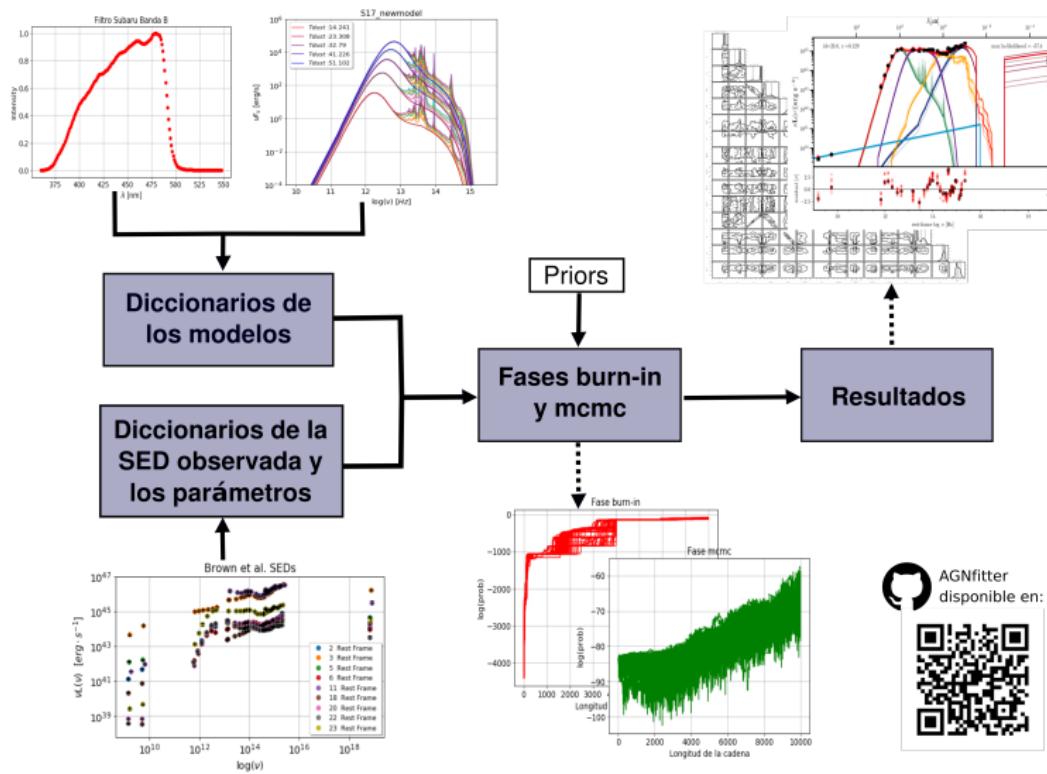
Modelo R06 de Richards, G. T., et al. (2006). Astron. J., 131(6), 2766. y SN12 de Slone, O., & Netzer, H. (2012). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 426(1), 656-664.

Parámetros de ajuste

Componente	Notación	Descripción	Rango
Galaxia	tau	Escala de tiempo de la SFH exponencial [G años]	[0.05, edad(z)]
	age	Edad de la galaxia [log años]	[7, edad(z)]
	metal	Metalicidad [Z_{\odot}]	[0.2, 2]
	EBVgal	Parámetro de enrojecimiento	[0,1]
Polvo frío	GA	Parámetro de normalización	[-10, 10]
	Tdust	Temperatura del polvo frío [K]	[14.24, 42]
	fracPAH	Fracción de PAHs	[0, 0.05]
Toro	SB	Parámetro de normalización	[-10, 10]
	incl	Ángulo de inclinación del toro [°]	[0, 90]
	Nh	Densidad de columna del toro [log cm ⁻²]	[21, 25]
Disco de acreción	TO	Parámetro de normalización	[-10, 10]
	logBHmass	Masa del agujero negro [log M_{\odot}]	[7.4, 9.8]
	logEddra	Tasa de acreción de Eddington [log M_{Edd}]	[0, 0.011]
	EBVbbb	Parámetro de enrojecimiento	[0,1]
Rayos x	BB	Parámetro de normalización	[-10, 10]
	alphaScat	Dispersión en la correlación $\alpha_{ox} - L_{2500\text{\AA}}$	[-0.4, 0.4]
	RAD	Parámetro de normalización	[-20, 20]
Radio del AGN			

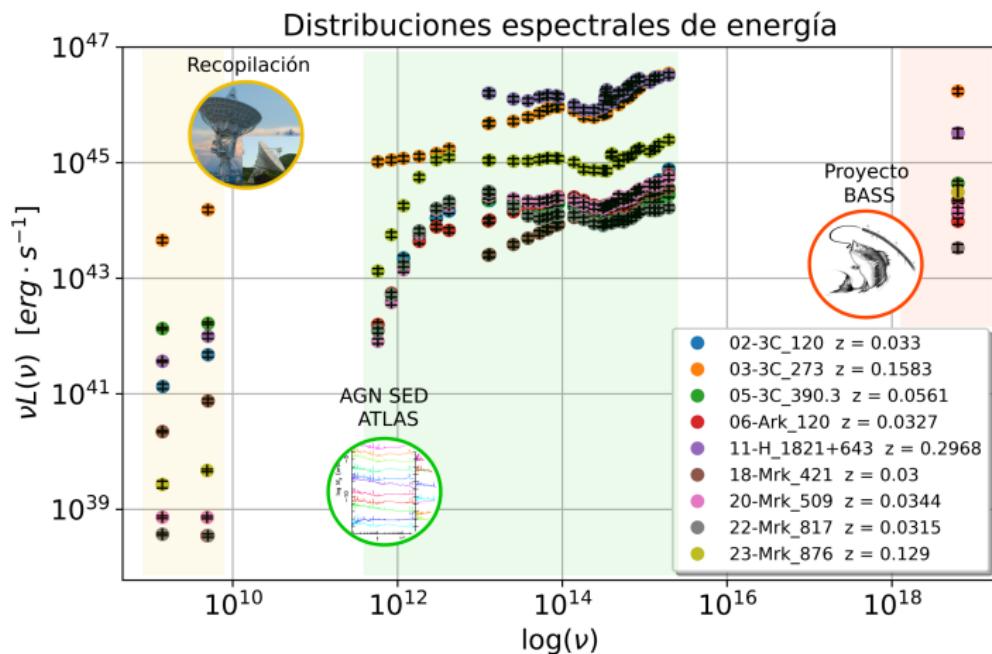
El valor edad (z) es la edad del Universo al tiempo de observación de acuerdo a la cosmología escogida. En este caso es el modelo Λ CDM con $H_0 = 70 \text{ kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0,3$ y $\Omega_\Lambda = 0,7$.

Funcionamiento general de AGNfitter



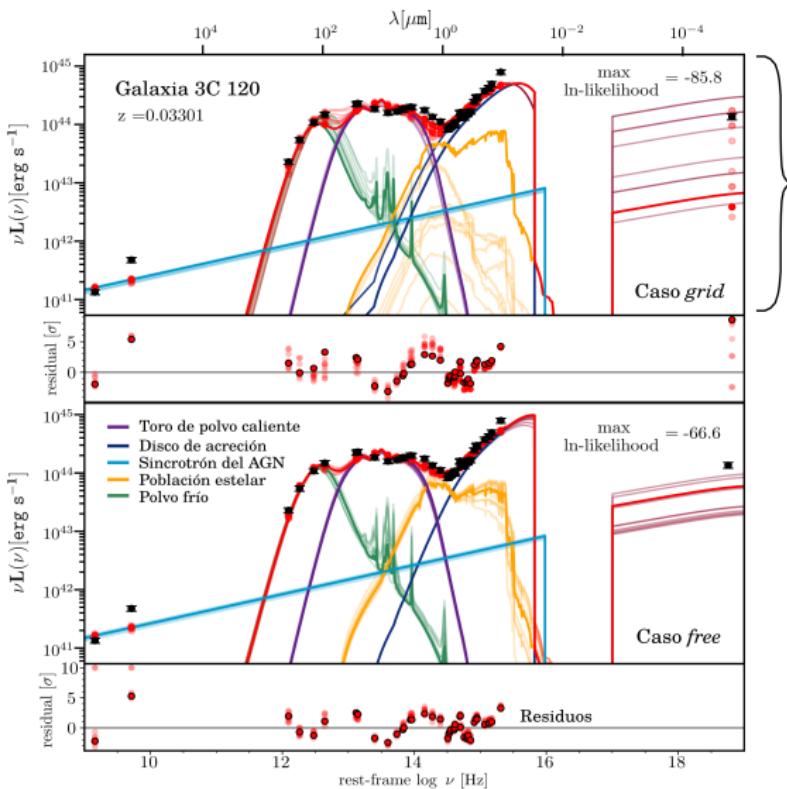
Resultados de los ajustes de SED

Muestra de galaxias



SED entre el FIR y el UV tomadas de Brown, M. et al. (2019). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 489(3), 3351-3367.
Disponible en <https://archive.stsci.edu/hlsp/agnsedatlas>.

Ajustes de SED en configuración *grid* y *free*

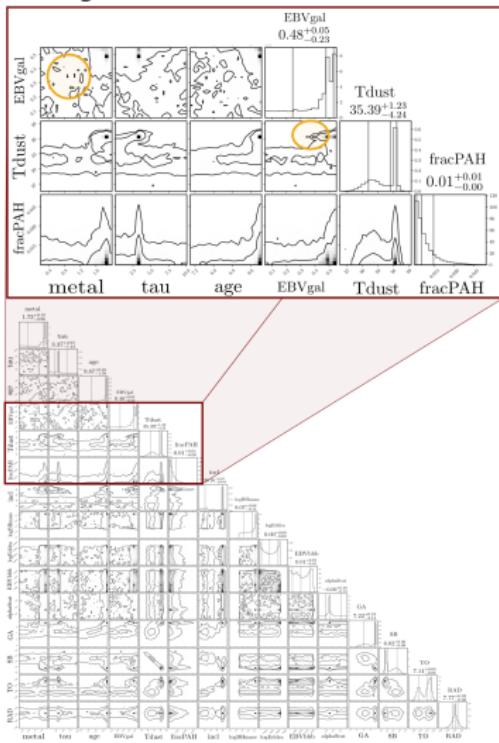


Propiedades inferidas

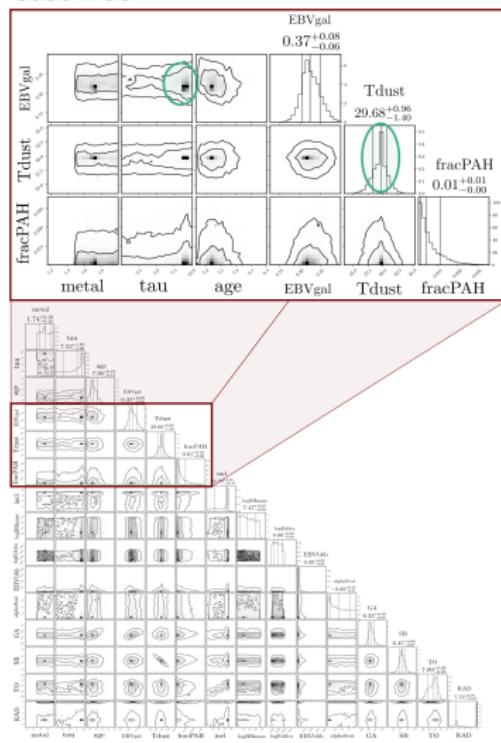
- Población estelar 300 veces más vieja.
- SFR 200 veces mayor y decrece el doble de rápido.
- Galaxia 6 veces más masiva.
- Agujero negro 4 veces más masivo.

Funciones de densidad de probabilidad

Caso grid



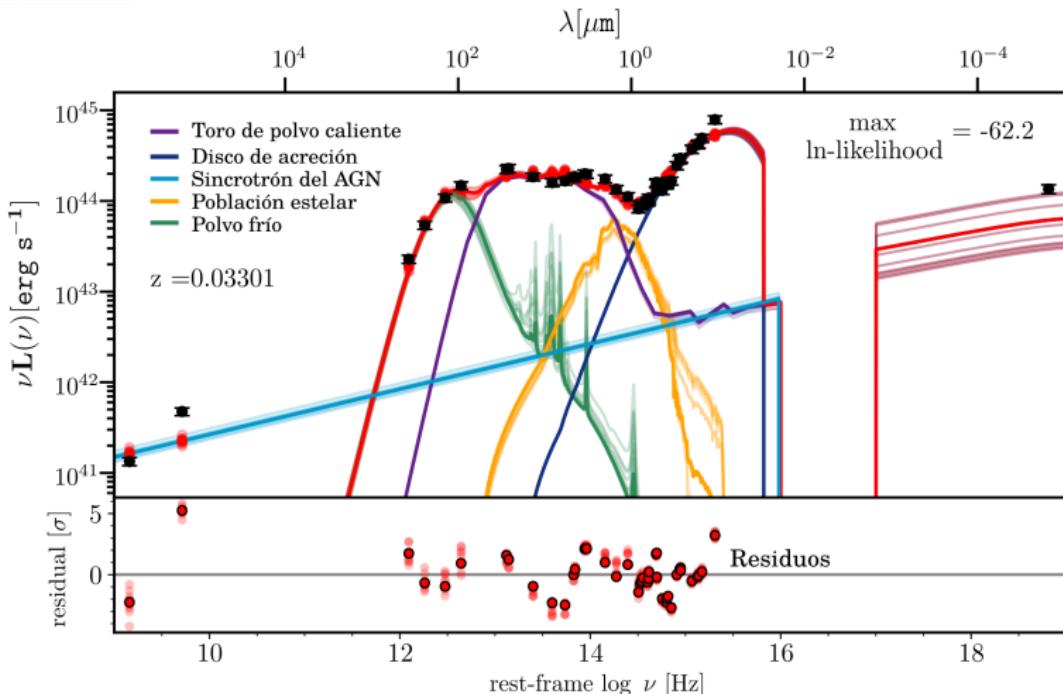
Caso free



Ajuste de SED de la galaxia 3C 120

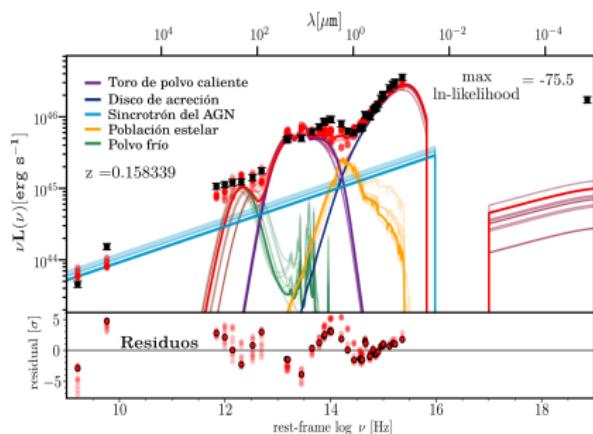


Galaxia 3C 120: Galaxia lenticular, Seyfert 1 y Fanaroff Riley I con jets.

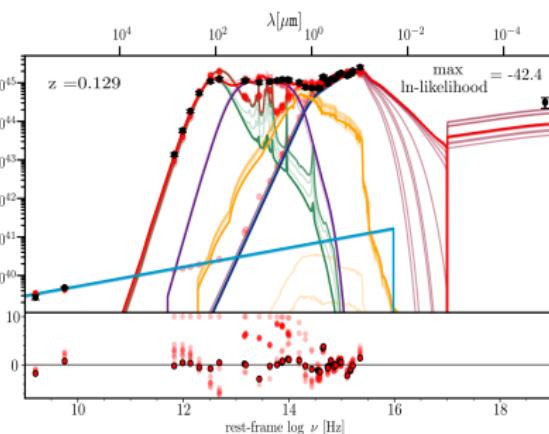


Resultados individuales

Galaxia 3C 273: ULIRG, QSO con jets.



Galaxia Mrk 876: Sy 1 con fusión reciente.



AGN tipo 1 diversos: 3 galaxias espirales, 2 elípticas y 1 lenticular.

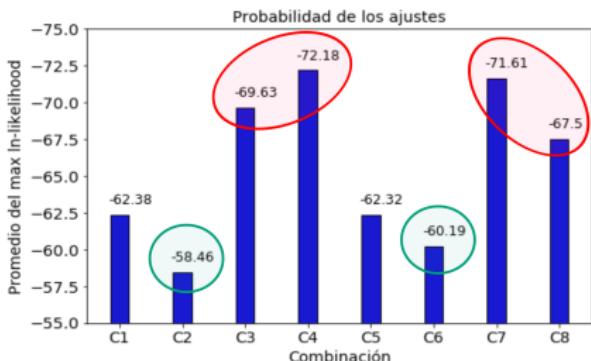
Propiedades consistentes con las bases de datos.

7/9 SKIRTOR, 5/6 S17
y 7/9 R06.

Impacto de los modelos en las propiedades

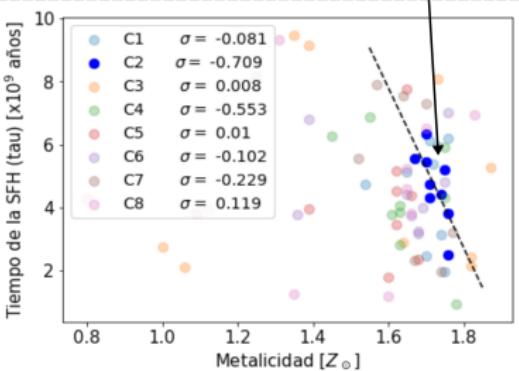
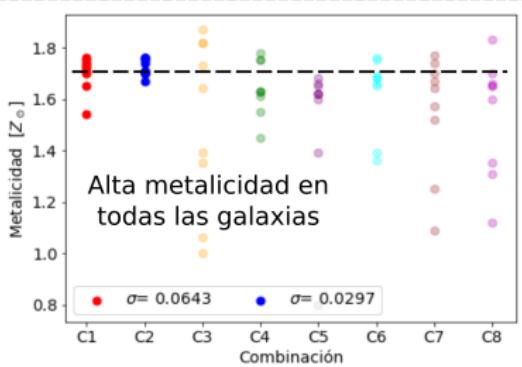
Tendencias globales

Gran mejoría con el modelo SKIRTOR

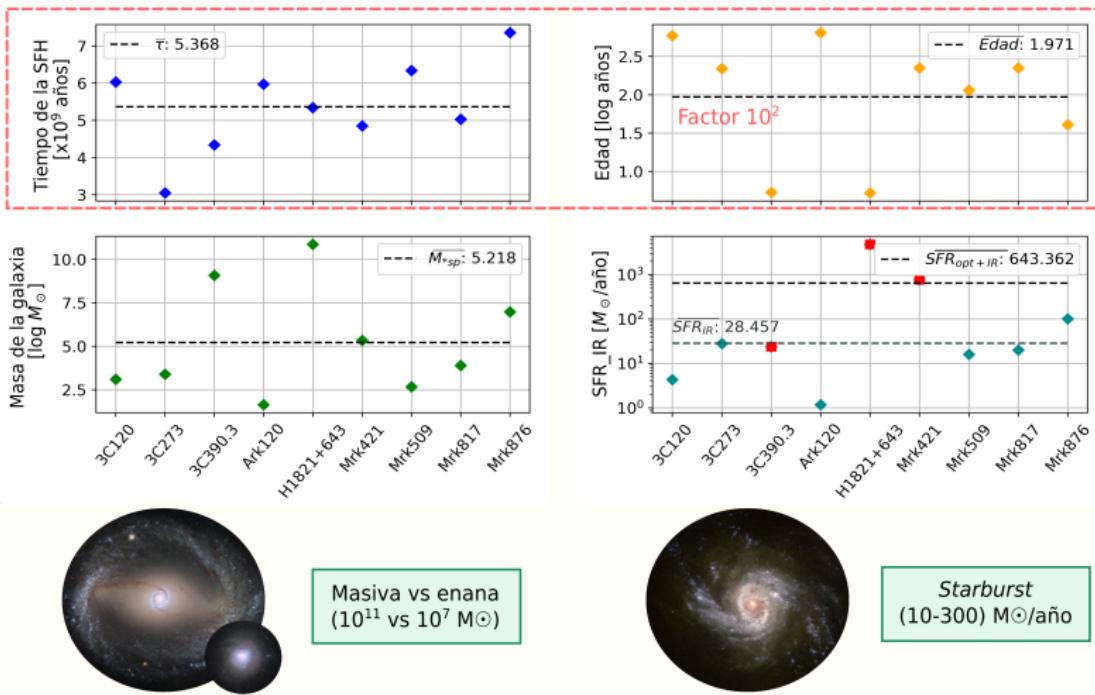


Modelo teórico SN12 no logra reproducir del todo las SED

Decaimiento lento implicaría baja metalicidad



Diferencias promedio



Imágenes tomadas de: <https://www.spacetelescope.org/images/heic1712a/> (izquierda) y <https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA04229> (derecha).

Conclusiones

Conclusiones

- Se estudió el efecto de los parámetros libres en el ajuste de SED, encontrándose una menor tendencia a la multiplicidad de máximos locales en las PDF.
- Se obtuvieron ajustes de SED de la muestra de galaxias consistentes con las propiedades de las bases de datos. Estos mostraron una preferencia de los datos por los modelos R06, SKIRTOR y S17_newmodel.
- Se evidenció que el cambio de modelos puede maximizar la degeneración en los parámetros de la galaxia y dar lugar a una diferencia de $10^5 M_{\odot}$ en la estimación de la masa estelar.

Además, fruto de este trabajo se consolidó una **nueva versión de AGNfitter** con nuevos modelos de emisión, correlaciones empíricas y con un cambio de estructura que permite explorar algunos parámetros de manera continua.

Participación en el XXII Simposio SOCHIFI 2020



XXII Simposio Chileno de Física
Chile, 24-26 de noviembre de 2020

Otras disciplinas no consideradas

Comparación de modelos físicos de emisión multi-onda de núcleos activos de galaxias a partir de su distribución espectral de energía

Laura N. Martínez-Ramírez¹, Gabriela Calistro Rivera^{2,†}, Juan C. B. Pineda¹, Luis A. Núñez^{1,3}

¹Escuela de Física - Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 Calle 9, 680002 Bucaramanga-Colombia.

²European Southern Observatory, Karl-Schwarzschild-Str. 2, D-85748 Garching-Germany.

³Departamento de Física - Universidad de Los Andes, Mérida 5101, Venezuela.

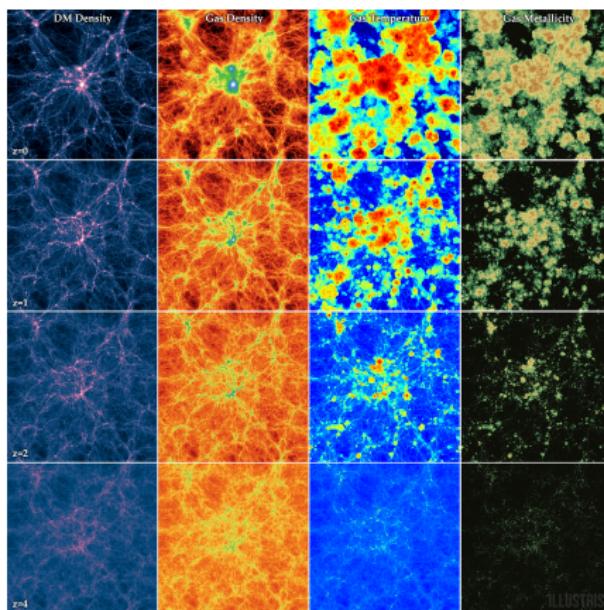
*laura.martinez13@correo.uis.edu.co, †gabriela.calistrorivera@eso.org

Organizado por:



¡Gracias por su atención!

AGN feedback



Simulaciones cosmológicas

- Regulación de la formación estelar⁵.
- Calentamiento de gas en halos de masa (modo radio)⁶.
- Eyección de energía, masa y momento⁷.
- Enriquecimiento del IGM y CGM por eyección de metales⁵.

Tomada de: <https://www.illustris-project.org/media/>.

⁵Suresh, J., et al. (2015). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 448(1), 895-909.

⁶Sijacki, D., et al (2007). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 380(3), 877-900.

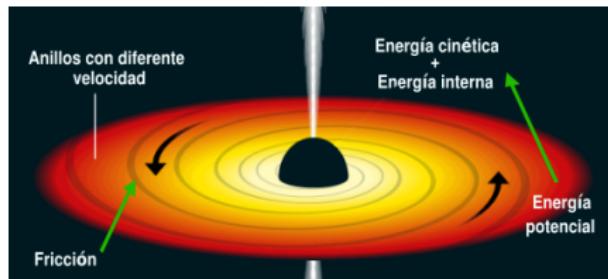
⁷Kauffmann, G., Nelson, D., Ménard, B., & Zhu, G. (2017). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 468(3), 3737-3745.

Principales componentes de los AGN

Disco de acreción

Conformado por gas en rotación cayendo en el agujero negro y emitiendo como cuerpo negro.

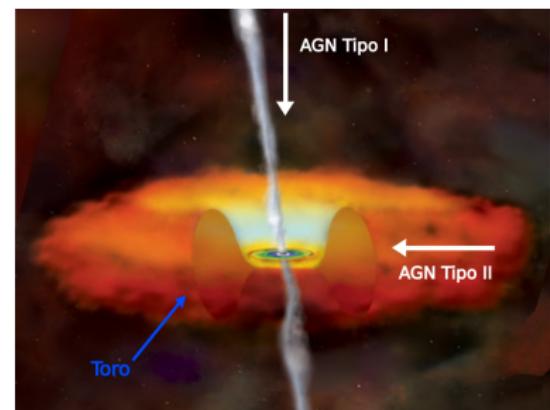
$$T(r) = \left(\frac{GM_{\bullet}\dot{m}}{8\pi\sigma_{\text{SB}}r^3} \right)^{1/4}$$



Editada de: [https://www.theguardian.com/science/2019/apr/10/black-hole-picture/captured-for-first-time-in-space-breakthrough](https://www.theguardian.com/science/2019/apr/10/black-hole-picture-captured-for-first-time-in-space-breakthrough)

Toro

Gas y polvo alrededor del disco de acreción que absorbe radiación en el óptico y UV re-emitiéndola en el IR.



Editada de: http://research.iac.es/proyecto-consolider-ingeniyo-gtc/images/stories/Difusion/Reportajes/accretiondisk_torus.jpg

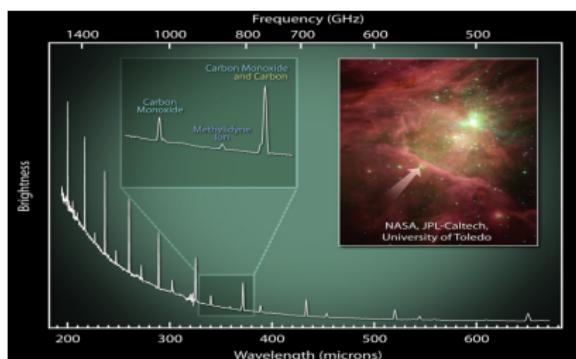
Principales componentes de los AGN

Galaxia anfitriona

Síntesis de población estelar.

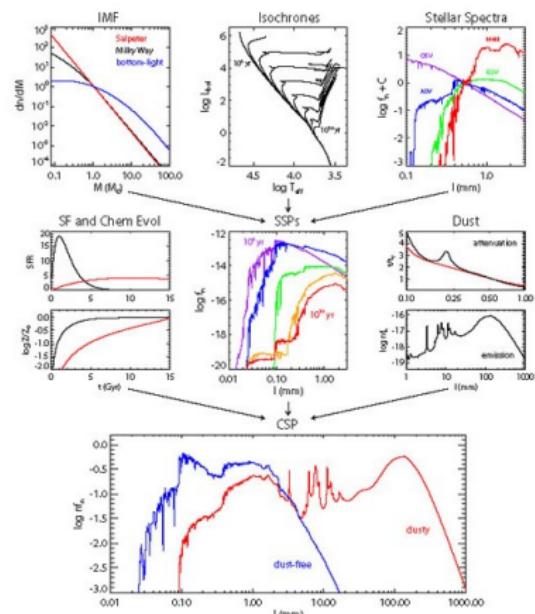
Regiones de formación estelar

Gas frío y denso ${}^8\text{C}$ con emisión en MIR y FIR y líneas por colisión y recombinación.



Tomada de: <https://www.cosmos.esa.int/web/herschel/first-spectroscopy>

⁶ Con temperaturas entre 10 [K] y 30 [K] y una densidad de 10^4 cm^{-3}



Tomada de: <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept14/Conroy/Conroy2.html>

Algunas ecuaciones

Líneas anchas (Ensanchamiento Doppler)

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta v}{c}$$

Tipicamente $v \approx 1000 \text{ km/s}$ ⁹.

Profundidad óptica¹⁰

$$\tau_\nu = \int_0^z k_\nu \rho dz = \int_0^z \alpha_\nu dz = \sigma N$$

- k_ν [cm^2/g] es el coeficiente de absorción.
- ρ [g/cm^3] es la densidad de masa.
- α_ν [$1/\text{cm}$] es el coeficiente de absorción.
- σ [cm^2] es la sección transversal.
- N [$1/\text{cm}^2$] es la densidad de columna.

Disco de acreción¹²

Pérdida de energía potencial:

$$\Delta E = \frac{GM_\bullet m}{r} - \frac{GM_\bullet m}{r + \Delta r} \approx \frac{GM_\bullet m}{r} \frac{\Delta r}{r}$$

Luminosidad emitida:

$$\Delta L = \frac{GM_\bullet \dot{m}}{2r^2} \Delta r = 4\pi r \Delta r \sigma_{\text{SB}} T^4(r)$$

Temperatura de anillos:

$$T(r) = \left(\frac{GM_\bullet \dot{m}}{8\pi\sigma_{\text{SB}} r^3} \right)^{1/4}$$

¹²Schneider, P. (2014). Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction. Springer.

¹³Irwin, J. A. (2007). Astrophysics: decoding the cosmos. John Wiley & Sons.

Algunas ecuaciones

Líneas por colisión y recombinación

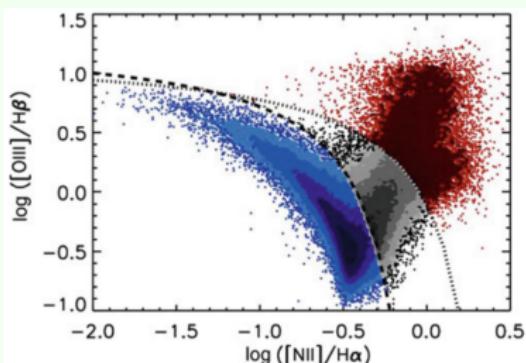


Diagrama BPT con fuentes de líneas de emisión: polvo frío (azul), AGN (rojas) y objetos compuestos (gris). Tomada de: ¹⁴.

- Recombinación de átomos ionizados
- Desexcitación de átomos excitados por la colisión e interacción con fotones.

Síntesis de población estelar

$$F_{\lambda}(t) = \int_0^t dt' \psi(t-t') S_{\lambda, Z(t-t')} (t')$$

- $\psi(t) = -\frac{dM_{\text{gas}}}{dt}$ es la tasa de formación estelar.
- $S_{\lambda, Z(t-t')}$ energía emitida por λ por intervalo de tiempo.
- Z es la metalicidad.
- t' es la edad de la galaxia.

Modelo estándar

$$\psi(t) = \frac{H(t-t_f)}{\tau} \exp\left(-\frac{(t-t_f)}{\tau}\right)$$

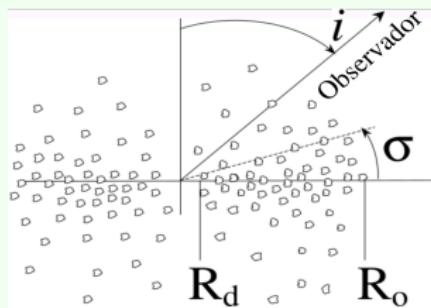
¹⁴ Schneider, P. (2014). Extragalactic astronomy and cosmology: an introduction. Springer.

Toro de polvo caliente

Toro homogéneo

- Basado en SED de galaxias Seyfert.
- Transferencia radiativa: GRASIL.
- El único parámetro es N_H .

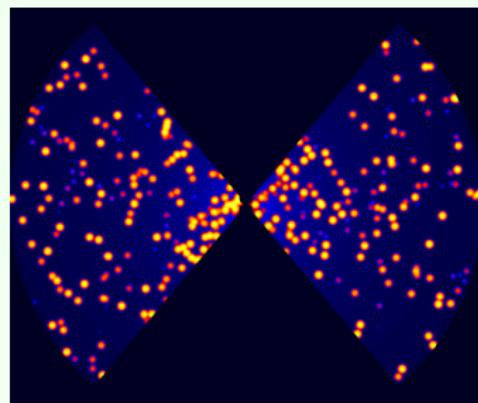
Toro grumoso



Tomado de: Nenkova, M. et al. (2008). *Astrophys. J.*, 685(1), 160.

- Parámetros: Y , σ , q , i , \mathcal{N}_0 y τ_V .

Toro de 2 fases

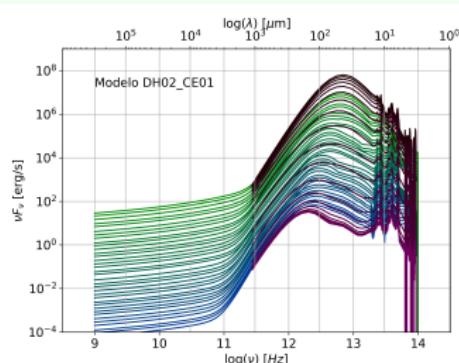


Tomado de: Stalevski, M. et al. (2016). *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, 458(3), 2288-2302.

- Transferencia radiativa: SKIRT.
- Parámetros: $\tau_{9,7}$, p , q , Δ , R y i .

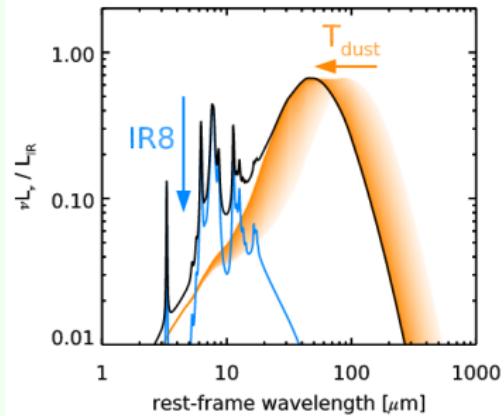
Polvo frío de las regiones de formación estelar

Modelo semiempírico



- Chary & Elbaz: SED de: Arp220 (ULIRG), NGC6090 (LIRG), M82 (*Starburst*) y M51 + ISOCAM.
- Dale & Helou: IRAS/ISO + SCUBA, ISOLWS, ISOPHOT Serendipity, y correlación FIR-radio.

Modelo de 2 componentes

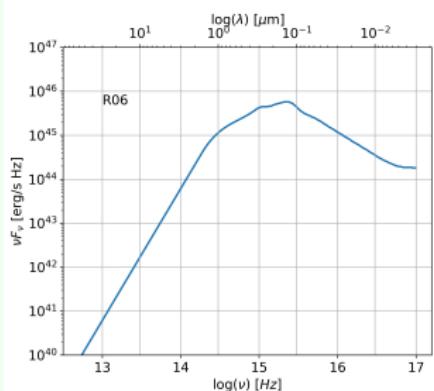


Tomado de: Schreiber, C. et al. (2018). *Astronomy & Astrophysics*, 609, A30.

- Emisión del polvo (continuo) y PAH.
- Parámetros: L_{IR} , T_{polvo} y f_{PAH} .

Disco de acreción

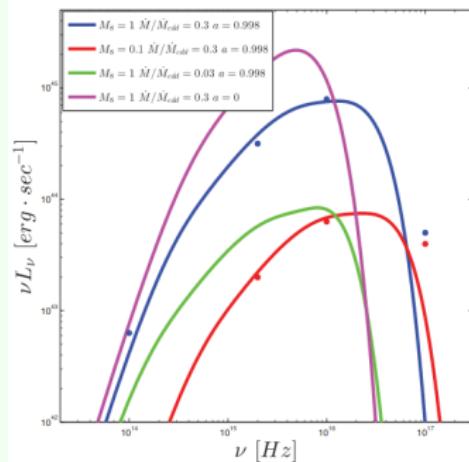
Modelo semiempírico



Tomado de: Richards, G. et al. (2006). The Astronomical Journal, 131(6), 2766.

- Datos de QSO tipo 1 del SDSS.
- SED truncadas en el NIR y para $\lambda > 5 \mu\text{m}$ modeladas como un cuerpo negro.

Modelo de disco α con viento



Tomado de: Slone, O., & Netzer, H. (2012). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 426(1), 656-664.

- Disco ópticamente grueso + vientos (\dot{M} variable) + correcciones relativistas.
- Parámetros: M_{BH} , \dot{M} y a .

Estadística bayesiana y Cadenas Markov de Monte Carlo

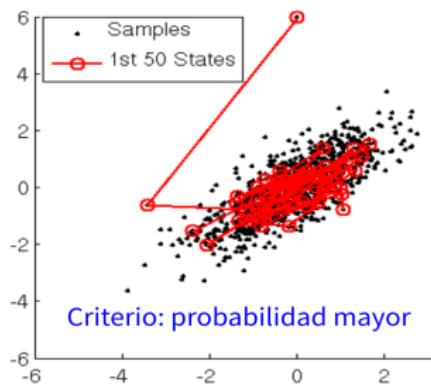
Teorema de Bayes

$$P(\vec{\rho} | \text{datos}) = \frac{P(\text{ datos} | \vec{\rho}) P(\vec{\rho})}{P(\text{ datos})} \quad \begin{matrix} \text{Prior} \\ \text{Evidencia} \end{matrix}$$

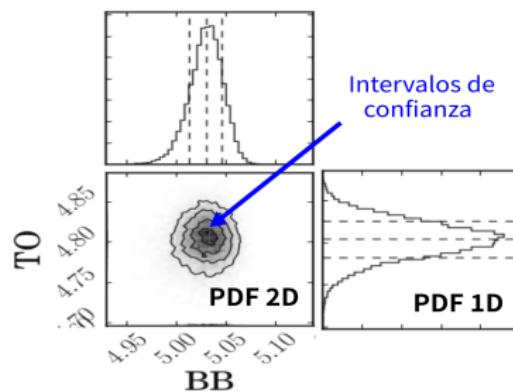
Función de verosimilitud

$$\mathcal{L}(\text{datos}, \vec{\rho}) \propto \prod_{i=0}^n \exp \left[-\frac{[\text{datos}_i - f(\vec{\rho}|\nu)]^2}{2\sigma_i^2} \right]$$

Caminata en el espacio de parámetros



$$P(\rho_i) = \int d\rho_1 \dots d\rho_k P(\vec{\rho} | \text{datos})$$



Datos de Brown

Nombre	Coordinadas (J2000)		<i>z</i>	<i>m_g</i>	<i>M_g</i>	E(B-V) (mag)	Aper. foto.	Clase de AGN	Rango de escala
3C 120	68.2962	5.3543	0.0330	13.5	-21.8	0.36	10''	S1.5	1.0-1.7
3C 273	187.2779	2.0524	0.1583	12.8	-26.4	0.03	10''	S1.0	0.9-1.2
3C 390.3	280.5375	79.7714	0.0561	14.9	-21.7	0.09	10''	S1.5	0.5-25
Ark120	79.0475	-0.1498	0.0327	13.6	-22.1	0.12	10''	S1.0	0.8-4.0
H 1821 + 643	275.4888	64.3434	0.2968	14.2	-26.6	0.05	10''	S1.2	1.0-1.2
Mrk 421	166.1138	38.2088	0.0300	13.4	-22.3	0.02	10''	HP	1.0-2.9
Mrk 509	311.0406	-10.7235	0.0344	13.2	-22.3	0.06	15''	S1.5	1.0-1.2
Mrk 817	219.0919	58.7943	0.0315	14.3	-21.4	0.01	10''	S1.5	0.6-1.2
Mrk 876	243.4882	65.7193	0.1290	14.6	-23.9	0.03	20''	S1.0	0.6-1.5

Propiedades de la muestra de galaxias: nombre, ascensión recta y declinación en el año juliano 2000 en coordenadas ecuatoriales, *redshift*, magnitudes aparente y absoluta en la banda g, el exceso de color en las bandas azul y visual, diámetro de la apertura circular, tipo de AGN y rango de escala en la normalización de sus datos fotométricos. Brown, M. et al. (2019).Mon. Notices Royal Astron. Soc., 489(3), 3351-3367.

Los datos fotométricos corresponden a imágenes tomadas con: GALEX , Swift , SDSS, PanSTARRS, Skymapper, 2MASS, WISE, IRAC, SPIRE y PACS usando aperturas circulares con los diámetros dados en la tabla.

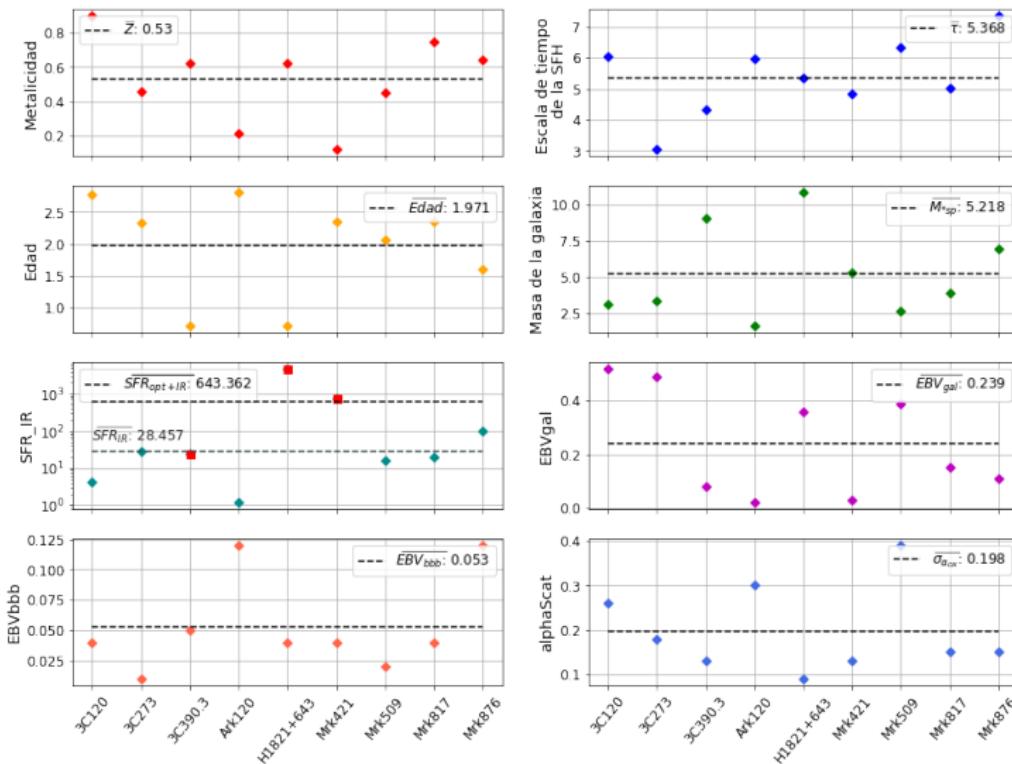
Parámetros de los mejores ajustes

Galaxia	Máx In-likelihood	metal	tau	age	EBVgal	EBVbbb	alpha	$\log(M_{*sp})$	$SFR_{opt/UV}$	SFR_{IR}
3C 120	-62.2	1.70	7.31	9.85	0.57	0.04	0.10	10.4631	3.2462	5.8718
3C 273	-75.5	1.65	5.26	7.52	0.54	0.00	-0.01	10.7639	1974.6185	52.1267
3C 390.3	-36.1	1.67	5.55	9.07	0.55	0.01	0.04	5.3835	0.0004	-
Ark120	-51.8	1.69	4.00	9.79	0.58	0.00	-0.03	9.4104	0.2532	3.8367
H1821+643	-57.1	1.62	4.52	8.09	0.46	0.01	-0.01	5.0696	0.0016	-
Mrk421	-60.6	1.75	4.81	7.21	0.57	0.03	0.00	9.1714	82.9202	-
Mrk509	-27.4	1.76	7.01	7.43	0.59	0.00	-0.06	8.8546	28.3679	16.0447
Mrk817	-44.9	1.75	5.21	7.77	0.55	0.02	-0.02	7.0769	0.2889	14.8249
Mrk876	-42.4	1.65	4.43	7.55	0.56	0.01	0.00	9.8820	274.6658	101.1682

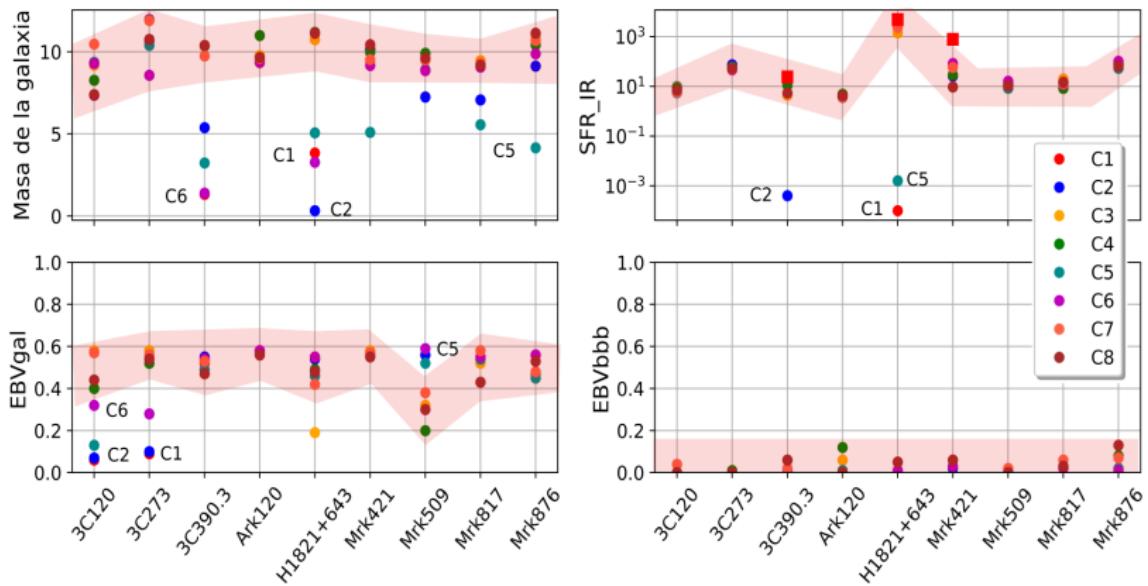
Cuadro: Parámetros del mejor ajuste de SED para cada galaxia de la muestra.

Las propiedades $\log(M_{*sp})$, $SFR_{opt/UV}$ y SFR_{IR} son productos calculados a partir de los parámetros de ajuste de la emisión de la galaxia (los dos primeros) y de la luminosidad en el IR (el último).

Diferencias promedio



Propiedades modelo dependientes



Estas gráficas indican modelo-dependencia para las combinaciones **C1**, **C2**, **C5** y **C6** solo para algunas galaxias. Estas combinaciones tienen en común el antiguo modelo de disco de acreción.

Propiedades de la galaxia

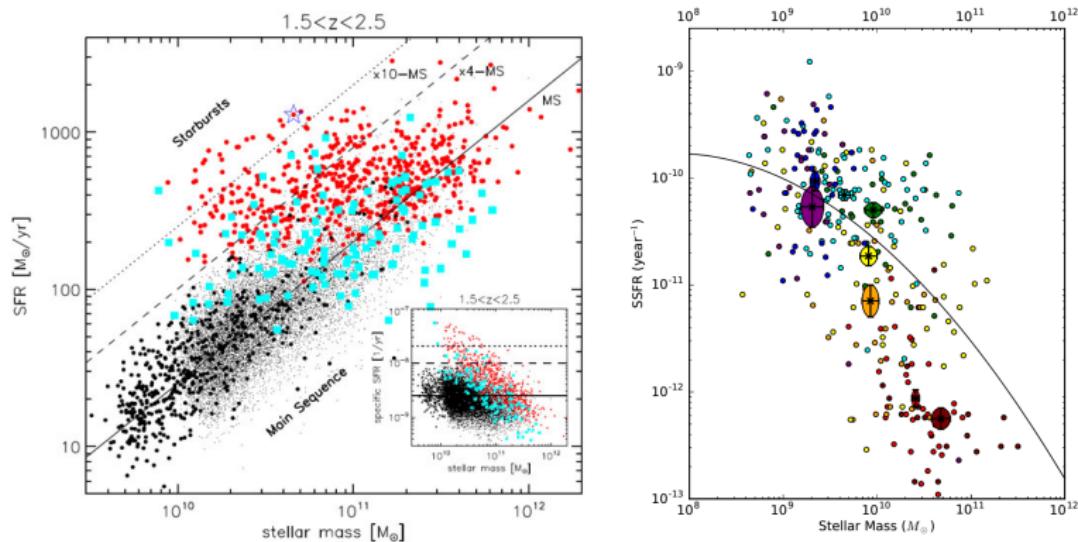


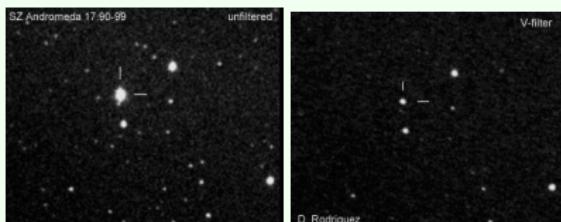
Diagrama de la tasa de formación estelar contra la masa estelar de la galaxia en $1,5 < z < 2,5$ (izquierda).

Tomada de: <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept13/Silk/Silk10.html> Gráfico de la tasa de formación estelar específica contra la masa estelar de la galaxia (derecha). Tomada de: Eales, S., et al. (2016). Mon. Notices Royal Astron. Soc., 465(3), 3125-3133.

Fotometría vs Espectroscopía

Fotometría

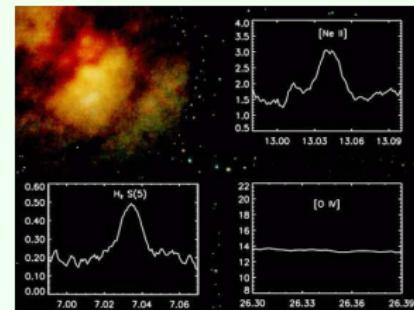
- Usa el brillo o flujo total de la radiación electromagnética.
- Presenta una buena relación señal a ruido.
- Permite obtener el espectro de numerosas fuentes al tiempo.
- Se usan CCD + filtros



Tomado de: <http://www.astro-digital.com/7/fotometria.html>

Espectroscopía

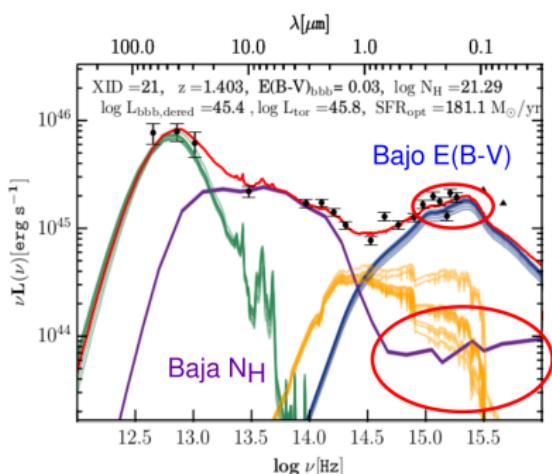
- Dispersa la luz en diferentes longitudes de onda.
- Presenta buena resolución espectral.
- Difícil obtener el espectro de varias fuentes al tiempo.
- Se usan elementos dispersivos.



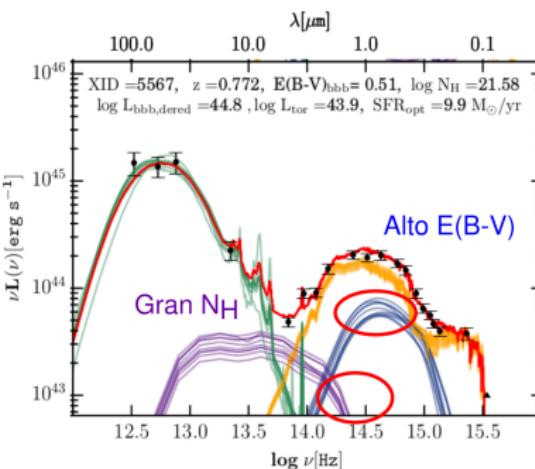
Tomado de: <http://www.astronomiadecampo.com/analizando-la-luz-de-los-astros/>

AGN tipo I y II

AGN tipo I



AGN tipo II



- Alta emisión del disco de acreción
- Poca contribución de la galaxia

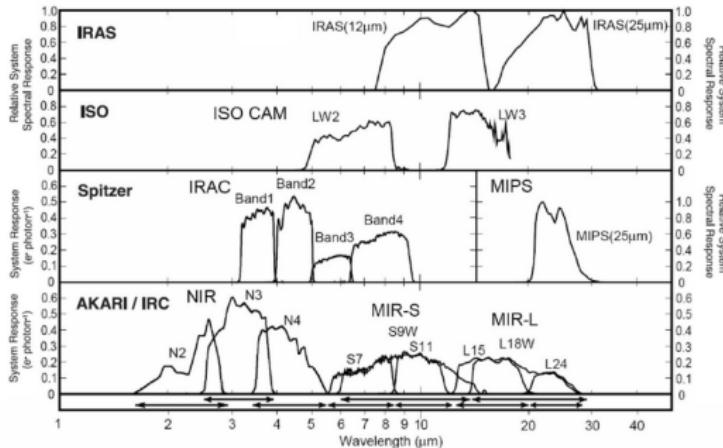
- Poca emisión del disco de acreción
- Alta contribución de la galaxia

Editado de: Rivera, G. C. et al. (2016). *Astrophys. J.*, 833(1), 98.

Sistemas fotométricos

Flujo teórico a partir de los modelos físicos de emisión (F_λ) y las características del telescopio (función de transferencia $S(\lambda)$):

$$F_S = \frac{\int F_\lambda S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} .$$



Funciones de transferencia para algunos telescopios conocidos y sus respectivos filtros en el rango del infrarrojo.
Tomada de: Matsuhara, H et al.(2006). Deep extragalactic surveys around the ecliptic poles with AKARI (ASTRO-F).