

Análisis multifrecuencia de la tasa de formación estelar en galaxias de la muestra CALIFA

Multifrequency analysis of the star formation rate in the CALIFA sample of galaxies

Cristina Catalán Torrecilla
(ccatalan@astrax.fis.ucm.es)

Trabajo de Fin de Máster y Trabajo de Iniciación a la Investigación (24 créditos)
Máster Interuniversitario en Astrofísica UCM-UAM

Supervisores: Armando Gil de Paz (agil@fis.ucm.es)
& África Castillo Morales (acasmor@fis.ucm.es)

Dpto. de Astrofísica y Ciencias de la Atmósfera
Universidad Complutense de Madrid

Convocatoria: Septiembre 2012
Calificación obtenida: 9.5



Keywords

Galaxy: Formation, Galaxies: Spiral, Ultraviolet: Galaxies, Techniques: Photometric, Techniques: Spectroscopic
Galaxia: Formación, Galaxias: Espiral, Ultravioleta: Galaxias, Técnicas: Fotometría, Técnicas: Espectroscopía

Abstract

The Calar Alto Legacy Integral Field Area survey (CALIFA survey) has been designed to be the first survey to provide Integral Field Spectroscopy (IFS) data for a statistical sample of all galaxy types (~ 600 galaxies) in the Local Universe ($0.005 < z < 0.03$) covering the optical wavelength range. We compare these data with the ones in the UV range obtained by GALEX (GALaxy Evolution eXplorer) satellite at both far-UV (FUV) and near-UV (NUV) wavelengths and imaging data in the near-infrared ($22 \mu\text{m}$) from WISE. The main objective of our work will be to provide a robust determination of the star formation rate (SFR) in galaxies as a crucial element to understand galaxy evolution. We will focus on the analysis of this property using different tracers/calibrators: dust-extinction-corrected $\text{H}\alpha$ -line emission (from CALIFA), FUV continuum (from GALEX), and infrared luminosities (from WISE). Besides a global comparison of the total SFR in the sample we will also identify those galaxies where these estimates clearly depart suggesting the presence of significant amounts of hidden star formation or variations in the IMF. Once these objects are identified we will study the spatial distribution of the different SFR tracers to know whether the discrepancies are ubiquitous in each galaxy or they are associated to specific, individual regions. The SFR are derived using both simple and hybrid recipes (see Calzetti 2012 for a recent compilation). In the case of the recipes based on a single photometric band (simple) we have used the extinction-corrected UV and $\text{H}\alpha$ and the observed mid- or far-infrared luminosities. The hybrid ones combine luminosities measured directly (observed UV or $\text{H}\alpha$) with that of the light emitted by dust after being heated by young massive stars (in our case the WISE $22 \mu\text{m}$ luminosity). We have discovered that the results obtained depend in what calibrators we are using, in particular the SFR FUV correlate well with SFR $\text{H}\alpha$ once both have been properly corrected for dust attenuation. On the contrary, in the case of the SFR $22 \mu\text{m}$ a significant fraction of the SF is transparent and finally when the hybrids calibrators are using we can recover part of the total amount of SF that we could not observe with only $22 \mu\text{m}$ data.

Resumen

La exploración Calar Alto Legacy Integral Field Area (CALIFA survey) ha sido diseñado para ser el primer estudio que proporcione datos de espectroscopía de campo integral (IFS, del inglés *Integral Field Spectroscopy*) para una muestra estadística de galaxias de todos los tipos (~ 600 galaxias) en el Universo Local ($0.005 < z < 0.03$) y cubriendo el rango de longitud de onda óptico. A lo largo de este trabajo hemos comparado estos datos con los mismos en el rango UV obtenidos por el satélite GALEX (GALaxy Evolution eXplorer) en ambas bandas UV-lejano y UV-cercano y con los datos de imagen en el infrarrojo cercano ($22 \mu\text{m}$) gracias a WISE. El objetivo principal de este trabajo será proporcionar una determinación robusta de la tasa de formación estelar (SFR, del inglés Star Formation Rate) en las galaxias como un elemento crucial para entender la evolución de las galaxias. Nos centraremos en el análisis de esta propiedad usando distintos trazadores/calibradores: emisión de la línea $\text{H}\alpha$ corregida de extinción por polvo (de CALIFA), el continuo del UV-lejano (de GALEX) y las luminosidades infrarrojas (de WISE). Además de una comparación global de la SFR total en las galaxias de la muestra, también identificaremos aquellas galaxias donde las estimaciones sugieren la presencia de cantidades importantes de formación estelar oscurecida o variaciones de la IMF. Una vez que estos objetos se han identificado estudiaremos la distribución espacial de los distintos trazadores de SFR para conocer si las discrepancias son propias de cada galaxia en su conjunto o si están asociadas a regiones individuales. Las SFRs se han derivado usando trazadores simples e híbridos (ver Calzetti 2012 para una compilación reciente de los mismos). En el caso de las expresiones basadas en una única banda fotométrica (trazadores simples) hemos usado las luminosidades UV y $\text{H}\alpha$ corregidas de extinción y la luminosidad infrarroja observada. Los trazadores híbridos combinan luminosidades medidas directamente (UV o $\text{H}\alpha$ observadas) con la luz emitida por el polvo después de ser calentado por estrellas jóvenes y masivas (en nuestro caso la luminosidad a $22 \mu\text{m}$ de WISE). Hemos descubierto que los resultados obtenidos dependen de qué calibradores estemos usando, en particular la tasa de formación estelar derivada del UV-lejano correlaciona bien con la tasa de formación estelar derivada de la línea $\text{H}\alpha$ una vez que ambos trazadores han sido corregidos apropiadamente de la extinción por polvo. Por el contrario, en el caso de la tasa de formación estelar derivada de la luminosidad a $22 \mu\text{m}$ una fracción importante de la formación estelar es transparente. Finalmente en el caso de los trazadores híbridos conseguimos recuperar una parte de la cantidad total de formación estelar que no podíamos observar cuando empleamos sólo los datos a $22 \mu\text{m}$.

Índice

1. Introducción	4
1.1. Importancia de la medida de la tasa de formación estelar en un contexto general	4
1.2. Problemas y limitaciones de las medidas de SFR	4
1.2.1. Diferentes indicadores y aproximaciones	4
1.2.2. SFR oscurecida	5
1.2.3. Limitaciones en resolución espacial	5
1.3. Calibraciones: empíricas y basadas en modelos	6
2. Motivación	7
3. Observaciones y Reducción	7
3.1. Proyecto CALIFA	7
3.2. Muestra CALIFA	8
3.3. Observaciones GALEX	10
3.4. Observaciones WISE	10
3.5. Sumario de observaciones	10
4. Análisis	13
4.1. CALIFA: fotometría integrada y superficial	13
4.2. CALIFA: Análisis bi-dimensional	14
4.3. GALEX: fotometría integrada y superficial	15
4.4. WISE: fotometría integrada	17
4.5. Corrección de atenuación	17
4.5.1. Decremento Balmer	17
4.5.2. Extinción del continuo estelar	17
4.6. Medidas de SFR. Calibradores simples e híbridos usados	18
5. Resultados	22
5.1. Caracterización en el UV de la muestra CALIFA	22
5.2. Comparación de la SFR integrada	25
5.2.1. Trazadores simples	25
5.2.2. Trazadores híbridos	25
5.3. Atenuación y excesos de color	26
5.4. Análisis bi-dimensional: mapas de SFR y atenuación	27
5.5. Análisis bi-dimensional: estudio de la variación radial de las SFRs	29
6. Conclusiones y trabajo futuro	30

1. Introducción

1.1. Importancia de la medida de la tasa de formación estelar en un contexto general

La medida de la tasa de formación de estrellas (o SFR, del inglés *Star Formation Rate*) es uno de los parámetros fundamentales en el estudio de la evolución de las galaxias, pues proporciona claves tanto sobre la abundancia de gas en galaxias como sobre la eficiencia de formación de estrellas en estas, lo que depende fuertemente de las condiciones físicas del medio interestelar a partir del cual se forman dichas estrellas (densidad, temperatura, abundancia química, dinámica). Así mismo, puesto que la formación de estrellas implica la formación, entre otras, de estrellas de gran masa (quizás exceptuando regiones de muy baja densidad; Krumholz & McKee 2008, *Nature*, 451, 1082; ver, sin embargo, Koda et al. 2012, *ApJ* 749, 20) que poseen una elevada luminosidad Ultravioleta (UV), es posible observar la presencia de regiones de formación de estrellas incluso a distancias cosmológicas. Esto hace de la evolución de la tasa de formación de estrellas un parámetro fundamental para el testeo de simulaciones sobre la formación y evolución de estructuras en el Universo (Cucciati et al. 2012, *A&A* 539, A31 y referencias allí citadas).

Tal es la importancia de la SFR que múltiples autores han tratado de entender cual es la evolución de la densidad de la tasa de formación estelar con el desplazamiento al rojo. Distintos trazadores pueden emplearse para obtener SFRs a diferentes desplazamientos al rojo: continuo ultravioleta, líneas nebulares como $[\text{OII}]\lambda\lambda 3726,3729\text{\AA}$ o $\text{H}\alpha$, la luminosidad infrarroja (IR) o la luminosidad en radio continuo (ver Figura 1).

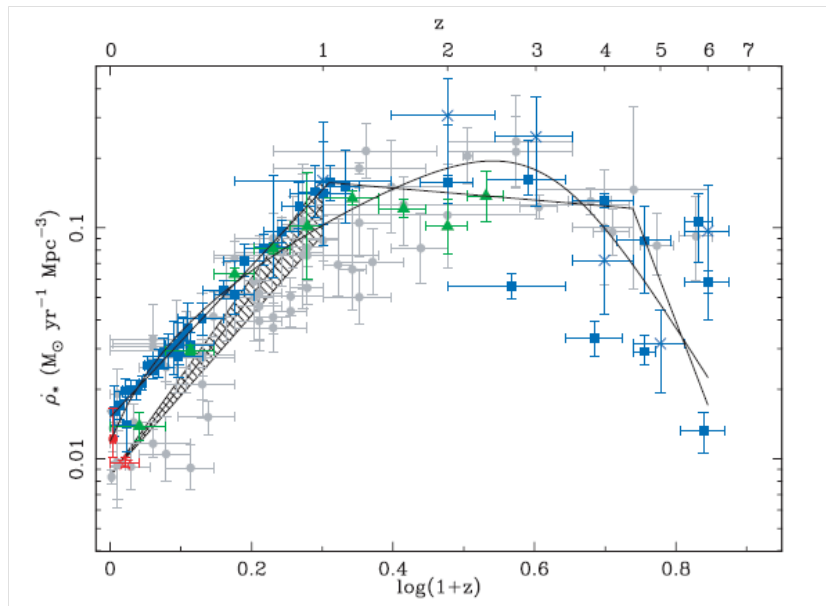


Figura 1: Evolución de la densidad de la SFR con el desplazamiento al rojo, tomada de Hopkins et al. (2006). Los datos que se muestran han sido escalados usando una IMF de Salpeter (1955). Los cuadrados azules se refieren a medidas en el UV, los triángulos verdes en el FIR y los puntos grises provienen de la compilación de Hopkins et al. (2004).

1.2. Problemas y limitaciones de las medidas de SFR

1.2.1. Diferentes indicadores y aproximaciones

El principal inconveniente en el uso de la SFR a la hora de analizar tanto las condiciones físicas del gas como la evolución del conjunto de la población de galaxias es el hecho de que el observador no puede acceder al total de la población de estrellas formadas en un determinado instante, ni siquiera es capaz de determinar con precisión en que instante se formaron dichas estrellas, especialmente en el caso de las más longevas. Esto hace que la gran mayoría de los estimadores de la SFR provengan del estudio de la luminosidad de estrellas con tiempos de vida cortos (estrellas masivas), como el caso de la luminosidad UV no-ionizante (dominada por emisión directa de estrellas OB), la luminosidad $\text{H}\alpha$ en regiones HII ionizadas por estrellas tipo O y la luz remitida por el polvo en el IR proveniente de estas.

En nuestro caso utilizaremos principalmente medidas de la SFR obtenidas a partir de las luminosidades en las bandas ultravioleta (UV) y de la línea de emisión $H\alpha$. La comparación entre la SFR obtenida por ambos métodos da también información sobre posibles variaciones del extremo de mayor masa de la Función Inicial de Masas (IMF, del inglés *Initial Mass Function*) o sobre cambios en la historia de formación estelar reciente en escalas de tiempo a los que la emisión UV y $H\alpha$ son sensibles.

La Figura 2 muestra como distintos trazadores proporcionan diferentes aspectos de la misma galaxia, en este caso la conocida galaxia del remolino o M51a junto a su compañera (M51b). Así la imagen (a) con datos del UV de GALEX muestra estrellas brillantes de alta masa, como son estrellas que se han debido de formar recientemente. La relativamente “corta” vida de estas estrellas masivas, desde alrededor de 10 a unos pocos 100 Myr, nos da información de la formación estelar reciente. En la imagen (b) tenemos la galaxia en el visible proporcionada por la exploración Sloan (SDSS), se observan estrellas de masa intermedia, gas caliente, gas y polvo por reflexión de la luz de estrellas, etc. Las imágenes (c) y (d) corresponden al satélite Spitzer, aquí el infrarrojo nos permite apreciar estrellas de baja masa y el polvo que reprocessa la luz de las estrellas masivas. Por último, las imágenes (e) y (f) que trazan respectivamente la distribución del gas molecular y la emisión en radio, en concreto, la traza de la línea de 21 cm de hidrógeno atómico.

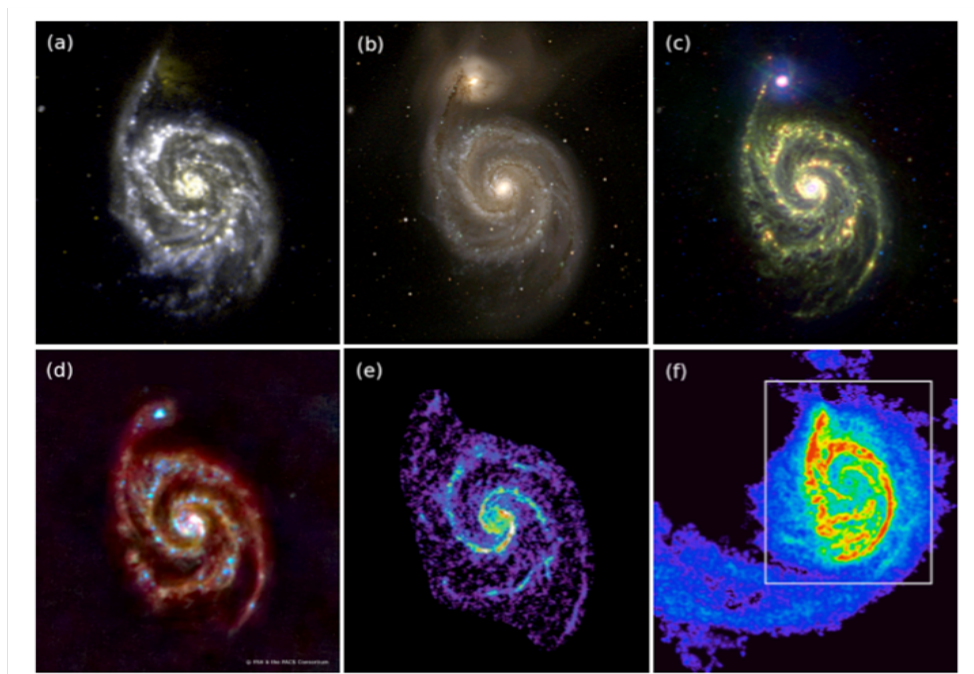


Figura 2: Imágenes en distintas bandas de la galaxia NGC 5194 (también conocida como M51a o Galaxia del Remolino)

1.2.2. SFR oscurecida

El estudio de la SFR en galaxias o incluso de las poblaciones estelares en general requiere de una precisa determinación de la cantidad de polvo presente en dichas galaxias o, al menos, de la atenuación producida por dicho polvo. En este trabajo corregiremos nuestras medidas de luminosidad UV y $H\alpha$ a partir, respectivamente, de la pendiente del espectro ultravioleta (i.e. del color FUV-NUV; constante y fijo para regiones con formación estelar libres de polvo) y del valor del decremento Balmer ($H\alpha/H\beta$).

Algunos estudios llevados a cabo hasta el momento muestran que existen regiones oscurecidas en algunas de las galaxias estudiadas. La Figura 3 corresponde a un artículo de Prescott et al. (2007) para la muestra de galaxias SINGS, por lo que trabajos de este tipo deben ser revisados y ampliados. Es importante destacar que la muestra SINGS no es una muestra completa y no puede considerarse como representativa de las galaxias del Universo Local en general.

1.2.3. Limitaciones en resolución espacial

Hasta época reciente los estudios de las propiedades de las poblaciones estelares y el medio interestelar se ha limitado a trabajos de imagen óptica e infrarroja (cercana) o a espectroscopía óptica de rendija larga. Aunque

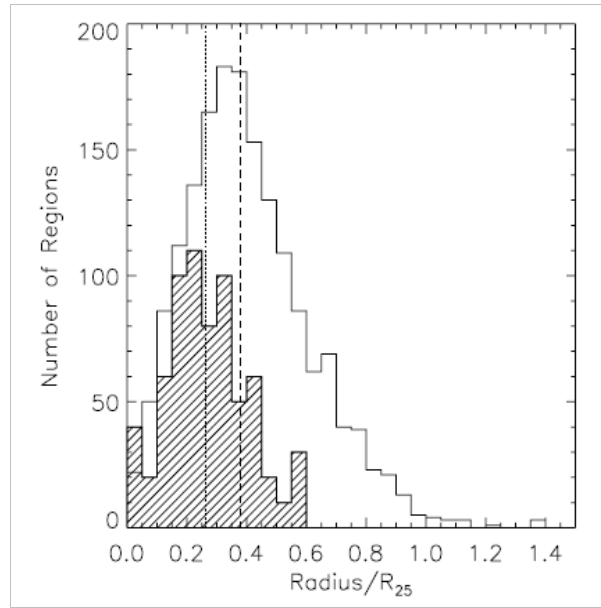


Figura 3: Histograma que muestra como las regiones más oscuras de las galaxias estudiadas se encuentran generalmente próximas al centro de la galaxia, región punteada (ver Prescott et al. 2007). Nótese que el histograma de regiones completamente oscuras está multiplicado por $\times 10$ respecto al histograma hueco correspondiente a todas las regiones.

las calibraciones de SFR han existido con distintos niveles de precisión durante muchos años, los últimos diez años han sido especialmente fructíferos en este terreno gracias a los surveys multi-frecuencia de galaxias cercanas y distantes. Estas exploraciones han explotado la sensibilidad, la resolución angular y los grandes campos de visión de los telescopios espaciales (Spitzer, GALEX, HST), sin olvidarnos de la influencia de los estudios que cubren todo el cielo (SDSS). Esto último ha permitido generar definiciones de indicadores de SFR dentro de nuevos regímenes, tanto en lo que concierne a los rangos de longitud de onda empleados como a las escalas espaciales. Los nuevos estudios de espectroscopía óptica bi-dimensional con unidades de campo integral (IFU, del inglés *Integral Field Unit*), como el que presentamos en este trabajo, permitirán avanzar significativamente en este campo, al permitir el estudio de los trazadores ópticos con resolución espacial y con precisión mejorada (substracción del continuo estelar, corrección de atenuación por polvo).

1.3. Calibraciones: empíricas y basadas en modelos

El estudio de la SFR en galaxias es uno de los campos de mayor actividad en el estudio de galaxias. Sin embargo, estos estudios necesitan de calibradores que permitan determinar la SFR a partir de la medida de ciertas magnitudes observacionales relacionadas con el número de estrellas recientemente formadas en una galaxia (ver Kennicutt et al. 1998 y referencias allí citadas). Las técnicas empleadas para medir la tasa a la cual las estrellas se están formando varían enormemente, dependiendo de si el sistema a estudiar puede resolverse en unidades individuales como estrellas jóvenes, asociaciones de estrellas OB o incluso estructuras a mayor escala o si por el contrario sólo pueden estudiarse sus propiedades integradas. En todos los casos, sin embargo, el objetivo básico es identificar emisión que pruebe que hay estrellas nuevas o formadas recientemente, evitando en la medida de lo posible las contribuciones de las estrellas de poblaciones evolucionadas. Así los indicadores de SFR en el UV/óptico/IR cercano ($0.1\text{-}5\ \mu\text{m}$) dan cuenta de la luz estelar emitida directamente por las galaxias mientras que otros indicadores como el IR medio o lejano ($5\text{-}1000\ \mu\text{m}$) trazan la luz estelar reprocesada por el polvo. La Tabla 1 muestra algunos de los indicadores de SFR que pueden encontrarse en la literatura. A lo largo de este trabajo se han empleado los relativos a la emisión FUV ($\lambda\ 1530\ \text{\AA}$), $H\alpha$, IR ($22\ \mu\text{m}$), y su versión híbrida. Otros trazadores en el IR que no emplearemos se han añadido a la tabla por completitud.

Debido a los complicados efectos del polvo en la determinación de la SFR en galaxias, es necesario corregir las medidas de la SFR obtenidas a partir de la luminosidad UV o $H\alpha$ de atenuación por polvo y hacerlo además galaxia a galaxia. De ahí que en las expresiones de la siguiente tabla aparezcan los subíndices *cor* (corregidos), haciendo referencia a que esas luminosidades han sido corregidas de atenuación por el polvo interestelar presente en estas galaxias.

Otra alternativa cuyo uso se ha generalizado en los últimos 5 años es la de combinar las medidas del infrarrojo

Calibradores Simples
$\text{SFR}(\text{UV}) = 4.59 \cdot 10^{-44} \cdot \text{L}(\text{FUV})_{\text{cor}}$ $\text{SFR}(24\mu\text{m}) = 2.04 \cdot 10^{-43} \cdot \text{L}(22\mu\text{m}) \quad (1)$ $\text{SFR}(24\mu\text{m}) = 2.04 \cdot 10^{-43} \cdot \text{L}(22\mu\text{m}) + (2.03 \cdot 10^{-44} \cdot \text{L}(22\mu\text{m}))^{0.048} \quad (2)$ $\text{SFR}(70\mu\text{m}) = 5.9 \cdot 10^{-44} \cdot \text{L}(70\mu\text{m})$ $\text{SFR}(\text{TIR}) = 2.8 \cdot 10^{-44} \cdot \text{L}(\text{TIR})$ $\text{SFR}(\text{H}\alpha) = 5.5 \cdot 10^{-42} \cdot \text{L}(\text{H}\alpha)_{\text{cor}}$
Calibradores Híbridos
$\text{SFR} = 4.6 \cdot 10^{-44} \cdot (\text{L}(\text{FUV})_{\text{obs}} + 3.89 \cdot \text{L}(25\mu\text{m}))$ $\text{SFR} = 5.5 \cdot 10^{-42} \cdot (\text{L}(\text{H}\alpha)_{\text{obs}} + 0.02 \cdot \text{L}(25\mu\text{m}))$

Tabla 1: Calibradores de SFR. (1): si $4 \times 10^{42} < \text{L}(22\mu\text{m}) < 5 \times 10^{43}$, (2): si $\text{L}(70\mu\text{m}) > 1.4 \times 10^{42}$

con medidas en el UV, especialmente importantes en el caso de objetos con bajo contenido en polvo y geometrías porosas de su medio interestelar. En este sentido, se han propuesto dos tipos de trazadores "híbridos", uno basado en la combinación de datos UV (ahora observados; i.e. sin corregir de atenuación) e infrarrojos y otro basado en la combinación de datos $\text{H}\alpha$ e infrarrojos.

Los trazadores anteriores son todos ellos globales, es decir, se usan tratando la galaxia como un todo, frente a los conocidos como trazadores locales que se emplean a escalas sub-galácticas. Las relaciones anteriores aparecen en la bibliografía para $24\mu\text{m}$ (trazadores simples) y $25\mu\text{m}$ (trazadores híbridos), sin embargo a lo largo de este trabajo han sido empleadas para la luminosidad infrarroja a $22\mu\text{m}$. Los errores derivados de esta aproximación se cifran entorno a un $\sim 4\%$ y un $\sim 6\%$. De acuerdo a Kennicutt et al. (2009) la diferencia de luminosidad entre $24\mu\text{m}$ y $25\mu\text{m}$ es de un 2% . Si asumimos un ajuste de un cuerpo negro a la distribución espectral de energía del polvo nos daremos cuenta de que el error cometido usando $22\mu\text{m}$ en lugar de $24\mu\text{m}$ es del orden del 4% y de un 6% al sustituir $22\mu\text{m}$ por $25\mu\text{m}$.

Aunque aquí no se han empleado, no olvidemos que existen otros trazadores para medir la SFR como son: emisión en Rayos-X, emisión sincrotrón, emisión Bremsstrahlung, etc.

2. Motivación

El objetivo de este trabajo se centra en el estudio de diferentes trazadores de la SFR en una muestra completa de galaxias con resolución espacial, en concreto, las galaxias de la muestra CALIFA (descrita con detalle en la sección 3.1 de este trabajo) así como en el análisis de las propiedades UV de las galaxias de dicha muestra. Para ello se ha procedido a realizar la fotometría UV superficial así como los perfiles de brillo superficial para el total de la muestra CALIFA (939 galaxias). Este análisis en el UV se combinó con el análisis de los cubos en espectroscopía óptica bi-dimensional de 91 galaxias observadas como parte del proyecto CALIFA hasta la fecha de realización de este trabajo. Finalmente se obtuvieron datos del archivo de la misión WISE para el conjunto de esta muestra.

Estos datos nos han permitido en esta primera fase obtener la SFR mediante 5 trazadores diferentes (3 simples y 2 híbridos) cuya comparación (y las desviaciones existentes entre los mismos) proporcionaron claves fundamentales sobre las características de la formación de estrellas en estas galaxias y los efectos del polvo sobre los trazadores. En una etapa posterior identificaremos, ya con resolución espacial, las regiones específicas responsables de las desviaciones observadas entre dichos trazadores.

3. Observaciones y Reducción

3.1. Proyecto CALIFA

La muestra de galaxias que se estudiarán a lo largo de este trabajo pertenece al proyecto CALIFA, proyecto al cual pertenecemos tanto los supervisores de este trabajo como yo. El proyecto CALIFA (Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey) es un esfuerzo internacional liderado por España (IP: S. Sánchez, co-IPs: A. Gil de Paz, R. Kennicutt) en el que participan activamente instituciones españolas como el IAA-CSIC y el IAC, y otras internacionales como MPIA, AIP (Alemania), IoA (Reino Unido), Universidad de Groningen (Holanda),

etc., y al que se le han concedido un total de 250 noches de observación en el telescopio de 3.5m de Calar Alto (CAHA). Hace uso del espectrógrafo de campo integral PMAS (Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer) en su configuración PPAK (Pmas fiber PAcK). La IFU (del inglés *Integral Field Unit*) PPAK cuenta con un haz de fibras hexagonal que contiene 331 fibras de ciencia y 6 "mini-IFUs" compuestas de 36 fibras de cielo. Otras 15 fibras adicionales pueden iluminarse directamente por lámparas internas para calibrar el instrumento. El campo de visión de PPAK es de 74×65 segundos de arco (ver Figura 4).

3.2. Muestra CALIFA

Los espectros tomados como parte de la exploración CALIFA cubren el rango de $\lambda\lambda 3700-7000 \text{ \AA}$ en dos apuntados, uno en el rojo ($\lambda\lambda 4300-7000 \text{ \AA}$) con una resolución espectral de $R \sim 850$ (V500) y otro en el azul ($\lambda\lambda 3700-5000 \text{ \AA}$) en este caso con una resolución de $R \sim 1650$ (V1200). Cada objeto se observa con mediante una técnica de *dithering* de tres apuntados, tomándose una única exposición de 900 segundos por apuntado en el caso de la configuración V500 y dos exposiciones de 900 segundos por apuntado en el caso de V1200. Dado que el tiempo de cada apuntado es fijo y solo depende de la configuración empleada, en nuestro caso V500, los tiempos no se han anotado en la Tabla 3 al ser el mismo para todas las galaxias de la muestra. El rango utilizado ($\lambda\lambda 3700-7000 \text{ \AA}$), teniendo en cuenta el desplazamiento al rojo de las galaxias, nos permite observar simultáneamente las líneas de emisión del gas que nos interesan para nuestro estudio, $H\alpha$ y $H\beta$.

He tenido la oportunidad de participar en un período de cinco noches de observación en Calar Alto el pasado mes de Junio (20/06-24/06) junto a los astrofísicos Damián Mast y Chandreyee Sengupta dentro de las noches concedidas al proyecto CALIFA. Esta supuso mi primera experiencia como astrónoma profesional durante la cual se pudieron observar un total de media docena de objetos CALIFA en ambas configuraciones V500 y V1200 durante 5 noches fotométricas.

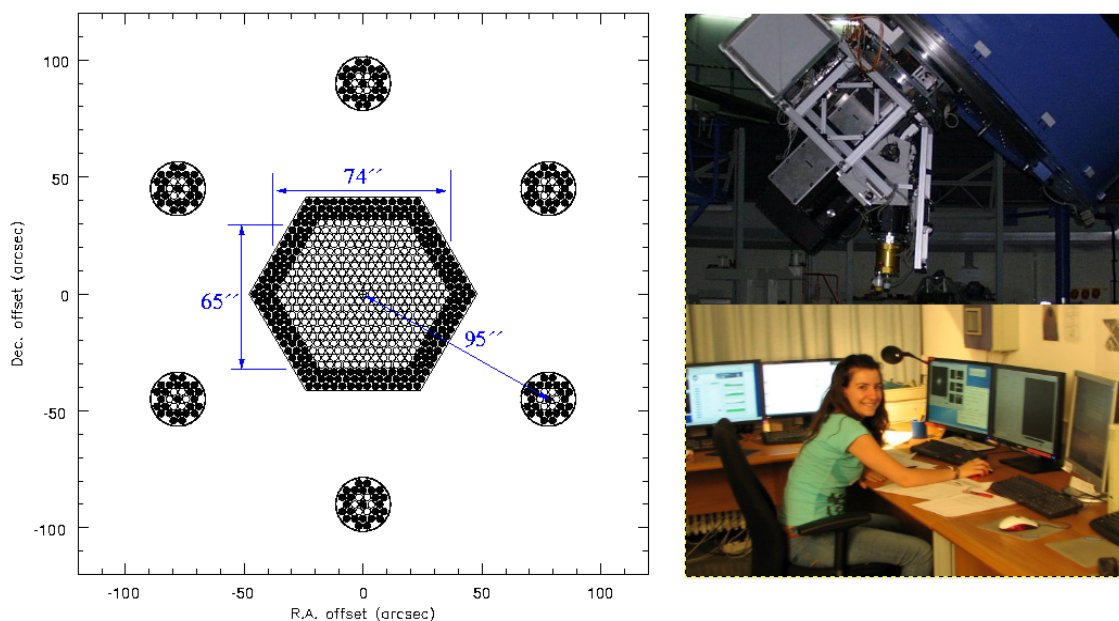


Figura 4: El instrumento PPAK en el telescopio CAHA 3.5m. En el panel de la izquierda se muestra el cubrimiento en el cielo del modo PPAK del instrumento PMAS donde se aprecia su campo de visión, 74×65 segundos de arco, así como el haz de fibras hexagonal que contiene las fibras de ciencia y las fibras de cielo que lo rodean. Las fotografías de la derecha muestran el instrumento instalado en el foco Cassegrain del telescopio de 3.5m (arriba) y la sala de control del telescopio durante un de las noches de observación concedidas al proyecto CALIFA en la que participé como observadora.

La muestra de partida (o muestra *madre*) del proyecto CALIFA contaba con 939 galaxias de todos los tipos morfológicos. Sin embargo, se planea que lleguen a observarse únicamente ~ 600 galaxias extraídas aleatoriamente (y en base a su visibilidad) de esta muestra madre. Se ha optado por una selección que combine tanto el diámetro angular de la galaxia, $45'' < D_{25} < 80''$, para cubrir toda la galaxia en un solo campo de PPAK, con unos límites en el desplazamiento al rojo ($0.005 < z < 0.03$). De este modo se cubre un amplio rango de propiedades como son

la luminosidad, el color, el tipo morfológico, etc. Es decir, contamos con una muestra limitada en volumen y en diámetro. La Figura 5 representa el diagrama color-magnitud tal y como viene cubierto por las galaxias de la muestra CALIFA.

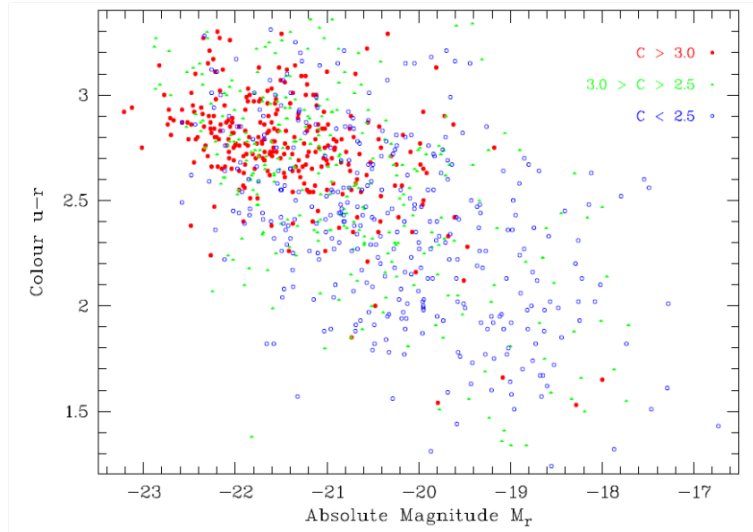


Figura 5: Diagrama color-magnitud para la muestra CALIFA. Se representa el color $u-r$ del SDSS frente a la magnitud absoluta en la banda r del SDSS. Se aprecia que el diagrama queda cubierto adecuadamente con galaxias de la secuencia roja (*red sequence*) con los valores más brillantes de la magnitud absoluta (llegando hasta -23 mag), galaxias de la nube azul (*blue cloud*) formada por galaxias con las magnitudes absolutas más débiles, así como un número significativo de galaxias en el valle verde (*green valley*) que suponen la fase de transición entre las galaxias de formación estelar y las galaxias quiescentes o pasivas, de tipos de Hubble tempranos en su mayoría.

Al inicio de este trabajo el número de galaxias observadas era de ~ 130 objetos en ambas configuraciones. A fecha de hoy ya se han observado unas 250 galaxias en la V500 y 150 en ambas configuraciones. La Figura 6, cortesía de E. Pérez (ver también Pérez et al. 2012), muestra las imágenes de densidad superficial de masa obtenidas del análisis de los cubos para las galaxias CALIFA observadas hasta la fecha.

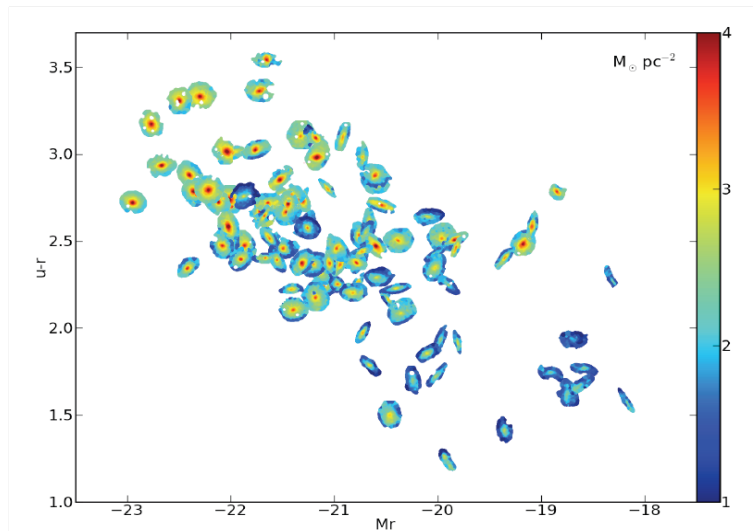


Figura 6: Diagrama color-magnitud para las galaxias CALIFA observadas hasta el momento. Cada galaxia está representada por una imagen de su distribución de densidad de masa actual, así las galaxias más rojas y luminosas son las más masivas y aparecen a la izquierda.

3.3. Observaciones GALEX

Los datos relativos al ultravioleta (UV) han sido proporcionados por la misión GALEX (GALaxy Evolution eXplorer) de la NASA, un telescopio espacial dedicado a la observación de galaxias en luz ultravioleta lanzado el 28 de Abril del 2003. GALEX con un peso de sólo 280 kilogramos, mide 2 metros de largo y 2.8 metros de ancho si tenemos en cuenta sus paneles solares. Cuenta con un campo de visión de 1.2 grados, casi 3 veces el diámetro de la luna.

A lo largo de este trabajo se han empleado datos en sus dos bandas, la del ultravioleta lejano, FUV, (del inglés *Far-UV*) centrado en $\lambda \sim 1500 \text{ \AA}$ y la banda del ultravioleta cercano, NUV, (del inglés *Near-UV*) centrado en $\lambda \sim 2200 \text{ \AA}$. La herramienta que nos ha permitido obtener las imágenes en ambas bandas ha sido la aplicación web "Galax View" de libre acceso (<http://galex.stsci.edu/GalexView/>). Las imágenes necesarias para nuestro propósito han sido: mapas de intensidad, máscaras de campo y mapas de respuesta relativa de alta resolución, seleccionando aquellas imágenes de las galaxias de la muestra madre del proyecto CALIFA (ver Sumario). Las imágenes se eligen teniendo en cuenta que el tiempo de exposición sea el máximo en el FUV así como que la galaxia completa caiga dentro del detector, para ello hemos sido conservadores y hemos impuesto una distancia al centro del detector de 0.5 grados.

De las 939 galaxias que componen la muestra madre de CALIFA se han seleccionado todas aquellas que poseen datos en las bandas anteriores obteniéndose un total de 630 (578 en ambas bandas).

3.4. Observaciones WISE

WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) es un satélite de la NASA que ha mapeado el cielo entero en el infrarrojo cercano y medio. A partir de estas observaciones el equipo de la misión generará amplios catálogos con datos que ayudarán a resolver preguntas fundamentales sobre el origen de los planetas, estrellas y el Universo en general. Su tamaño es de 2.85 metros, su anchura es de 2 metros y pesa unos 661 kilogramos. Cuenta con un telescopio de 40 cm de diámetro y 4 detectores en el IR que contienen un millón de píxeles cada uno. Las bandas en las que trabajan estos detectores son: 3.4, 4.6, 12 y $22 \mu\text{m}$, será esta última banda la que emplearemos nosotros para estimar la SFR a partir de la luminosidad del polvo caliente (el más asociado, por otro lado, a la regiones de formación estelar reciente).

3.5. Sumario de observaciones

La muestra madre del proyecto CALIFA contaba con 939 galaxias de todos los tipos morfológicos y como se comentó anteriormente, con restricciones en tamaño y en desplazamientos al rojo (ver apartado muestra CALIFA). De la muestra madre, se planea que lleguen a observarse del orden de 600 galaxias; recordemos que hay 250 noches de observación disponibles para este proyecto. Las galaxias observadas se eligen al azar (teniendo en cuenta criterios de visibilidad), para no introducir ningún tipo de sesgo en la selección de la muestra. Por tanto, el número de galaxias de nuestro estudio viene limitado por la disponibilidad de las galaxias observadas dentro del proyecto CALIFA hasta el momento. WISE, como se ha comentado, ha realizado un mapeo completo del cielo, por lo que no impone ningún tipo de restricción.

Por otro lado, el satélite GALEX ha observado 578 de estas galaxias en la banda del FUV y 630 galaxias en la banda del NUV. Todas estas imágenes han sido descargadas (mapas de intensidad, máscaras de campo y mapas de respuesta relativa de alta resolución) y almacenadas, y para todas ellas se ha procedido a realizar su fotometría superficial, así como sus curvas de crecimiento y perfiles de color.

En el apéndice se muestran los perfiles de color relativas a los objetos que cuentan con imágenes en el UV.

En la Tabla 2 se proporciona un sumario del número de objetos disponible en cada banda para nuestro trabajo.

Trazador	nº de galaxias disponibles
WISE $24 \mu\text{m}$	939
GALEX FUV	578
GALEX NUV	630
CALIFA $H\alpha$	91
$H\alpha + UV + WISE$	91

Tabla 2: Sumario de observaciones

La Figura 7 muestra una de las galaxias de la muestra, NGC7549, tomada en distintas bandas. Puede apreciarse el aspecto de esta galaxia en el óptico (SDSS), en el UV (GALEX), $H\alpha$ (sintetizada a partir de los cubos PPAK del proyecto CALIFA) y una imagen en el IR de WISE donde se aprecia la baja resolución de este telescopio (FWHM \sim 11 arcsec).

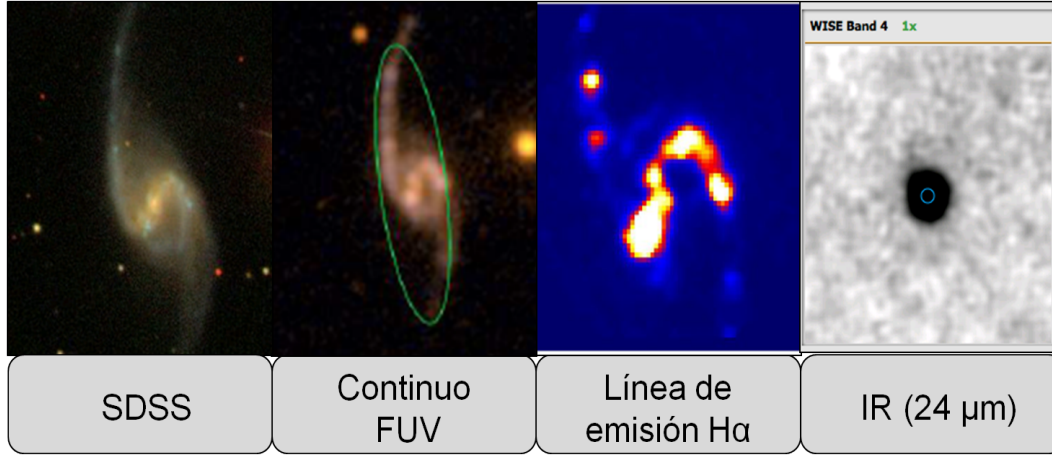


Figura 7: Imágenes de la galaxia NGC7549 de la muestra CALIFA en diferentes bandas fotométricas. De izquierda a derecha: imagen en falso color a partir de las imágenes ópticas de banda ancha del proyecto SDSS, imagen en falso color obtenida a partir de las imágenes FUV y NUV de la misión GALEX, imagen en la línea de emisión $H\alpha$ (obtenida a partir de los cubos del proyecto CALIFA), y la imagen en $22\mu\text{m}$ obtenida por la misión WISE de la NASA.

Por último, en la Tabla 3 se muestran los principales parámetros de las 91 galaxias de nuestro estudio combinado UV+ $H\alpha$ +IR. Estos parámetros incluyen: nombre del objeto, coordenadas en ascensión recta (J2000), declinación (J2000), los valores de la longitud total del eje mayor (2·a, donde a es el semieje mayor) y del eje menor (2·b, donde b es el semieje menor) que se toman con referencia al catálogo RC3 (de Vaucouleurs et al. 1991) para la isofota de $25 \text{ mag arcsec}^{-2}$ en banda B de Johnson, el ángulo de posición en grados (PA), la distancia (dist) en Mpc, y finalmente el tiempo de exposición en segundos para la banda FUV de GALEX. Los tiempos relativos a CALIFA no se muestran pues, como se comentó anteriormente, para la configuración que nosotros empleamos en nuestro análisis, V500, todos ellos son idénticos e igual a 3 apuntados de 900 segundos cada uno de ellos. En el caso de WISE la exploración efectiva es también idéntica para todos los objetos e igual a 8.8 arcsec (Jarrett et al. 2012).

Galaxia ...	RA (J2000.0)	DEC (J2000.0)	2· a [arcmin]	2· b [arcmin]	PA [grados]	E(B-V) [mag]	dist [Mpc]	texp _{FUV} [s]
UGC00036	1.30784	6.77203	1.3	0.6	18.0	0.052	89.90	215.1
NGC0036	2.84291	6.38935	2.2	1.4	21.0	0.067	86.20	319
UGC00312	7.84967	8.46673	1.4	0.7	7.0	0.037	62.40	2701.15
NGC0444	18.95651	31.08062	1.9	0.4	-23.0	0.064	69.20	130.05
NGC0477	20.33535	40.48815	2.2	1.2	-45.0	0.053	84.00	96
IC1683	20.66220	34.43713	1.3	0.6	-3.0	0.050	69.60	120
NGC0496	20.79831	33.52927	1.6	0.9	28.0	0.073	85.90	1591.1
UGC01057	22.22189	13.79380	1.5	0.5	-27.0	0.049	91.20	1671.1
NGC0776	29.97719	23.64428	1.7	1.7	0.0	0.097	70.30	96
NGC1167	45.42640	35.20562	2.8	2.3	70.0	0.183	70.70	119
UGC03107	69.34105	9.54465	1.0	0.3	72.0	0.224	119.50	219.05
NGC2253	100.92432	65.20638	1.5	1.1	-44.0	0.068	50.90	135
UGC03944	114.65211	37.63351	1.8	0.8	-50.0	0.062	55.70	215
UGC03995	116.03803	29.24743	2.5	1.1	85.0	0.034	67.90	1535
NGC2449	116.83458	26.93020	1.3	0.6	-43.0	0.044	69.90	199
UGC04461	128.34447	52.53227	1.7	0.5	43.0	0.037	71.40	1691.05

IC2487	142.53819	20.09085	1.8	0.4	-16.0	0.048	62.00	221.05
IC0540	142.54308	7.90275	1.5	0.4	-10.0	0.060	29.10	1689.05
NGC2906	143.02591	8.44177	1.4	0.9	75.0	0.047	30.60	105
NGC2916	143.74001	21.70526	2.5	1.7	20.0	0.027	53.30	232
UGC05108	143.85950	29.81262	1.3	0.8	-37.0	0.017	115.70	213
NGC2918	143.93350	31.70547	1.4	1.0	65.0	0.019	97.80	218
UGC05359	149.71519	19.21498	1.2	0.4	-83.0	0.024	121.10	222
NGC3106	151.02188	31.18546	1.8	1.8	0.0	0.024	88.70	104
NGC3057	151.41463	80.28667	2.2	1.3	6.0	0.024	21.80	110
NGC3160	153.47964	38.84293	2.1	0.4	-34.0	0.014	98.90	109.05
NGC3300	159.16017	14.17110	1.9	1.0	-7.0	0.038	44.00	100
NGC3303	159.25037	18.13589	3.0	2.1	0.0	0.028	89.80	1561
UGC05771	159.33058	43.58759	1.5	1.1	60.0	0.014	105.80	144
UGC06036	163.98026	36.86152	1.6	0.3	-79.0	0.017	92.90	96
UGC06312	169.50081	7.84489	1.1	0.5	45.0	0.042	90.40	1515.35
NGC3615	169.52773	23.39732	1.4	0.9	40.0	0.018	95.50	189.05
NGC3614	169.58888	45.74817	4.6	2.6	80.0	0.014	33.40	112
NGC3991	179.37900	32.33702	1.4	0.4	33.0	0.022	45.60	110
UGC08733	207.16248	43.41245	2.3	1.5	12.0	0.018	33.40	96
IC0944	207.87862	14.09221	1.6	0.6	-72.0	0.024	100.00	93
UGC08778	208.02779	38.06702	1.1	0.2	-60.0	0.021	46.70	234.05
UGC08781	208.09477	21.53935	1.6	0.8	-20.0	0.030	108.50	87.1
NGC5378	209.21255	37.79724	2.6	2.1	90.0	0.013	43.50	94
NGC5682	218.68741	48.67023	1.7	0.6	-53.0	0.033	32.50	1501.15
UGC09665	225.38527	48.31970	1.7	0.3	-38.0	0.023	36.60	160.8
UGC09873	232.46104	42.62892	1.4	0.3	-53.0	0.030	80.30	215.05
ARP220	233.73836	23.50368	1.5	1.2	0.0	0.051	77.68	175
NGC5966	233.96712	39.76890	1.8	1.1	90.0	0.021	64.00	207
NGC6032	240.75468	20.95592	1.6	0.8	0.0	0.090	61.21	96
NGC6060	241.46663	21.48491	2.0	1.1	-75.0	0.082	63.46	156
UGC10205	241.66742	30.09907	1.6	0.8	-45.0	0.044	93.72	103
NGC6063	241.80414	7.97899	1.7	0.8	-21.0	0.047	40.70	182
NGC6081	243.23691	9.86711	1.8	0.6	-49.0	0.044	74.00	187
UGC10331	244.33801	59.32013	1.7	0.3	-38.0	0.013	63.90	266
NGC6125	244.79807	57.98414	1.4	1.4	0.0	0.012	69.10	265
UGC10384	246.69452	11.58027	1.3	0.3	-89.0	0.058	71.00	170
UGC10693	256.22092	41.86549	1.8	1.2	-75.0	0.023	119.40	112
UGC10695	256.27322	43.04316	1.7	1.3	-70.0	0.024	119.10	107.05
UGC10710	256.71884	43.12221	1.5	0.4	-30.0	0.034	119.90	107.05
NGC6310	256.98950	60.99016	2.0	0.4	68.0	0.027	48.90	171
NGC6314	258.16132	23.27008	1.4	0.7	-5.0	0.066	94.80	108
UGC10796	259.19885	61.92012	1.6	1.2	19.0	0.019	44.00	2653.05
UGC10811	259.68219	58.13512	1.6	0.5	-88.0	0.030	125.00	26869.2
IC1256	260.94702	26.48652	1.6	1.1	-83.0	0.049	67.60	148
NGC6394	262.58926	59.63989	1.3	0.4	41.0	0.032	121.30	22560.75
UGC10905	263.52682	25.34397	1.3	0.8	-10.0	0.071	112.10	170
NGC6411	263.88687	60.81340	2.3	1.8	69.0	0.054	54.40	107.05
NGC6497	267.82486	59.47087	1.4	0.7	-68.0	0.055	88.10	186
NGC6515	269.35498	50.72812	1.6	1.0	10.0	0.046	98.00	166.1
UGC11228	276.19275	41.49274	1.0	0.6	0.0	0.061	82.50	107
UGC11262	277.64874	42.69270	1.5	0.6	48.0	0.040	80.10	107
NGC6762	286.40454	63.93411	1.4	0.4	-62.0	0.055	41.80	148
UGC11680NED01	316.92224	3.87161	2.0	1.3	-5.0	0.084	111.40	125.05
NGC7025	316.94724	16.33590	1.9	1.3	33.0	0.079	71.00	127
UGC11694	317.96677	11.27614	1.6	1.0	34.0	0.101	72.40	212

UGC11717	319.64755	19.71872	1.4	0.5	35.0	0.087	90.10	200
UGC11792	325.55292	5.61537	1.4	0.1	-20.0	0.138	68.80	136
NGC7194	330.87891	12.63678	1.1	0.8	20.0	0.058	115.00	192
NGC7236	333.68747	13.84652	0.7	0.7	0.0	0.064	112.60	7123.2
UGC11958	333.69534	13.84087	2.3	1.3	-40.0	0.065	112.70	7123.2
UGC12054	337.38522	7.72602	1.5	0.2	46.0	0.110	29.60	208
NGC7311	338.52832	5.57032	1.6	0.8	10.0	0.132	64.80	166.05
NGC7321	339.11676	21.62177	1.6	1.1	12.0	0.046	102.10	112
UGC12127	339.62259	35.32969	1.5	1.5	0.0	0.076	118.20	224
UGC12185	341.85443	31.37352	1.5	0.8	-30.0	0.061	95.10	224
UGC12224	343.15985	6.09362	2.1	1.9	0.0	0.086	50.10	374
NGC7436B	344.48978	26.15000	2.0	2.0	0.0	0.091	105.40	218
NGC7466	345.51443	27.05260	1.5	0.5	26.0	0.051	107.30	217
NGC7550	348.81696	18.96145	1.4	1.2	0.0	0.139	72.50	7464.55
NGC7549	348.82196	19.04179	2.8	0.7	8.0	0.147	67.70	7464.55
NGC7563	348.98303	13.19612	1.9	1.0	-25.0	0.055	59.70	185.1
NGC7591	349.56775	6.58579	1.9	0.8	-35.0	0.104	70.80	178
UGC12519	350.01154	15.95279	1.3	0.4	-22.0	0.041	62.60	160.1
UGC12864	359.34967	30.99207	1.7	1.0	-70.0	0.053	66.90	199.05

Tabla 3:

Muestra de galaxias. La descripción de los parámetros de cada una de las columnas está descrita en el texto.

4. Análisis

En esta sección describimos los procedimientos de análisis utilizados en este trabajo. Estos incluyen aquellos propios de los datos de espectroscopía óptica bi-dimensional (generación de mapas y obtención de espectros a diferentes niveles de brillo superficial) y de imagen (flujos integrados, fotometría superficial). Incluimos también en esta sección los procedimientos seguidos para derivar tanto la atenuación del gas y del continuo estelar y la tasa de formación estelar a partir de estos conjuntos de medidas.

A lo largo de esta sección haré mención al Dr. Jorge Iglesias Páramo, investigador del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), y a la Dra. Almudena Alonso Herrero, investigadora del Instituto de Física de Cantabria (IFCA), ambos parte de la colaboración CALIFA. Ellos nos han proporcionado información relativa a las medidas de las líneas de emisión $H\alpha$, $H\beta$ (Jorge Iglesias) y magnitudes a $22\mu\text{m}$ (WISE W4) en el IR (Almudena Alonso) que nosotros hemos utilizado en el análisis y posteriormente en la elaboración de los resultados de este trabajo.

4.1. CALIFA: fotometría integrada y superficial

Los cubos de datos procesados por el equipo del proyecto CALIFA han sido el punto de partida para llevar a cabo nuestro objetivo. En dichos cubos se tiene una representación tridimensional de la galaxia que queremos analizar. El plano x,y determina la posición de cada uno de los píxeles de la imagen mientras que la coordenada perpendicular a dicho plano muestra el rango en longitud de onda empleado. El valor de cada pixel es el flujo en unidades de $10^{-16} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}$.

A fin de estudiar la variación de la atenuación del gas ionizado y la SFR en función de la distancia galactocéntrica en las galaxias de la Tabla 3 se definieron una serie de anillos elípticos concéntricos para cada una de las galaxias en los que se medirían los flujos de las líneas $H\alpha$ y $H\beta$. Los parámetros de estos anillos elípticos, idénticos a los obtenidos en las imágenes UV en la Sección 5.2, son los dados en el catálogo RC3 (de Vaucouleurs et al. 1991) para la isofota de 25 mag arcsec^2 en banda B de Johnson. Estos anillos eempiezan a tomarse a una distancia de 3 arcsec del centro de la galaxia y están equiespaciados en intervalos de 6 arcsec (ver Figura 8). Tienen, a su vez, una anchura de 6 arcsec, es decir, anchuras algo mayores que la resolución espacial de los datos de imagen ultravioleta (4-5 arcsec) y aún mayores que la de los datos de espectroscopía óptica (2-3 arcsec).

Los flujos de las líneas de emisión en estos anillos han sido proporcionados por el Dr. Jorge Iglesias Páramo (IAA). Se parte de los cubos iniciales a los cuales se les sustrae la población estelar subyacente mediante un ajuste que combina 4 poblaciones estelares simples (SSP, del inglés *Simple Stellar Population*) con 4 edades (0.09, 0.45, 1.0 y 17.8 Gyr) y 3 metalicidades (0.0004, 0.019 -Solar- y 0.03) extraídas de la librería MILES

mediante el programa de ajuste FIT3D (Sánchez et al. 2007). Una vez se tiene el cubo libre de continuo estelar, lo que denominamos el *cubo de gas* se procede a realizar el análisis de la fotometría en los anillos concéntricos comentados anteriormente derivando el flujo de las líneas de emisión.

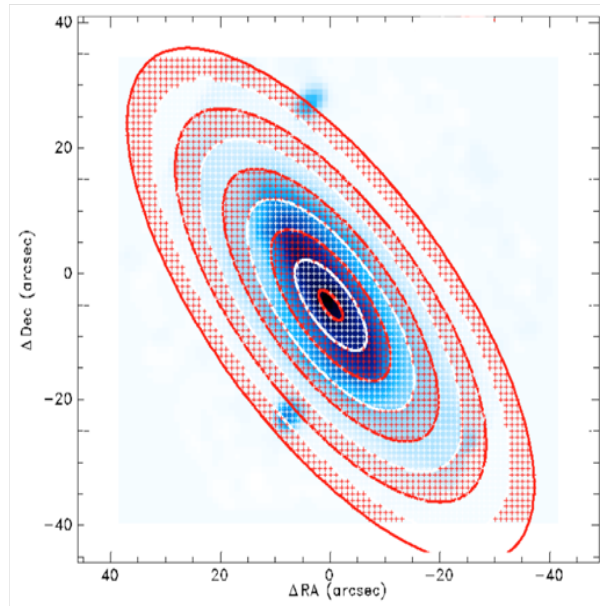


Figura 8: Ejemplo de anillos extraídos para la galaxia NGC7549 empleando la herramienta Pingsoft especialmente dedicada para trabajar con datos IFU.

4.2. CALIFA: Análisis bi-dimensional

Como trabajo futuro obtendremos también mapas de atenuación y de SFR a partir de la emisión del gas ionizado. En la Sección 5 se muestran los resultados del estudio para dos galaxias elegidas como casos piloto: NGC7549 y NGC6394. Para ello es también necesario utilizar los *cubos de gas*, es decir, aquellos cubos libres de continuo estelar, a fin de derivar propiamente el flujo de las líneas $H\alpha$ y $H\beta$. Estas medidas, y en particular la substracción del continuo estelar, son necesarias para obtener la atenuación del gas ionizado y la luminosidad $H\alpha$ (trazador de la SFR instantánea en galaxias).

También hemos obtenido espectros en regiones con forma de anillo a diferentes radios del centro de la galaxia siguiendo el perfil de brillo superficial de estas galaxias (véase la Sección 5).

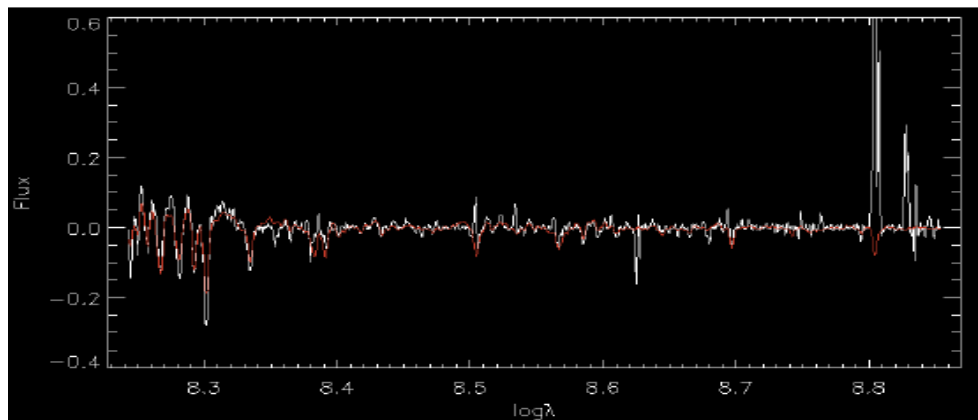


Figura 9: Espectro extraído de uno de los anillos analizados mediante el programa Pingsoft. En rojo se muestra el mejor ajuste de los modelos de poblaciones estelares y en blanco el espectro extraído.

La figura anterior (Figura 9) muestra un ejemplo del espectro de uno de los anillos analizados (en blanco) junto con el mejor ajuste a los modelos de poblaciones estelares (en rojo) para el caso de la galaxia CALIFA NGC7549. Este procedimiento se aplicó a cada pixel de los cubos de datos a fin de generar los denominados *cubos de gas*. Esperamos, como parte de mi tesis doctoral, completar este tipo de análisis bi-dimensional para el total de la muestra CALIFA.

4.3. GALEX: fotometría integrada y superficial

Un primer paso para llevar cabo la fotometría superficial en las imágenes de GALEX es determinar el nivel de intensidad del cielo. Como paso previo al cálculo del valor del cielo es necesario disponer de las siguientes imágenes: mapas de intensidad (J2000), máscaras de campo (J2000) y mapas de respuesta relativa de alta resolución. Para el cálculo del cielo se utilizó un programa que permitía enmascarar la propia galaxia así como todas las fuentes presentes en el catálogo de fuentes disponible a través de GalexView. Una vez enmascaradas dichas fuentes se determinó el valor promedio del cielo en una serie de regiones de igual número de pixels así como la desviación típica promedio y la desviación típica de los valores promedio del cielo en cada caja. Estos valores se utilizaron para determinar la contribución del error en la determinación del cielo al error fotométrico total (ver Gil de Paz et al. 2005, 2007). En la Figura 10 se muestra la salida gráfica del programa de determinación del cielo para el caso de la galaxia NGC7549.

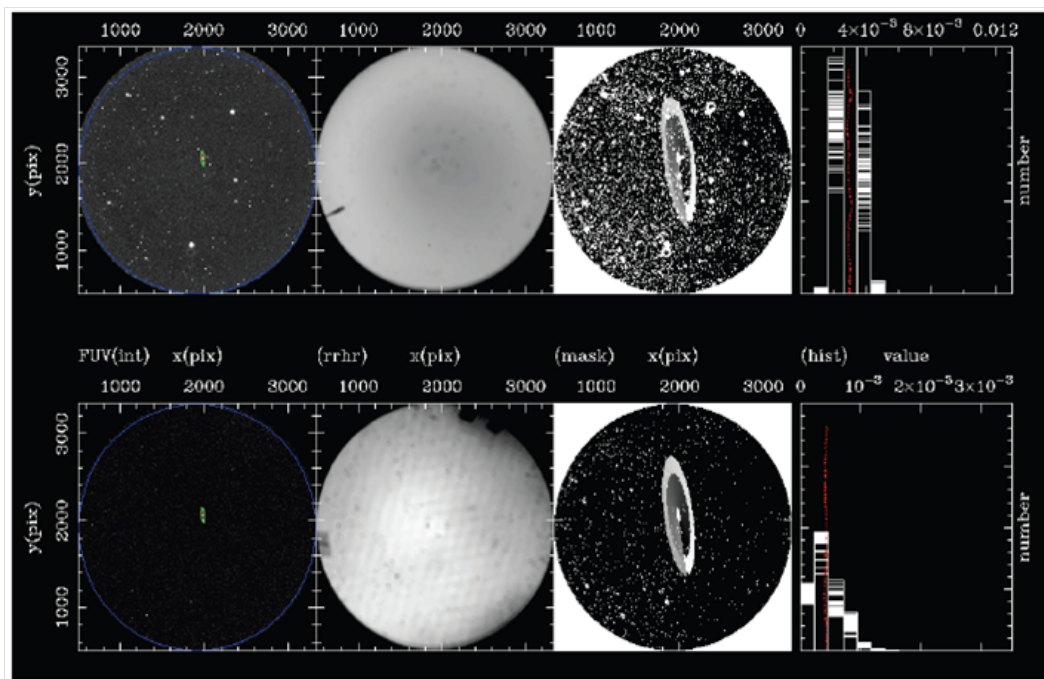


Figura 10: Esta figura muestra el resultado del análisis del fondo de cielo en las imágenes GALEX (arriba: NUV; abajo: FUV) de una de las galaxias de nuestra muestra (NGC7549). Para cada banda se muestra (1) la imagen de intensidad (-int-) junto con el límite externo del campo considerado usable (panel más a la izquierda; también se muestra las elipse correspondiente a los parámetros D25 en rojo y 1.5 veces ese valor en verde), (2) el mapa de respuesta a alta resolución (-rrhr-; centro-izquierda), (3) la máscara de objetos detectados por la cadena de procesamiento de datos de la misión, incluidas en escala de grises los dos anillos elípticos utilizados para la determinación del cielo (centro- derecha), (4) los histogramas del cielo dentro de los 45×2 segmentos de dichos anillos elípticos utilizados para el análisis estadístico de cielo (extremo derecho). Las marcas de color rojo en este panel indican el valor medio de cielo en cada uno de esos segmentos.

Una vez que se ha determinado el valor del cielo se procede al análisis de la fotometría integrada y superficial. En primer lugar es necesario enmascarar todas aquellas estrellas de campo que se encuentren próximas a nuestra galaxia para evitar que estas contaminen la medida de nuestros flujos. El tamaño de las imágenes que contienen a las galaxias es de 1.5 veces el tamaño del 2-a (dos veces el semieje mayor, véase la Tabla 3). Este procedimiento es algo tedioso y me ha llevado bastante tiempo pues debe hacerse de forma manual y galaxia a galaxia. En

total se ha realizado para una muestra de 578 galaxias en la banda del FUV y 630 galaxias en la banda del NUV, es decir, como se comentó anteriormente, para todas aquellas galaxias de la muestra madre de CALIFA que poseen datos con el satélite GALEX.

Una vez enmascaradas las estrellas hemos empleado un programa que interpola el valor del flujo más allá de los bordes de las estrellas para recuperar el valor del flujo en esas zonas enmascaradas. A partir de aquí obtenemos el valor integrado de los flujos en ambas bandas (FUV y NUV), así como los valores en elipses concéntricas equiespaciadas cada 6 segundos de arco y de anchura 6 segundos de arco (fotometría superficial). Estos valores son idénticos a los utilizados para calcular la fotometría con los datos CALIFA lo cual permite hacer una comparación radial de magnitudes como la atenuación o la SFR en función de la distancia al centro de la galaxia (ver Sección 5).

Finalmente, dentro del análisis de la fotometría superficial, se han obtenido también los perfiles de brillo superficial y la variación del color FUV-NUV respecto a la distancia al centro de la galaxia, así como la curva de crecimiento y su ajuste en ambas bandas. En la figura 11 se muestran estos perfiles para la galaxia NGC7549.

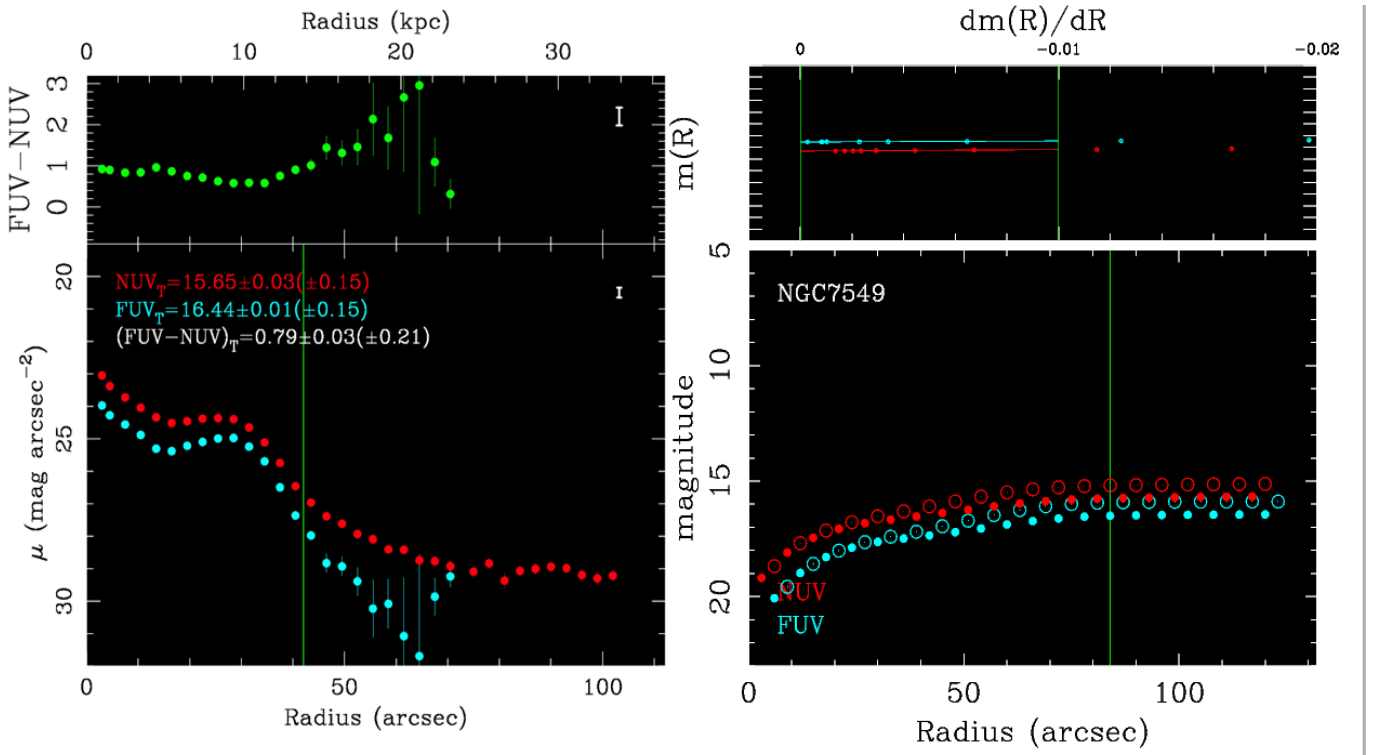


Figura 11: Resultados de la fotometría superficial en bandas GALEX para la galaxia NGC7549. Izquierda: Perfiles de brillo superficial (abajo) en bandas FUV (azul) y NUV (rojo) junto con la posición de la elipse D25 (línea vertical verde) y de color FUV-NUV (arriba). También se proporcionan las magnitudes asintóticas obtenidas del ajuste de la curva de crecimiento (ver panel de la derecha). Derecha: Curva de crecimiento (obtenida a partir del flujo dentro de elipses de radio cada vez mayor) en las bandas FUV y NUV (abajo) junto con el ajuste de dichas curvas en el plano magnitud integrada vs. gradiente de la curva de crecimiento (arriba). Se muestran además los ajustes lineales a dicha curva de crecimiento en ese plano.

En el apéndice aparecen los distintos perfiles de brillo superficial junto a la variación del color FUV-NUV para las galaxias de la muestra madre de CALIFA con datos en el UV. En los paneles de dicho apéndice se muestran así mismo los resultados de la fotometría integrada que se utilizará para determinar la atenuación del UV y la SFR junto con los errores obtenidos para cada magnitud. No se incluye una tabla con esta fotometría (aunque sí con las propiedades derivadas de atenuación y SFR; ver Tabla 4) por falta de espacio.

4.4. WISE: fotometría integrada

Dado que la mayoría de las fuentes detectadas por WISE no estarán resueltas espacialmente, el enfoque óptimo para la caracterización de estas fuentes implica hacer ajustes de perfiles fotométricos. En nuestro caso usamos la cuarta banda de WISE, la denominada W4, que corresponde a una longitud de onda de $22\mu\text{m}$. La PSF para esta banda es de $\text{FWHM}\sim 11$ segundos de arco, mucho mayor que la de GALEX (5 segundos de arco) o CALIFA (2-3 segundos de arco). Almudena Alonso Herrero nos facilitó la lista con las magnitudes PSF a $22\mu\text{m}$ de las galaxias de la muestra CALIFA. Nosotros las hemos convertido a luminosidad para poder derivar nuestras tasas de formación estelar, teniendo en cuenta que estas magnitudes estaban en el sistema de Vega por lo que para pasarlas al sistema AB se ha aplicado $m_{AB} = m_{Vega} + \Delta m$, donde para la banda de $22\mu\text{m}$ $\Delta m=6.604$ mag. Para un futuro se planea derivar el flujo de estas galaxias en elipses concéntricas como las comentadas anteriormente para los casos de GALEX y CALIFA (aunque degradando previamente estas últimas imágenes a la resolución de WISE W4).

4.5. Corrección de atenuación

4.5.1. Decremento Balmer

Para determinar la atenuación se asumió que el cociente intrínseco (sin enrojecimiento) entre las líneas $H\alpha$ y $H\beta$ es fijo y constante (se adoptó un valor de $H\alpha/H\beta=2.86$ que es el predicho por Osterbroock 1989 para la emisión de una región HII a $T_e=10000$ K para el caso B de recombinación). Debido a esto, cualquier diferencia del cociente observado con el predicho (lo que se conoce como el decremento Balmer) sería debido a la mayor extinción del polvo a la longitud de onda de $H\beta$ respecto a $H\alpha$. Asumiendo la curva de extinción Galáctica (Cardelli et al. 1989) el resultado la atenuación en $H\alpha$ se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$A_{H\alpha} = \frac{K_{H\alpha}}{-0,4 \times (K_{H\alpha} - K_{H\beta})} \times \log_{10} \frac{\frac{F_{H\alpha}}{F_{H\beta}}}{2,86} \quad (1)$$

Hay que tener en cuenta que todos los cubos están corregidos de extinción Galáctica por lo que la atenuación que aquí se da es interna, y esta es la que aparece en la Tabla 4.

4.5.2. Extinción del continuo estelar

A continuación se detallan las expresiones empleadas para obtener la magnitud corregida, el flujo, luminosidad y finalmente la tasa de formación estelar (SFR) a partir de los datos del color FUV-NUV. Así, el color FUV-NUV se obtendrá a partir de la expresión:

$$FUV = 18,82 - 2,5 \cdot \log_{10}(\text{cuentas}_{\text{imagen},FUV} - \text{cielo}) \quad NUV = 20,08 - 2,5 \cdot \log_{10}(\text{cuentas}_{\text{imagen},NUV} - \text{cielo}) \quad (2)$$

La extinción se halla directamente del color anterior usando la siguiente relación entre el color FUV-NUV y la extinción:

$$A_{FUV} = 0,556 + 2,292 \cdot (FUV - NUV) \quad (3)$$

Esta relación fue obtenida por Muñoz-Mateos et al. (2009ab) mediante un ajuste lineal a los datos de perfiles de atenuación (derivados a partir del exceso infrarrojo o del cociente TIR/FUV mediante las expresiones dadas por Buat et al. 2005 y Cortese et al. 2008) y color FUV-NUV en el rango $(FUV-NUV)<1$. Estos datos, mostrados en la Figura 12, corresponden al análisis realizado por estos autores sobre imágenes infrarrojas y ultravioleta de las galaxias de la muestra SINGS.

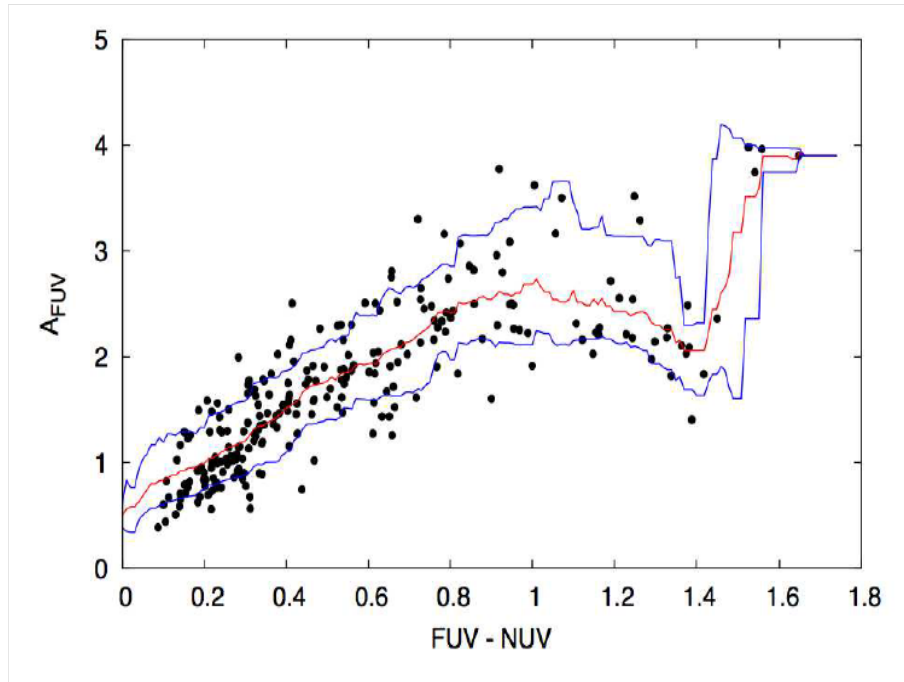


Figura 12: Relación entre la atenuación, A_{FUV} , y el color FUV-NUV derivada por Muñoz-Mateos et al. (2009ab).

4.6. Medidas de SFR. Calibradores simples e híbridos usados

Como parte final del análisis de los datos muestro los valores obtenidos para distintas magnitudes en los tres rangos de trabajo: UV, óptico e IR. En la primera de las tablas, Tabla 4, aparecen los valores de atenuación interna en $H\alpha$ (calculada mediante la expresión (1) de la Sección 4.5.1), luminosidad corregida de atenuación para $H\alpha$, atenuación en la banda FUV (calculada mediante la expresión (2) de la Sección 4.5.2), luminosidad corregida de atenuación para la banda FUV, color FUV-NUV y finalmente la luminosidad en el IR a $22\mu\text{m}$.

Galaxia ...	$A_{H\alpha}$ [mag]	$L_{H\alpha} (\cdot 10^{41})$ [ergs $^{-1}$]	A_{FUV} [mag]	$L_{FUV} (\cdot 10^{43})$ [ergs $^{-1}$]	FUV-NUV [mag]	$L_{22\mu\text{m}} (\cdot 10^{42})$ [ergs $^{-1}$]
NGC7819	0.32	2.30	...	...	...	6.84
UGC00036	1.35	2.76	1.91	2.24	0.59	3.21
NGC0036	1.36	6.63	1.63	10.25	0.47	1.39
UGC00312	0.66	5.61	1.24	8.06	0.30	3.31
NGC0444	0.72	1.23	1.95	3.31	0.61	0.53
NGC0477	0.94	5.37	1.52	10.25	0.42	2.56
IC1683	1.90	5.79	...	...	1.19	17.25
NGC0496	1.05	7.53	1.63	8.55	0.47	5.34
UGC01057	0.97	4.45	1.24	4.83	0.30	2.53
NGC0776	0.99	6.68	1.43	8.30	0.38	4.71
NGC1167	3.38	23.03	...	...	...	1.03
UGC03107	1.47	6.86	...	...	...	10.21
NGC2253	1.28	2.47	1.95	6.76	0.61	8.87
UGC03944	0.65	1.51	1.38	3.33	0.36	0.75
UGC03995	1.24	4.14	1.63	6.08	0.47	19.06
NGC2449	1.24	2.11	2.37	3.68	0.79	1.76
UGC04461	0.99	4.07	1.47	4.96	0.40	4.74

IC2487	1.29	2.86	2.09	3.05	0.67	1.58
IC0540	1.76	0.19	...	...	1.08	0.26
NGC2906	0.97	1.44	1.95	1.96	0.61	0.34
NGC2916	0.52	2.70	1.63	9.49	0.47	0.41
UGC05108	...	...	1.93	5.03	0.60	21.38
NGC2918	1.11	0.67	...	...	...	0.64
UGC05359	1.02	3.27	1.63	5.57	0.47	2.25
NGC3106	1.62	4.33	1.47	5.49	0.40	0.27
NGC3057	0.31	0.38	1.15	1.24	0.26	0.05
NGC3160	5.05	31.27	...	...	1.60	10.78
NGC3300	0.59	0.05	...	...	1.64	0.08
NGC3303	5.67	224.77	...	...	1.02	0.96
UGC05771	2.55	5.02	2.39	2.03	0.80	1.29
UGC06036	2.12	2.24	2.44	0.97	0.82	0.53
UGC06312	2.12	2.47	...	...	1.08	1.41
NGC3615	0.39	0.24	...	...	...	0.26
NGC3614	0.93	1.13	1.31	4.36	0.33	0.21
NGC3991	0.34	5.01	1.11	8.37	0.24	2.63
UGC08733	0.46	0.45	1.06	1.80	0.22	0.08
IC0944	2.17	6.14	2.69	3.00	0.93	5.50
UGC08778	0.88	0.33	2.05	0.54	0.65	0.29
UGC08781	1.44	4.81	1.82	7.31	0.55	0.43
NGC5378	0.54	0.28	1.54	1.42	0.43	0.13
NGC5682	0.61	0.56	1.68	1.01	0.49	0.33
UGC09665	1.27	1.41	1.68	0.83	0.49	1.72
UGC09873	1.54	2.68	1.27	1.34	0.31	2.76
ARP220	...	...	...	...	1.35	444.90
NGC5966	...	...	...	...	1.26	0.23
NGC6032	1.22	1.82	2.44	2.69	0.82	3.47
NGC6060	1.44	7.06	1.70	7.95	0.50	4.33
UGC10205	1.44	2.39	...	...	1.01	3.76
NGC6063	0.81	1.00	1.52	2.13	0.42	0.29
NGC6081	1.06	0.48	2.60	0.85	0.89	1.66
UGC10331	...	...	1.34	3.16	0.34	7.38
NGC6125	0.73	0.18	...	...	1.08	0.29
UGC10384	1.57	7.98	1.75	2.44	0.52	11.79
UGC10693	...	...	...	...	...	0.84
UGC10695	0.00	0.57	...	...	1.82	0.39
UGC10710	1.55	7.58	2.23	5.06	0.73	4.95
NGC6310	0.79	0.66	1.66	1.20	0.48	0.29
NGC6314	1.50	1.09	...	...	...	5.08
UGC10796	0.50	0.53	1.27	1.64	0.31	0.31
UGC10811	0.69	2.42	1.56	4.39	0.44	1.41
IC1256	0.83	2.76	1.86	5.29	0.57	1.74
NGC6394	0.82	3.42	2.14	4.34	0.69	19.15
UGC10905	1.22	1.56	...	...	...	0.56
NGC6411	...	...	...	...	2.20	0.18
NGC6497	0.04	1.18	1.72	4.08	0.51	1.13
NGC6515	...	...	...	...	...	0.34
UGC11228	0.18	0.21	...	...	...	0.53
UGC11262	0.50	0.68	1.72	2.35	0.51	0.16
NGC6762	...	...	...	...	1.48	0.17
UGC11680NED01	1.18	4.82	2.32	9.74	0.77	42.48
NGC7025	...	...	2.46	3.77	0.83	0.32
UGC11694	...	...	...	...	...	0.80

UGC11717	...	...	...	...	...	19.98
UGC11792	1.11	1.19	2.16	0.68	0.70	2.06
NGC7194	...	...	...	...	...	0.51
NGC7236	...	...	...	...	1.44	0.63
UGC11958	0.59	0.86	...	...	1.49	0.68
UGC12054	0.73	0.37	1.40	0.54	0.37	0.07
NGC7311	0.59	2.84	2.07	6.04	0.66	2.52
NGC7321	0.17	4.66	1.79	17.62	0.54	5.55
UGC12127	...	...	...	...	1.20	0.38
UGC12185	0.92	1.91	1.91	5.13	0.59	0.79
UGC12224	0.55	1.23	1.45	4.15	0.39	0.56
NGC7436B	...	...	2.57	3.48	0.88	0.74
NGC7466	0.48	3.69	2.14	6.71	0.69	11.31
NGC7550	...	...	...	...	1.57	0.62
NGC7549	0.83	4.66	2.34	8.98	0.78	6.12
NGC7563	0.00	0.05	...	...	...	0.14
NGC7591	1.44	9.32	2.23	7.63	0.73	50.64
UGC12519	1.08	4.09	1.47	2.49	0.40	2.80
UGC12864	0.73	1.96	1.38	4.23	0.36	1.93

Tabla 4:

Propiedades derivadas a partir del análisis de los datos en el UV, óptico e IR (véase el texto para la descripción de cada columna)

En la segunda de las tablas de este apartado, Tabla 5, aparecen los valores de las tasas de formación calculadas siguiendo las relaciones dadas por Calzetti et al. (2012), proporcionadas en Sección 1 (ver Tabla 1). En particular, se incluyen las estimaciones de la SFR obtenida mediante la luminosidad $H\alpha$ corregida de atenuación, la SFR empleando la luminosidad en el FUV corregida de atenuación y la SFR derivada de la luminosidad a $22\mu\text{m}$. Por su parte, los trazadores híbridos aunan por un lado la SFR derivada de la luminosidad $H\alpha$ observada con la SFR de la luminosidad en el IR y por otro lado, la SFR derivada de la luminosidad FUV observada con la SFR de la luminosidad en el IR. Todos los valores de las SFRs vienen expresados en $M_{\odot}/\text{año}$.

Galaxia	$SFR_{H\alpha}$	SFR_{FUV}	SFR_{22}	$SFR(H+22)$	$SFR(FUV+22)$
NGC7819	1.26	...	1.40	1.70	...
UGC00036	1.52	1.03	0.65	0.79	0.75
NGC0036	3.65	4.71	0.28	1.20	1.30
UGC00312	3.08	3.70	0.68	2.04	1.77
NGC0444	0.68	1.52	0.11	0.41	0.35
NGC0477	2.95	4.70	0.52	1.52	1.62
IC1683	3.19	...	3.52	2.45	3.14
NGC0496	4.14	3.92	1.09	2.16	1.83
UGC01057	2.45	2.22	0.52	1.28	1.16
NGC0776	3.67	3.81	0.96	2.00	1.87
NGC1167	12.66	...	0.21	0.68	...
UGC03107	3.77	...	2.08	2.10	...
NGC2253	1.36	3.10	1.81	1.39	2.10
UGC03944	0.83	1.53	0.15	0.54	0.56
UGC03995	2.28	2.79	3.89	2.82	4.03
NGC2449	1.16	1.69	0.36	0.56	0.51

UGC04461	2.24	2.27	0.97	1.42	1.44
IC2487	1.57	1.40	0.32	0.65	0.49
IC0540	0.10	...	0.05	0.05	0.05
NGC2906	0.79	0.90	0.07	0.36	0.21
NGC2916	1.49	4.36	0.08	0.97	1.04
UGC05108	...	2.31	4.36	...	4.22
NGC2918	0.37	...	0.13	0.20	...
UGC05359	1.80	2.56	0.46	0.95	0.97
NGC3106	2.38	2.52	0.05	0.57	0.70
NGC3057	0.21	0.57	0.01	0.16	0.21
NGC3160	17.20	...	2.20	1.35	1.94
NGC3300	0.03	...	0.02	0.02	0.02
NGC3303	...	...	0.20	0.77	0.32
UGC05771	2.76	0.93	0.26	0.41	0.33
UGC06036	1.23	0.44	0.11	0.23	0.14
UGC06312	1.36	...	0.29	0.35	0.30
NGC3615	0.13	...	0.05	0.12	...
NGC3614	0.62	2.00	0.04	0.29	0.64
NGC3991	2.75	3.84	0.54	2.30	1.86
UGC08733	0.25	0.82	0.02	0.17	0.33
IC0944	3.38	1.38	1.12	1.06	1.10
UGC08778	0.18	0.25	0.06	0.11	0.09
UGC08781	2.64	3.36	0.09	0.75	0.71
NGC5378	0.16	0.65	0.03	0.11	0.18
NGC5682	0.31	0.47	0.07	0.21	0.16
UGC09665	0.78	0.38	0.35	0.43	0.39
UGC09873	1.48	0.61	0.56	0.66	0.69
ARP220	...	...	90.76	49.46	79.72
NGC5966	...	...	0.05	0.07	0.06
NGC6032	1.00	1.24	0.71	0.71	0.75
NGC6060	3.88	3.65	0.88	1.50	1.54
UGC10205	1.32	...	0.77	0.76	0.78
NGC6063	0.55	0.98	0.06	0.29	0.29
NGC6081	0.26	0.39	0.34	0.28	0.33
UGC10331	...	1.45	1.51	...	1.75
NGC6125	0.10	...	0.06	0.08	0.14
UGC10384	4.39	1.12	2.40	2.33	2.33
UGC10693	...	...	0.17	0.19	...
UGC10695	0.32	...	0.08	0.36	0.11
UGC10710	4.17	2.32	1.01	1.54	1.18
NGC6310	0.36	0.55	0.06	0.21	0.17
NGC6314	0.60	...	1.04	0.71	0.91
UGC10796	0.29	0.75	0.06	0.22	0.29
UGC10811	1.33	2.01	0.29	0.86	0.73
IC1256	1.52	2.43	0.36	0.90	0.75
NGC6394	1.88	1.99	3.91	2.99	3.71
UGC10905	0.86	...	0.11	0.34	...
NGC6411	...	...	0.04	0.06	0.05
NGC6497	0.65	1.87	0.23	0.75	0.59
NGC6515	...	...	0.07	0.17	0.06
UGC11228	0.12	...	0.11	0.16	0.10
UGC11262	0.38	1.08	0.03	0.25	0.25
NGC6762	...	...	0.03	0.05	0.04
UGC11680NED01	2.65	4.47	8.67	5.56	8.13
NGC7025	...	1.73	0.07	0.31	0.24

UGC11694	...	...	0.16	0.20	...
UGC11717	...	...	4.08	2.71	...
UGC11792	0.65	0.31	0.42	0.46	0.41
NGC7194	...	...	0.10	0.17	...
NGC7236	...	...	0.13	0.13	0.15
UGC11958	0.47	...	0.14	0.35	0.18
UGC12054	0.20	0.25	0.01	0.11	0.08
NGC7311	1.56	2.77	0.51	1.19	0.87
NGC7321	2.56	8.09	1.13	2.80	2.55
UGC12127	...	...	0.08	0.07	0.11
UGC12185	1.05	2.36	0.16	0.54	0.55
UGC12224	0.68	1.91	0.11	0.47	0.60
NGC7436B	...	1.60	0.15	0.26	0.28
NGC7466	2.03	3.08	2.31	2.55	2.46
NGC7550	...	...	0.13	0.22	0.16
NGC7549	2.56	4.12	1.25	1.87	1.57
NGC7563	0.03	...	0.03	0.04	0.03
NGC7591	5.12	3.50	10.33	6.93	9.51
UGC12519	2.25	1.14	0.57	1.14	0.80
UGC12864	1.08	1.94	0.39	0.76	0.89

Tabla 5:

Estimaciones de la SFR a partir de calibradores simples e híbridos.

En la siguiente sección analizaremos de forma gráfica los valores de SFR obtenidos así como la comparación entre ellos a partir de diferentes trazadores.

5. Resultados

5.1. Caracterización en el UV de la muestra CALIFA

A continuación (Figura 13) se representa gráficamente la caracterización de la muestra teniendo en cuenta como varía el tipo morfológico de Hubble de las galaxias según el color FUV-NUV. Para ello se muestran una serie de histogramas que abarcan desde los tipos tempranos E hasta los más tardíos, espirales de tipo Sd. Se aprecia que los tipos tempranos de galaxias, (E1-E2-E3), presentan un color centrado en $(FUV-NUV) \sim 1.2$ mientras que las galaxias espirales más tardías, tipos Sd, muestran colores desplazados hasta $(FUV-NUV) \sim 0.40$. Es decir, las galaxias elípticas muestran colores más rojos que las galaxias espirales. Como se mencionó en la Sección 3.3 el número de galaxias empleadas en esta figura es de 578, es decir, aquellas observadas en ambas bandas UV. Un total de 630 galaxias se observaron en la banda NUV.

Los gráficos de la Figura 14 proporcionan información sobre las propiedades en el UV de la muestra teniendo en cuenta el color FUV-NUV, la luminosidad y la masa de las galaxias. Los situados a la derecha abarcan todas las galaxias de la muestra CALIFA que tienen contrapartida en el UV, mientras que los de la izquierda representan las 91 galaxias observadas hasta el momento del inicio de este trabajo con contrapartida en el UV. Los puntos rojos indican las galaxias que poseen evidencias de una contribución importante de un AGN a la emisión. Las galaxias con colores $FUV-NUV < 1$, principalmente espirales e irregulares, muestran un amplio rango de masas que oscila desde unas $10^8 M_{\odot}$ hasta algo más de unas $10^{11.5} M_{\odot}$. Por el contrario, las galaxias elípticas caracterizadas por un color $FUV-NUV > 1$, exhiben un rango de masas que se estrecha al compararlo con las espirales. En concreto, oscilan entre $10^{10} M_{\odot}$ y $10^{11.5} M_{\odot}$.

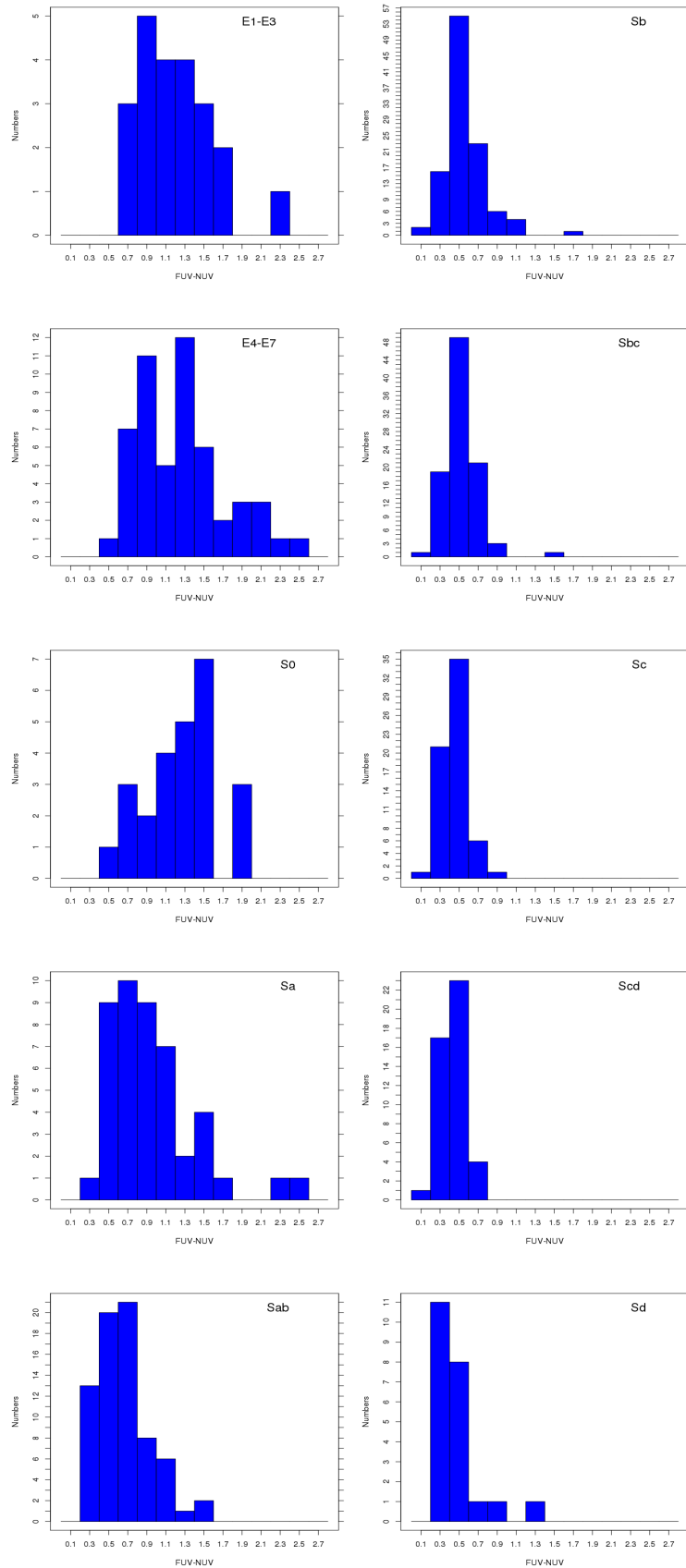


Figura 13: En esta figura se muestran los histogramas de frecuencia del color FUV-NUV del total de la muestra CALIFA con observaciones GALEX dividida por tipo morfológico. El tipo morfológico se obtuvo mediante la inspección visual de las galaxias por varios de los miembros del equipo CALIFA de forma independiente.

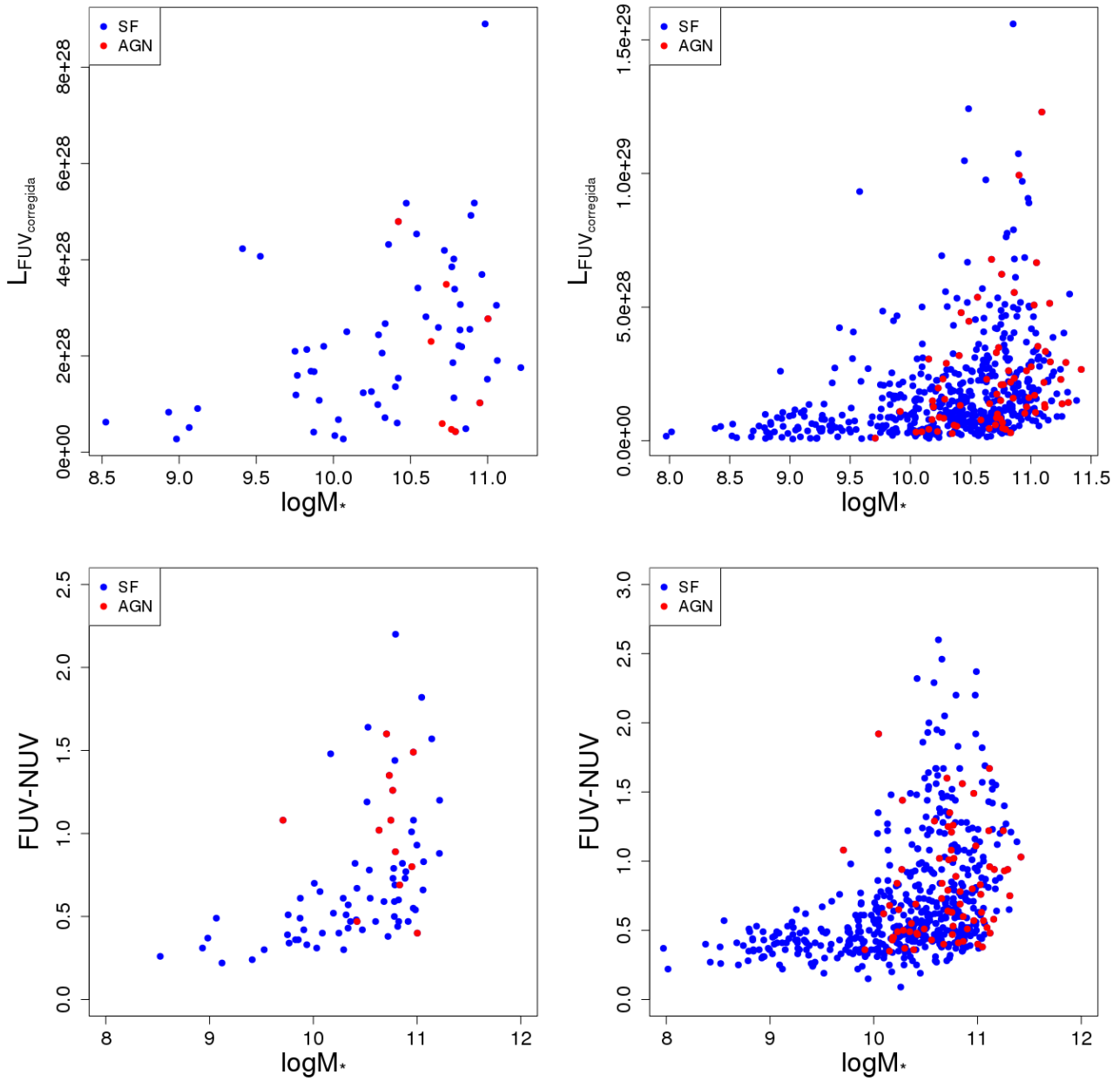


Figura 14: Arriba: Variación de la luminosidad en el FUV corregida de atenuación frente al logaritmo de la masa. Abajo: Variación del color FUV-NUV frente al logaritmo de la masa. Los gráficos de la izquierda representan las galaxias de este estudio mientras que los de la derecha son todas aquellas galaxias de la muestra CALIFA que contienen datos en el UV (GALEX).

5.2. Comparación de la SFR integrada

En este apartado se muestran los gráficos de SFR derivados a partir de las expresiones de la Tabla 1 (ver Figura 15). Se han dividido en dos partes la relativa a los trazadores simples por un lado y la representación de los trazadores híbridos por otro. Todos los valores de SFR aparecen representados frente al valor de la SFR derivada de la luminosidad $H\alpha$ corregida de atenuación.

5.2.1. Trazadores simples

El gráfico de la izquierda pone de manifiesto una buena correlación entre la SFR derivada de la luminosidad FUV corregida de extinción y la SFR derivada de la luminosidad $H\alpha$ también corregida de extinción. Los puntos que se desvían en mayor medida de esta correlación se proponen como casos particulares de estudio para un futuro aprovechando la resolución espacial que ofrece CALIFA. Por otro lado, el gráfico de la derecha muestra claramente que existe una importante fracción de la SFR poco oscurecida, es decir, que no está trazada por la emisión a $22\mu\text{m}$ en el caso de las galaxias estudiadas, al encontrarse gran parte de ellas por debajo de la relación 1:1. No obstante, de nuevo, surgen casos atractivos de estudio como son las dos galaxias de la parte superior con una importante tasa de formación oscurecida, es decir, no trazada ni por el UV ni por $H\alpha$ incluso tras ser estas corregidas de atenuación por polvo.

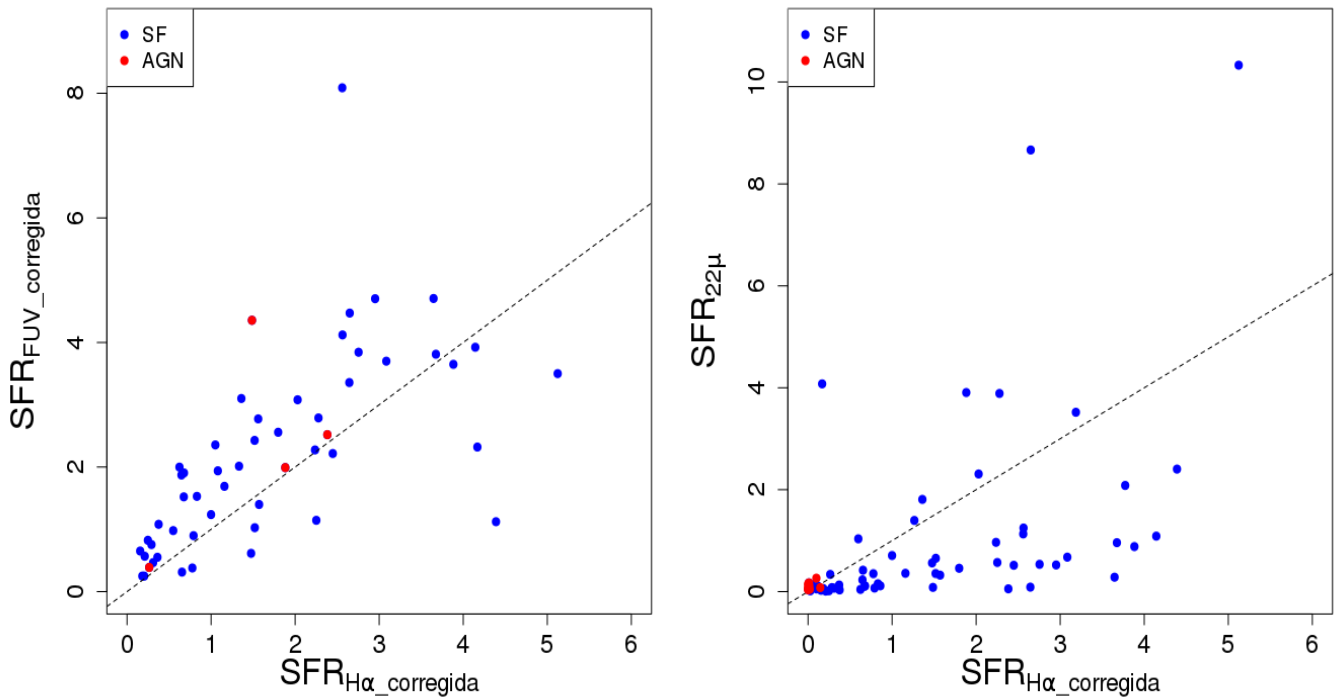


Figura 15: Calibradores simples de la tasa de formación estelar (SFR, del inglés *Star Formation Rate*). Izquierda: Comparación entre la SFR obtenida a partir de las medidas de la luminosidad UV corregida de extinción y la luminosidad de la línea de emisión $H\alpha$ también corregida de extinción. Derecha: Comparación entre la SFR obtenida de la luminosidad en $22\mu\text{m}$ (Banda W4 de WISE) y la luminosidad corregida en $H\alpha$. En ambos paneles se muestra la relación 1:1 como una línea discontinua.

5.2.2. Trazadores híbridos

En esta sección se muestran los gráficos para los trazadores híbridos de tasa de formación estelar (ver Figura 16). Se observa que ambos gráficos presentan un comportamiento similar. Por lo general, la formación estelar está poco oscurecida. De nuevo una parte de las galaxias analizadas se encuentran por debajo de la línea punteada que marca la relación 1:1. Vuelven a encontrarse casos individuales, las mismas dos galaxias que para el caso

de SFR derivada del IR frente a la SFR de $H\alpha$ corregida, donde las galaxias están fuertemente oscurecidas, volviéndose a proponer estos casos como casos de estudio a tratar en un futuro cercano. En particular, una búsqueda en la bibliografía de la propiedades de estos dos objetos muestra que al menos uno de ellos, NGC7591, está clasificado como una galaxia LIRG.

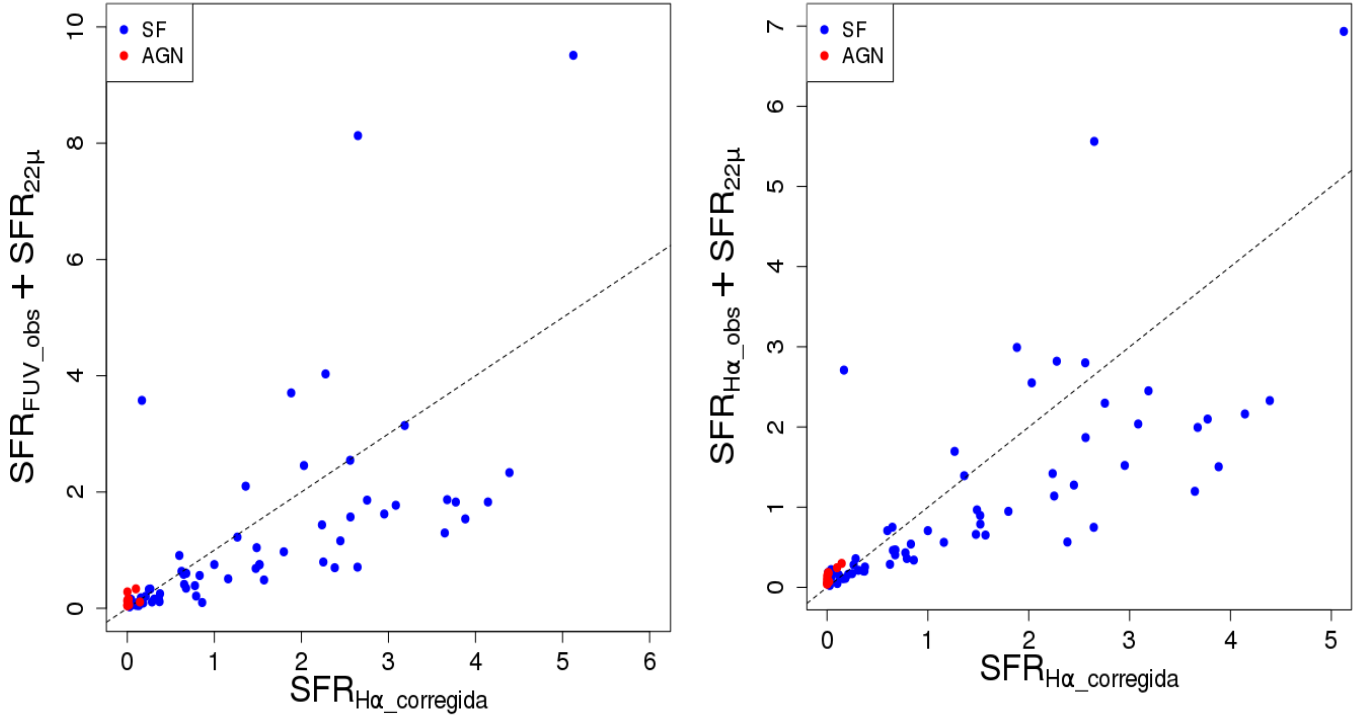


Figura 16: Calibradores híbridos de la SFR. Izquierda: Comparación entre la SFR obtenida a partir del calibrador híbrido FUV+ $22\mu m$ y la luminosidad corregida en $H\alpha$. Derecha: Comparación entre la SFR obtenida a partir del calibrador híbrido $H\alpha$ (observado)+ $22\mu m$ y la luminosidad corregida en $H\alpha$. En ambos paneles se muestra la relación 1:1 como una línea discontinua.

5.3. Atenuación y excesos de color

El gráfico de la izquierda de la Figura 17 se muestra la posición de las 91 galaxias estudiadas teniendo en cuenta su color FUV-NUV así como el cociente entre las líneas de emisión $H\alpha$ y $H\beta$. Con este dibujo podemos hacernos una idea de qué galaxias se han quedado fuera del análisis y los motivos de ello. Como ya se comentó se ha sido muy restrictivo al aplicar la relación entre la atenuación en el FUV y el color FUV-NUV (Muñoz-Mateos et al. 2009ab), quedándonos solo con aquellas galaxias que cumplen $FUV-NUV < 1$, es decir, evitamos las galaxias más rojas bien por presencia de poblaciones estelares envejecidas o por una gran cantidad de polvo presente en dichas galaxias. Por otro lado, el eje horizontal representa el cociente entre las líneas de emisión $H\alpha$ y $H\beta$, como sabemos (ver Osterbrook 1989) el cociente teórico entre estas líneas es de 2.86, suponiendo un valor mayor una atenuación en la luz que nos llega (la línea de emisión $H\beta$ se verá más atenuada que la línea de emisión $H\alpha$ por ser más azul). Los valores de dicho cociente inferiores al teórico se deben a que la mayoría de estas galaxias son elípticas y poseen muy poca formación estelar, lo que implica que las líneas de emisión anteriores son extremadamente débiles, lo que da lugar a grandes incertidumbres en el flujo de la línea $H\beta$ y también del decremento Balmer. Cuando tratamos de recuperar la emisión tras el ajuste del modelo de poblaciones estelares para eliminar el continuo en estos casos, la emisión es bastante difícil de recuperar. Luego, hay una correlación entre los dos criterios impuestos: $FUV-NUV < 1$ y $H\alpha/H\beta < 2.86$.

El gráfico de la derecha por su parte nos relaciona la atenuación derivada del continuo estelar frente a la atenuación proveniente de las líneas de emisión del gas. Calzetti et al. (2000) muestran en su artículo que la atenuación del continuo estelar en galaxias *starburst* es aproximadamente un 0.44 veces menor que la atenuación

del gas ionizado (medidas ambas por su exceso de color $E(B-V)$). En nuestro caso los ajustes obtenidos pueden verse en la parte superior del gráfico. La línea punteada nos da el ajuste obtenido para nuestros puntos. Si obligamos a que nuestra línea pase por el punto (0,0) el ajuste obtenido se acerca bastante al predicho por Calzetti (0.414 frente a 0.44) y dentro de los errores de ambos. Dicha suposición tiene una base física pues es de esperar que si no hay atenuación por el gas tampoco la haya para las estrellas. Por otro lado, también consideramos que la ausencia de puntos para valores pequeños del exceso de color derivado de las estrellas en nuestro gráfico, está sesgando la relación obtenida (en particular, la posible falta de galaxias enanas en la muestra). Confiamos en que al tiempo que se observen más galaxias con CALIFA podamos aumentar el número de puntos y reforzar nuestras conclusiones.

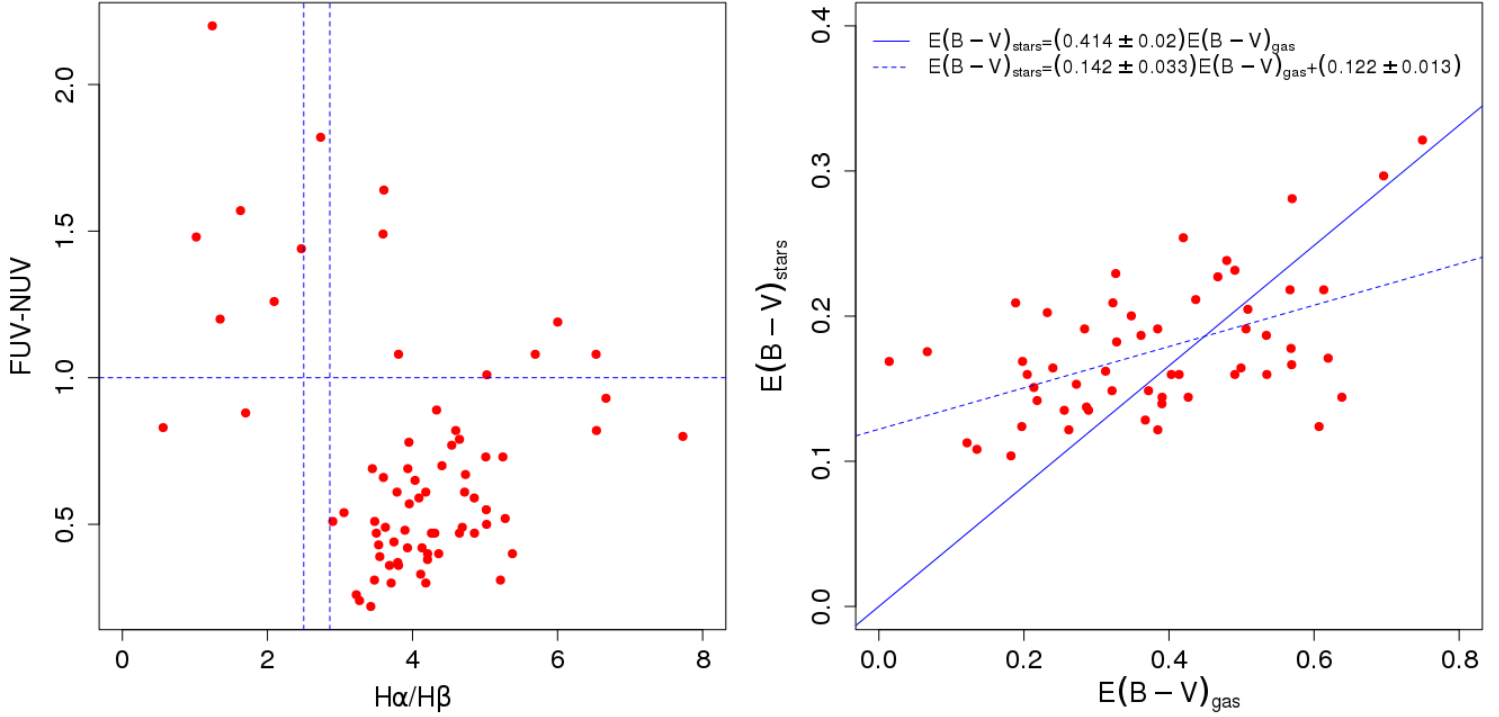


Figura 17: Izquierda: Variación del color FUV-NUV vs. el cociente de las líneas de emisión $H\alpha/H\beta$. La línea punteada horizontal marca el límite para el color FUV-NUV=1. Las líneas punteadas verticales marcan los valores 2.5 y 2.86 para el cociente $H\alpha/H\beta$. Derecha: representación del exceso de color estelar frente al exceso de color del gas. La línea sólida representa el ajuste obtenido cuando se impone la condición $E(B-V)_{stars}=E(B-V)_{gas}=0$, mientras que la línea punteada muestra el ajuste sin imponer ninguna condición.

5.4. Análisis bi-dimensional: mapas de SFR y atenuación

Los siguientes mapas (Figuras 18 y 19) muestran cual es el trabajo futuro que se planea llevar a cabo durante mi tesis doctoral con el objetivo de ahondar en el conocimiento de la distribución espacial de las propiedades físicas en galaxias cercanas espacialmente resueltas, tanto en la parte del UV como en la parte del óptico y de las diferencias obtenidas previamente entre los diferentes trazadores de la SFR. Aquí se presentan dos casos piloto de estudio, las galaxias NGC7549 y NGC6394, que se han elegido al disponer de los datos de espectroscopía bi-dimensional desde el principio del proyecto CALIFA.

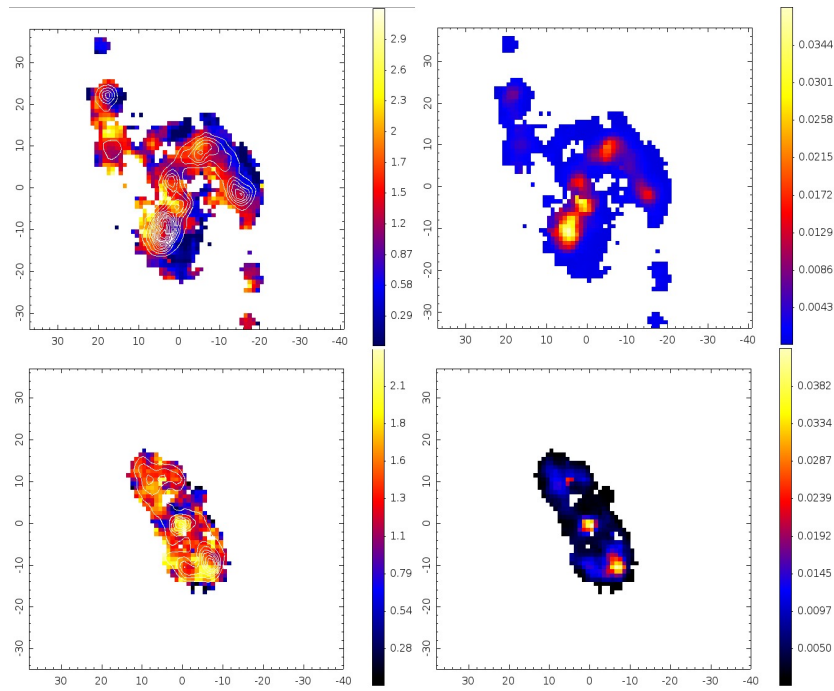


Figura 18: Mapas de extinción $A_{H\alpha}$ mostrando los contornos del flujo de la línea de emisión $H\alpha$, arriba para la galaxia NGC7549 y abajo para la galaxia NGC6394. A la izquierda aparecen los mapas de $\text{SFR}_{H\alpha}$ para las mismas galaxias.

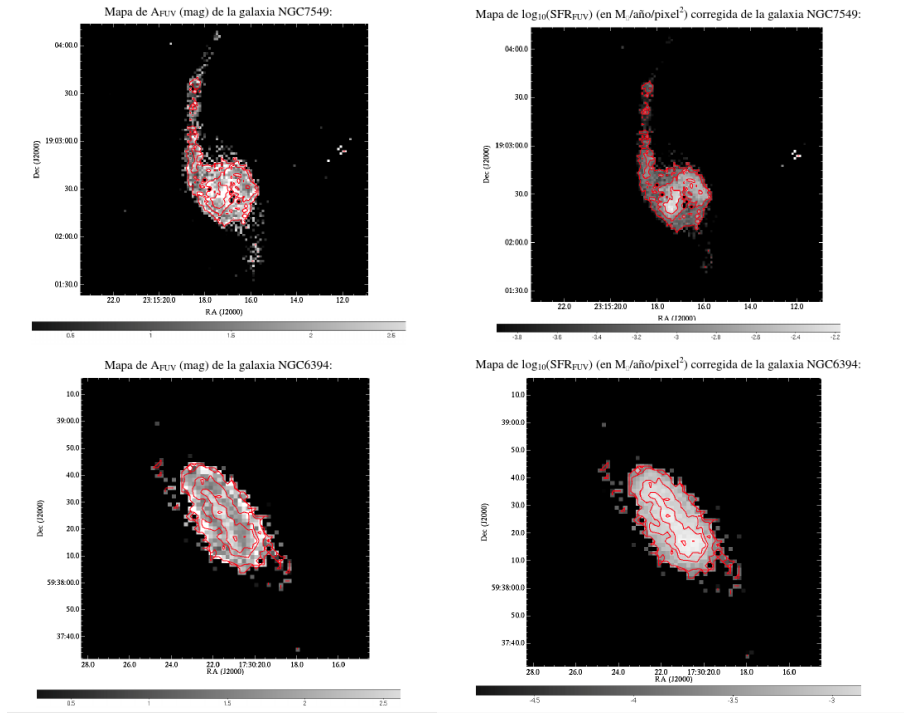


Figura 19: Se muestran los mismos mapas que en el Figura 19 pero esta vez para la extinción en el UV, A_{FUV} , y para la SFR_{FUV}

5.5. Análisis bi-dimensional: estudio de la variación radial de las SFRs

Aprovechando la fotometría superficial que realizamos en anillos concéntricos de 6 segundos de arco podemos estudiar el comportamiento radial de los valores de las tasas de formación estelar para las galaxias de nuestro estudio (ver Figura 20). Aquí se comenta de forma breve pues se propone también como trabajo futuro.

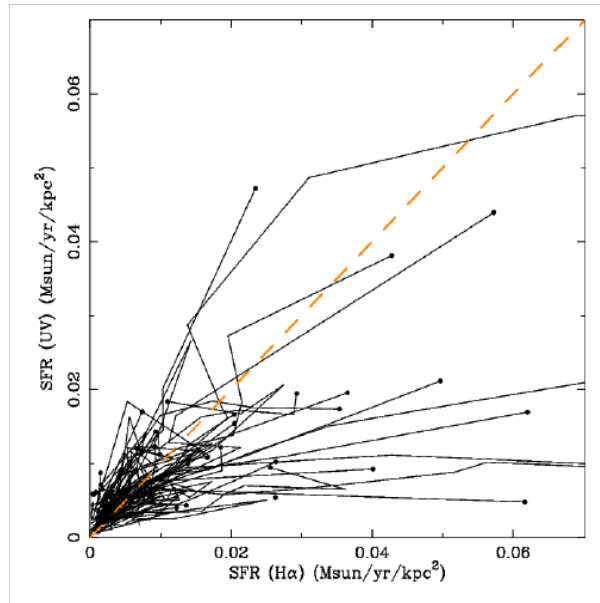


Figura 20: Variación radial de los valores de SFR_{FUV} vs. $SFR_{H\alpha}$ para las galaxias de este estudio.

Los resultados aquí expuestos se presentaron a la comunidad científica durante la *3rd Busy Week* del proyecto CALIFA que tuvo lugar en Heidelberg del 11-15 de Junio de este año (ver Figura 21), durante la cual pude impartir una charla mostrando algunos de los resultados de este trabajo.



Figura 21: Fotografía oficial de la reunión científica del proyecto CALIFA en el Max Planck Institute for Astronomy (MPIA, Heidelberg).

6. Conclusiones y trabajo futuro

Los resultados anteriores muestran que al comparar los distintos trazadores, simples o híbridos, frente a la tasa de formación estelar derivada de la luminosidad $H\alpha$ corregida ($SFR_{H\alpha}$) se obtienen resultados que difieren en función del trazador empleado. En primer lugar es importante señalar que es común tomar como referencia la $SFR_{H\alpha}$ (corregida de atenuación) pues se piensa que es la más fiable al estar muy bien calibrado (dependiente sólo de parámetros atómicos conocidos y del número de fotones ionizantes), al igual que también lo está la corrección de atenuación que se le aplica (ver Osterbrook 1989). Recordemos que la SFR depende exclusivamente de la línea de emisión de $H\alpha$ del gas ionizado y la atenuación depende del cociente de las líneas de emisión $H\alpha$ y $H\beta$ que son relativamente fáciles de observar y analizar.

Si nos fijamos en la Figura 15 donde se representa la SFR_{FUV} vs. la $SFR_{H\alpha}$ la correlación entre ambos trazadores es bastante aceptable. Bien es cierto que se aprecia un pequeño exceso de puntos con una mayor SFR_{FUV} , pero en general, podemos decir que la dispersión de los datos respecto a la línea 1:1 es buena. En términos generales podemos decir que la SFR_{FUV} reproduce bien la $SFR_{H\alpha}$. No obstante, es importante recordar que la SFR_{FUV} es algo menos fiable debido a la forma que tenemos de corregir la atenuación producida por el polvo impone una serie de limitaciones, por ejemplo, en la relación aquí empleada estamos limitados a los colores $FUV-NUV < 1$ para evitar las galaxias más rojas (bien por poblaciones estelares envejecidas, bien por grandes cantidades de polvo). Relación que, además, posee una gran dispersión al estar a su vez calibrada no directamente con A_{FUV} si no por medio del cociente TIR/FUV .

El gráfico en el que se compara la $SFR_{22\mu m}$ frente a la $SFR_{H\alpha}$ pone de manifiesto una gran cantidad de tasa de formación poco oscurecida para las galaxias estudiadas (panel de la derecha de la Figura 15). Se observa que gran parte de ellas (del orden de unos 3/4) se encuentran por debajo de la línea punteada que marca la relación 1:1. Esto implica que hay una gran cantidad de formación estelar que está poco atenuada por polvo, pues la emisión de $22\mu m$ no es capaz de trazarla.

La formulación de los trazadores híbridos ($H\alpha + 22\mu m$ o $UV + 22\mu m$) surge como una necesidad de capturar tanto la formación estelar oscurecida por polvo como la no-oscurcida combinando las mejores cualidades de los indicadores simples comentados anteriormente (SFR_{FUV} , $SFR_{H\alpha}$ y $SFR_{22\mu m}$). Estos calibradores híbridos, muy novedosos en la literatura pues han sido calibrados empíricamente en los últimos 5-7 años, solo presentan la desventaja de que se requieren dos medidas ampliamente separadas en longitud de onda, por un lado, una medida de la luz estelar directa y por otro, una medida de la luz reprocesada por el polvo (ver Kennicutt & Evans (2012) para una compilación de estos calibradores). Así, dichos trazadores se presentan como una solución al problema que plantea la $SFR_{22\mu m}$ pues con ellos se consigue recuperar también parte de esa tasa de formación *transparente*. Si nos fijamos en los gráficos anteriores se comprueba que, efectivamente, los valores de la tasa de formación están ahora más próximos a la línea 1:1. Cabe destacar que para valores altos de la atenuación, que generalmente corresponden a valores elevados de SFR, el polvo compite con el gas en la absorción de los fotones del continuo ionizante (o continuo Lyman). Combinando un trazador de gas ionizado (eg. $H\alpha$) con un trazador de la emisión por polvo (eg. $22\mu m$) se reducirá este problema.

Al margen de estas conclusiones generales, quería destacar también la presencia de objetos altamente oscurecidos, en concreto, nos encontramos con las galaxias UGC11680NED01 (tipo M51) y NGC7591 (tipo LIRG), véase que estos puntos destacan en los gráficos anteriores respecto al resto de objetos situándose muy por encima de ellos. En estos casos, en los que se cuenta con una formación estelar muy oscurecida, tanto el calibrador basado en $22\mu m$ como los híbridos proporcionan una medida de la SFR mucho mayor que la dada por la luminosidad $H\alpha$ corregida. Esto parece indicar que existe una fracción de SFR completamente oscurecida de cara a la emisión $H\alpha$ (ver Prescott et al. 2007). Estos objetos son poco frecuentes en el Universo Local, si bien son de gran interés, pues son análogos cercanos a objetos similares y muy numerosos a altos desplazamientos al rojo (ver Perez-Gonzalez et al. 2005).

Podemos decir que este estudio es un preámbulo que nos ha permitido caracterizar las propiedades globales de la muestra y posteriormente, a lo largo de la tesis, se plantea un análisis detallado de los objetos individuales ya en dos dimensiones, tal y como se ha mostrado en la Sección 5.4, aprovechándonos de la resolución espacial que nos ofrecen CALIFA y GALEX. Esto nos permitirá estudiar con gran detalle las regiones de formación estelar a nivel sub-galáctico. Para ello, se emplearán trazadores de SFR locales que difieren de los empleados en este trabajo (que son trazadores globales optimizados para el análisis de las propiedades de galaxias en su totalidad).

Como conclusión final a lo expuesto hasta el momento es importante hacer notar que los calibradores que se emplean dependen del tipo de galaxias estudiadas, es decir, se ven influenciados por la selección de la muestra.

En el caso que nos atañe, la muestra CALIFA, una muestra completa limitada en volumen y diámetro, nuestros resultados ofrecen una oportunidad única para la caracterización de la SFR en las galaxias del Universo Local. Es indispensable un buen entendimiento de estas galaxias si queremos entender como se comportan las galaxias a altos desplazamientos al rojo. En un futuro, cuando se hayan completado las observaciones, dispondremos de unas 600 galaxias y trataremos de generar nuevas calibraciones de los trazadores aquí empleados y compararlas con las existentes en la literatura. Será la primera vez que se realice un trabajo de este tipo con una muestra tan grande y contando con espectroscopía bi-dimensional para todas ellas.

Referencias

- [1] Bruzual and Charlot 2003, MNRAS, 344, 1000-1028.
- [2] Buat et al. 2005, ApJL, 619, 51-54.
- [3] Calzetti et al.2012, arXiv:1208.2997
- [4] Cardelli et al. 1989, Apj, 345, 245-256.
- [5] Cortese et al. 2008, MNRAS, 386, 1157-1168.
- [6] De Vaucouleurs et al. 2001, Third reference catalog of bright galaxies.
- [7] Gil de Paz et al. 2005, ApJS, 156, 345-360.
- [8] Gil de Paz et al. 2007, ApJS, 173, 185-255.
- [9] Kennicutt 1998, ARA&A, 36, 189-232.
- [10] Kennicutt& Evans 2012, ARAA, 50, 531-608
- [11] Muñoz-Mateos et al. 2009a, ApJ, 701, 1965-1991.
- [12] Muñoz-Mateos et al. 2009b, ApJ, 703, 1569-1596.
- [13] Osterbroock 1989, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei.
- [14] Prescott et al. 2007, ApJ, 668, 182.
- [15] Salpeter 1955, ApJ, 121, 161
- [16] Schmitt et al. 2001, ApJ, 555, 663-672.
- [17] Schmitt et al. 2003, ApJ, 597, 768-779.
- [18] Prescott et al. 2007, ApJ, 668, 182-202.

Enlaces relevantes:

- [19] Herramienta GalexView: <http://galex.stsci.edu/GalexView/>
- [20] Página web del proyecto CALIFA: http://www.caha.es/CALIFA/public_html/