

Estudio multifrecuencia de la galaxia IZw18**Multifrequency study of galaxy IZw18**José María Gómez¹ & Carolina Kehrig^{2,3}¹Departamento de Física, FACEN-UNA. Correo electrónico: jhoseghomez@yahoo.es²Instituto de Astrofísica de Andalucía IAA, España. Correo electrónico: kehrig@iaa.es³Consejo Superior de Investigaciones Científicas CSIC, España.

Resumen: En este trabajo se ha realizado un estudio multifrecuencia de la galaxia enana compacta azul IZw18. Se la considera una galaxia con características similares a las galaxias primitivas del universo lejano, dada su baja metalicidad y su importante eficiencia de formación estelar. Se utilizaron imágenes del WISE (infrarrojo cercano/medio) [California Institute of Technology, 2015], 2MASS (infrarrojo cercano) [Skrutskie *et al.*, 2006], SDSS (visible) [Gal & Evans, 2004] y GALEX (ultravioleta) [Neff & Myers, 2012] de forma a cubrir un amplio rango de longitudes de onda. De cada imagen se obtuvo la densidad de flujo de forma a ajustarla a las salidas del código de modelado de galaxias GRASIL. El modelo de mejor ajuste muestra una Densidad Espectral de Energía con altos valores de densidad de flujo para longitudes de onda menores. La historia de la tasa de formación estelar obtenida muestra una formación estelar temprana desde hace unos 14 Gyr a una tasa del orden de los 1×10^{-4} MSol/yr, que creciendo lentamente alcanza una tasa de 0.094 MSol/yr.

Palabras clave: Multifrecuencia, densidad de flujo, densidad espectral de energía

Abstract: This paper has done a multifrequency study of the blue compact dwarf galaxy IZw18. It is considered a galaxy similar to primitive galaxies in the distant universe features, given their low metallicity and high rate of star formation. WISE images (near infrared / medium), 2MASS (near infrared), SDSS (visible) and GALEX (ultraviolet) so as to cover a wide range of wavelengths were used. Each image flux density so as to adjust to the outputs of code modeling GRASIL galaxies was obtained the best fit model shows a Spectral Energy Distribution with high flux density values for shorter wavelengths. The history of star formation rate obtained shows an early star formation since about 14 Gyr at a rate of the order of 1×10^{-4} Msol /yr, which grow slowly reaching a rate of 0.094 Msol / yr.

Keywords: Multifrequency, flux density, spectral energy distribution.

INTRODUCCIÓN

Las galaxias están constituidas por millones de estrellas, de las más variadas características, además de gas y polvo. Estos últimos, que presentes en mayor o menor medida son claves a la hora de conocer el estado evolutivo de la galaxia que los contiene, dado que tienen una fuerte incidencia sobre todo en la formación de estrellas, atendiendo que las mismas son formadas a partir de estos materiales.

El polvo juega un papel fundamental en la formación estelar, ya que impide que la radiación ultravioleta (UV) aumente la temperatura del gas e impida su colapso. También al estar presente en la galaxia misma, cambia las condiciones físicas y químicas del medio interestelar (ISM del inglés

Interstellar Medium) (Silva, L. & Danese, L., 1998). De forma a poder realizar un modelo de una galaxia es necesario conocer la forma con que cambia la tasa de formación estelar (SFR del inglés Star Formation Rate), la función inicial de masa (IMF del inglés Initial Mass Function), la metalicidad $Z(t)$ y la fracción residual de gas $g(t)$. Luego es posible tener en cuenta todas las estrellas y el gas presentes en una galaxia en un tiempo t_g de forma a estimar su densidad espectral de energía (SED del inglés Spectral Energy Distribution) sumando las contribuciones de todas las estrellas y el gas de la galaxia.

Unos de los códigos de modelado de galaxias que además de los factores mencionados arriba tiene en cuenta la geometría de la distribución del

Recibido: 09/05/2017 Aceptado: 19/07/2018



2078-399X/© 2018 Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay. Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>).

polvo en una galaxia es el GRASIL. Donde se tiene especialmente en cuenta el transporte radiativo de las emisiones del polvo y las estrellas (Silva, L. & Danese, L., 1998). A partir de las imágenes de una galaxia dada en diferentes filtros, se puede ajustar los datos fotométricos de esta galaxia a las SEDs sintéticas obtenidas de los modelos y utilizando una estadística bayesiana definir el modelo de mejor ajuste. Hecho esto se podrá estudiar las características de la galaxia mediante los parámetros obtenidos.

La galaxia IZw18 representa un buen objeto para el estudio de la relación entre galaxias de baja metalicidad y la formación de estrellas en nubes moleculares, así como la evolución de estrellas masivas. Constituye además, un ejemplo de galaxia con características similares a las galaxias primitivas, pero ubicada en el Universo local a una distancia de unos 18.2 ± 1.5 Mpc según últimos trabajos al respecto (Aloisi *et al.*, 2007), por tanto, sus propiedades podrían ser comparadas con aquellas galaxias primitivas del universo lejano. Está constituida por una estructura dividida en dos partes: una llamada cuerpo principal y el otro cuerpo secundario. La primera con una masa en estrellas viejas de límite inferior del orden de 2×10^6 Msol, está caracterizada por un alta eficiencia de formación estelar, sobre todo en los últimos 10 Myr, sin embargo, la formación estelar ya habría comenzado 1 Gyr antes. Por el contrario, la masa y la tasa de formación estelar no son bien conocidas para el cuerpo secundario (Annibali, F. *et al.*, 2013).

La Figura 1 muestra una imagen de la galaxia IZw18. La población estelar de IZw18 está constituida principalmente por estrellas jóvenes las cuales le dan su color azul característico (Kunth, D. & Sargent W.L.W., 1986). Sin embargo, el rango para las edades abarcaría desde las de reciente formación e incluirían aquellas estrellas mayores a los 13 Gyr de edad. Las estrellas jóvenes estarían más concentradas, sobretodo en la parte noroeste del cuerpo principal. Mientras las estrellas viejas y las de edad intermedia se distribuirían de manera homogénea (Contreras Ramos, R. *et al.*, 2011). Esta distribución es tal que cerca de la mitad de las estrellas masivas se concentran en dos grupos, al norte

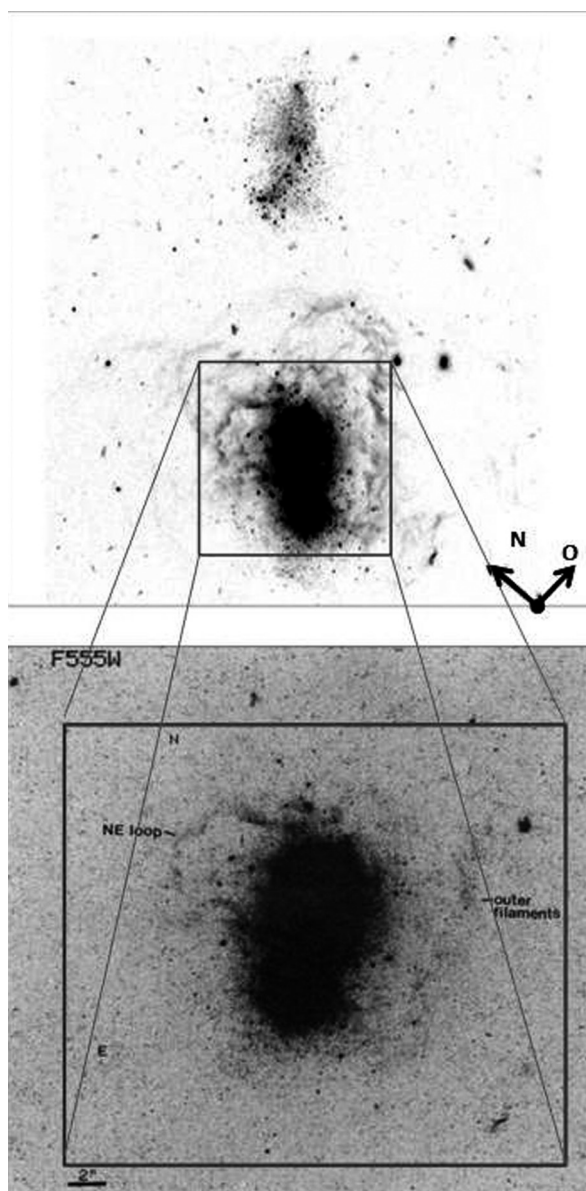


Figura 1. (Arriba) Imagen de la Galaxia IZw18 tomadas por el Hubble Space Telescope (HST) en la banda F606W (centrada en 5957 Å y de 1508 Å de ancho de banda), se observan el cuerpo principal y el cuerpo secundario. La dirección Norte-Sur (Este-Oeste) también es indicada con las flechas correspondientes. Se llega a individualizar estrellas en ambas regiones, así como las regiones de gas y polvo. (Abajo) Imagen en filtro F555W (centrada en 5407 Å y de 1236 Å de ancho de banda) del HST donde se observa bucles y filamentos de gas ionizado prolongándose hasta las partes externas del cuerpo principal. [Fuentes: Annibali *et al.* (2013), Hunter & Thronson (1995)].

y al sur del cuerpo principal. Otra característica de esta galaxia son los gases ionizados que inclusive forman estructuras filamentosas del orden de 450 pc como se aprecia en la Figura 1 (Hunter, D.A. & Thronson, H.A.(Jr),1995).

Estudio Multifrecuencia

Este tipo de estudios se abrieron paso gracias a las múltiples misiones espaciales y terrestres que pudieron superar la barrera que significaba la atmósfera para muchos rangos de energía.

Además, con el avance tecnológico se han podido construir dispositivos para la observación astronómica en un amplio rango de longitudes de onda. Permitieron así cubrir grandes regiones del cielo, donde fueron estudiadas cantidades enormes de fuentes en cada longitud de onda, posibilitando la realización de estudios antes de imposible realización, dado que no se contaba con estos datos multifrecuencia.

Algunas de las ventajas de estos estudios multifrecuencia aplicado al estudio de las galaxias son (Santini, 2014):

- Dan una completa visión de una galaxia en su conjunto.
- Permiten un estudio de la evolución de las galaxias con el redshift fotométrico.
- Permiten estimar el redshift fotométrico y algunos parámetros físicos.

Para poder sintetizar la SED de una galaxia se tiene en cuenta entre otros, estos elementos (Silva, 2010):

- Las estrellas y el gas.
- La función inicial de masa IMF.
- La tasa de formación estelar SFR.
- El polvo.

Considerando a estos elementos es posible obtener una SED integrada, que tiene en cuenta a todas las estrellas y el gas de la galaxia.

En este sentido es necesario calcular la luminosidad espectral a una longitud de onda dada $f_{\lambda}^{SSP}(t, Z)$ (Potencia por unidad de frecuencia) de una Simple población estelar (SSP del inglés Single

Stellar Populations). Para ello es necesario conocer la función inicial de masa $\Phi(m)$ que actúa como factor de peso y la luminosidad espectral estelar a la longitud de onda considerada $f_{\lambda}(m, t, Z)$ (la cual a su vez depende de la metalicidad, la masa, el tiempo). De esta forma obtenemos la luminosidad espectral de una población estelar singular $f_{\lambda}^{SSP}(t, Z)$ sumando todas las contribuciones de las estrellas componentes:

$$f_{\lambda}^{SSP}(t, Z) = \int_{M_{min}}^{M_{max}} \Phi(m) f_{\lambda}(m, t, Z) dm \quad (1)$$

Si a su vez sumamos las contribuciones de todas las poblaciones estelares singulares en la galaxia dadas por (1) desde el tiempo $t=0$ hasta el presente t obtendremos la luminosidad espectral de la galaxia a la longitud de onda considerada $f_{\lambda}^{gal}(t, Z)$, regida por una ecuación de la forma:

$$f_{\lambda}^{gal}(t, Z) = \int_0^t f_{\lambda}^{SSP}(t - t', Z) SFR(t') dt' \quad (2)$$

La tasa de formación estelar SFR cumple la función de actuar como peso de la luminosidad espectral f_{λ}^{SSP} en la ecuación (2).

Modelado de galaxias mediante el código GRASIL

En la última sección no ha sido tenido en cuenta el polvo galáctico para obtener las luminosidades espectrales dadas por (2). El polvo tiene la importancia de favorecer la formación estelar, ya que hace posible mantener la temperatura lo suficientemente baja para permitir la inestabilidad gravitacional (Silva, L. & Danese, L.,1998). Uno de los códigos de modelado de galaxias que tiene en cuenta la distribución de polvo es GRASIL (de GRAPhite-SILicate).

El polvo que considera este código se ubica principalmente en tres ambientes diferentes que son:

- Polvo en regiones HII calentado por la radiación interestelar.
- Polvo asociado a las regiones moleculares.
- Polvo circunestelar producido por estrellas en etapas de evolución.

Por su parte los gases de las galaxias se dividen en dos tipos:

- Gas molecular de formación estelar.
- Medio difuso.

En cuanto a la geometría de la distribución de gas y polvo, se asume una distribución simétrica tanto azimutal como ecuatorial.

Así existen tres componentes principales de la distribución que son:

- Nubes moleculares complejas de formación estelar con gas y polvo comprimidos, regiones HII con estrellas jóvenes con emisividad volumétrica j_{λ}^{mc} (Energía emitida por unidad de masa del cuerpo que radia (Gutiérrez, A. & Moreno H., 1981).
- Estrellas que escaparon de las regiones densas con emisividad volumétrica j_{λ}^* .
- Gas difuso (cirrus) con emisividad volumétrica j_{λ}^c asociadas a estrellas más evolucionadas. Cada una de estas regiones contribuye a la emisividad volumétrica total, de forma que la emisión está caracterizada por una ecuación de la forma:

$$j_{\lambda} = j_{\lambda}^{\text{mc}} + j_{\lambda}^* + j_{\lambda}^c \quad (3)$$

Una galaxia es dividida para su estudio en pequeños elementos V_i , en donde el elemento de radiación dada la emisividad de extinción $J_{\lambda,i}$ de estrellas libres, nubes moleculares, y polvo difuso es:

$$J_{\lambda,i} = \sum_k \frac{v_k (j_{\lambda,k}^{\text{mc}} + j_{\lambda,k}^* + j_{\lambda}^c) \exp[-\tau_{\text{eff},\lambda}(i,k)]}{r^2(i,k)} \quad (4),$$

donde $\tau_{\text{eff},\lambda}(i,k)$ es la profundidad óptica a la longitud de onda λ entre 2 elementos (definida de tal forma que valiéndolo 1, la intensidad específica de radiación disminuye 1/e veces de su valor original al pasar por una capa de un material dado (Gutiérrez, A. & Moreno H., 1981) y $r(i,k)$ es la distancia entre los elementos i y k . Por último, la densidad de flujo específica (monocromática) medida por una fuente externa en una dirección θ es la suma sobre toda la galaxia de la emisividad extinguida de las estrellas libres, nubes moleculares, y polvo difuso:

$$F_{\lambda}(\theta) = 4\pi \sum_k v_k j_{\lambda,k} \exp[-\tau_{\text{eff},\lambda}(k,\theta)] \quad (5),$$

Donde $\tau_{\text{eff},\lambda}(k,\theta)$ es la profundidad óptica de un elemento k hacia las afueras de la galaxia en la dirección del ángulo θ (Silva, L. & Danese, L., 1998). De esta forma la luminosidad espectral dada por la ecuación (2) llega al observador en forma de densidad de flujo monocromática dada por (5). Así partiendo de las características estelares y del medio interestelar se puede sintetizar la *SED* de una galaxia. La importancia del modelado de las densidades espectrales de energía (*SED*) de galaxias mediante *GRASIL* es la posibilidad de interpretar observaciones y la de realizar predicciones sobre modelos de formación galáctica (Silva, L., 2010). En cuanto a la interpretación de resultados, podemos agregar que algunos de los parámetros que son posibles obtener del ajuste de las SEDs sintéticas a las SEDs fotométricas son: v que es un parámetro libre que varía entre 2.5×10^{-4} a 4 para bajas y altas tasas eficiencias de formación estelar respectivamente, por tanto regula la SFR dentro una ley tipo Schmidt siguiente:

$$\Psi(t) = v M_{g(t)}^k \quad (6)$$

Donde $M_{g(t)}$, es la masa del gas en cualquier tiempo, $K=1$, es decir, suponemos que SFR varia linealmente con la masa de gas en cualquier tiempo. Para a la función inicial de masa (IMF) se usa la ley de Salpeter que es de la forma:

$$\Phi(M) \propto M^{-x} \quad (7),$$

donde $x=2.35$ y el límite superior del rango de masas es fijada a $100 M_{\text{Sol}}$. El colapso de gas primordial en la fase inicial de formación de la galaxia, es regulada por el parámetro τ_{inf} en una ley descrita por una función exponencial de la forma:

$$MM'(t) \propto \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{inf}}}\right) \quad (8),$$

donde τ_{inf} varía entre 0,1 a 21,6 Gyr.

Esta última ecuación indica una disminución gradual del colapso del gas en la galaxia. Además, la inclinación de una galaxia puede variar entre 15 a 75° y afecta la SED de la misma en el sentido

del efecto de la distribución de polvo en diferentes partes de la galaxia y la detección de la señal desde la Tierra. Este tipo de modelos ha sido testado exitosamente en galaxias cercanas esferoidales así como en galaxias espirales con determinados parámetros seleccionados cuidadosamente como ser un valor bajo de v y/o un tiempo de colapso de gas muy grande (Silva, L. & Danese, L., 1998).

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de imágenes

Para realizar el estudio multifrecuencia de una galaxia, es necesario obtener imágenes calibradas en varias longitudes de onda.

Esto se realizó bajando imágenes mediante el servicio NED (NASA Extragalactic Database), buscando por el nombre o las coordenadas absolutas de la galaxia IZw18. Una vez obtenida las imágenes es necesario realizar la fotometría de apertura.

Para ello se tiene en cuenta las características técnicas de los instrumentos utilizados por las diferentes misiones espaciales o proyectos. Estas características son entre otras: la escala de pixel, relación cuentas/unidad y la densidad de flujo. Detallamos brevemente a continuación estas características para cada misión.

Misión GALEX (Galaxy Evolution Explorer)

Esta misión ha tomado imágenes mediante un satélite dotado de un telescopio de 50 cm de diámetro en el ultravioleta, específicamente en ultravioleta lejano como próximo, de forma a estudiar galaxias en formación y tratar de entender los caminos que llevaron a la composición química de nuestra propia galaxia y las del universo local. Los estudios de GALEX se centran en dos bandas: FUV (Far UltraViolet) entre (1350-1750) Å y NUV (Near UltraViolet) entre (1750- 2800) Å. Ha barrido un área del orden de los 40000 grados² cubriendo un volumen de 1.5 Gpc³, tomando datos de unas 10.000 galaxias. La escala de pixel es de 1.5 arcsec/pixel, y la respuesta instrumental está dada en cuentas/seg/pixel/rr (cps/rr). La magnitud calibrada Galex es definida de la siguiente manera:

$$\text{mag}_{\text{GALEX}} = -2,5 \log_{10} (\text{cps rr}) \quad (9)$$

Para transformar la magnitud calibrada de GALEX en densidad de flujo físico se utiliza los factores de conversión apropiados para cada filtro (GALEX Photometry, 2015).

Misión 2MASS (Two Micron All Sky Survey)

Esta misión tiene el objetivo de estudiar nuestra galaxia, así como el universo cercano. Ha llegado a obtener datos de cerca de 1.6 millones de galaxias resueltas como cuerpos extensos, además de cerca de 500 millones de fuentes puntuales entre galaxias y estrellas. Específicamente es posible estudiar objetos fríos como estrellas de baja luminosidad, enanas marrones y objetos o regiones oscurecidas por el polvo galáctico. Obtuvo imágenes con un telescopio de 1.3 m de apertura ubicado en monte Hopkins- Arizona-EEUU y otro en el observatorio de Cerro Tololo-Chile, cubriendo alrededor del 95% del cielo sin saltos mayores a 200 grados². Su estudio se centra en tres bandas J (1,25 μ), H (1,65 μ), K (2,17 μ), con una escala de pixel de 2 arcsec/pixel. Los valores de pixel están en "DN" (Data Number units). Con este valor se calcula la densidad de flujo según la siguiente relación:

$$\text{mag} = \text{MAGZD} - 2,5 \log_{10} (\text{DN}) \quad (10)$$

Donde MAGZD, es la magnitud en el punto cero especificada en la cabecera de las imágenes de 2MASS. Está relacionada a su vez con la densidad de flujo para una magnitud cero en Janskys (Jy) (2MASS, Photometry, 2015).

Misión WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer)

Utilizando un telescopio de 40 cm de diámetro con cuatro detectores criogénicos, que una vez puestos en órbita han proporcionado imágenes en cuatro bandas: 3.4 μm, 4.6 μm, 1 μm y entre 12-22 μm habiendo obtenido datos de cerca de 750 millones de objetos mediante 2 escaneos completos del cielo. Diseñado principalmente para realizar estudios de objetos de baja temperatura, tanto del sistema solar, de la Vía láctea y del Universo lejano. La magnitud

calibrada de un objeto para las imágenes WISE se calcula por:

$$\text{mag}_{\text{WISE}} = \text{MAGZP} - 2,5 \log_{10}(f) \quad (11)$$

De la ecuación anterior es posible obtener la densidad de flujo f , que para pasarlo a Janskys (Jy) deben ser multiplicados por las densidades de flujo en el punto cero Flux_ZP que corresponde a cada filtro (Wise Photometry, 2016).

Misión SDSS (Sloan Digital Sky Survey)

Esta misión tiene como uno de sus objetivos construir un mapa tridimensional del Universo, además de obtener espectros de 3 millones de objetos, imágenes de 141 millones de objetos, cubriendo cerca de la cuarta parte del cielo, específicamente 5282 grados². Utilizó un telescopio de 2.5 m ubicado en el Apache Point Observatory y otro de la misma apertura llamado Irénée du Pont ubicado en el observatorio Las Campanas de Chile. Los filtros con los que trabaja, son los filtros u, g, r, i, z similar al de Johnson-Cousin diseñados especialmente para este proyecto. La densidad de flujo se calcula mediante la relación siguiente:

$$f = (\text{flux}_{20} \times 1 \times 10^8) \times 10^{\frac{-\text{mag}}{2,5}} \quad (12),$$

Dónde flux_{20} es la densidad de flujo correspondiente a un objeto de magnitud 20 y que a su vez está relacionada con la magnitud en el punto cero ZPMAG de la siguiente manera:

$$\text{ZPMAG} = -2,5 \log(\text{Flux}_{20} \times 1 \times 10^8) \quad (13)$$

Los valores de flux_{20} pueden ser obtenidos de las cabeceras de las imágenes respectivas (SDSS Photometry, 2015).

Fotometría de IZw18

Para la realización de la fotometría se utilizó el paquete de herramientas astronómicas IRAF (Image Reduction for Astronomy Facilities), suministrado de manera libre por NOAO (National Optical Astronomy Observatories). Se ha empezado por recortar y centrar las imágenes mediante la tarea wregister tomando como referencia la imagen en banda 1 de la misión WISE, debido a que la galaxia aparece

bien centrada en esta imagen. Las coordenadas del centro aproximado de la galaxia (X,Y) en píxeles, fue ubicada en un fichero texto y utilizado como centro de la apertura en la fotometría de todas las imágenes. Este proceso fue repetido para todas las demás imágenes disponibles en otras longitudes de onda para la galaxia irregular IZw18.

En la Figura 2 apreciamos imágenes recortadas para los filtros “r” y “u” del SDSS, donde en un

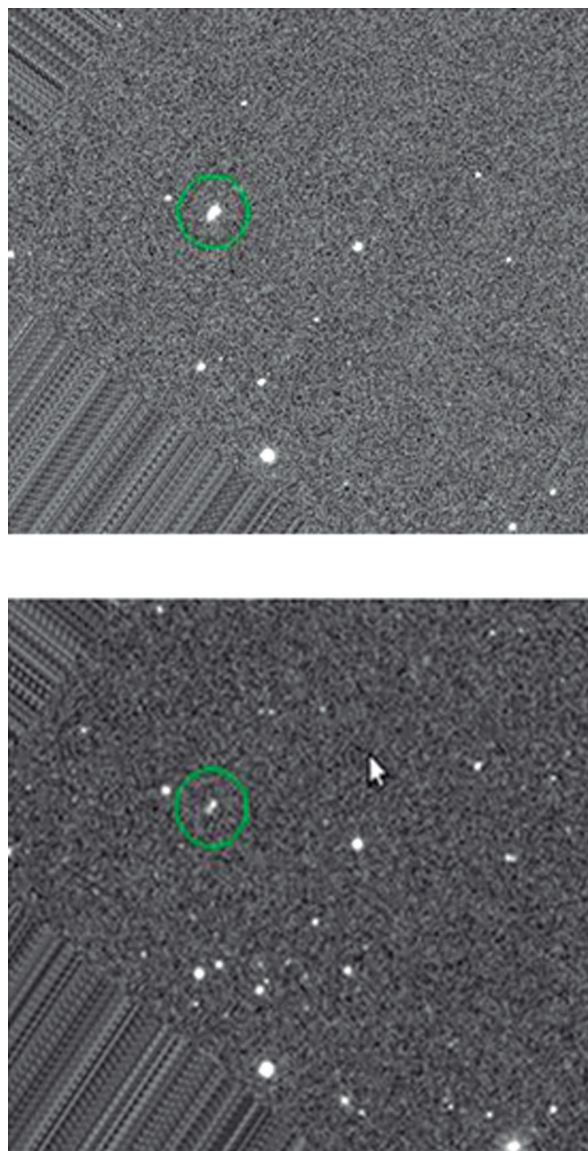


Figura 2. Imágenes del SDSS en filtro “r” (arriba) y en filtro “u” (abajo) recortadas con IRAF, donde se indica con el círculo verde la galaxia IZw18.

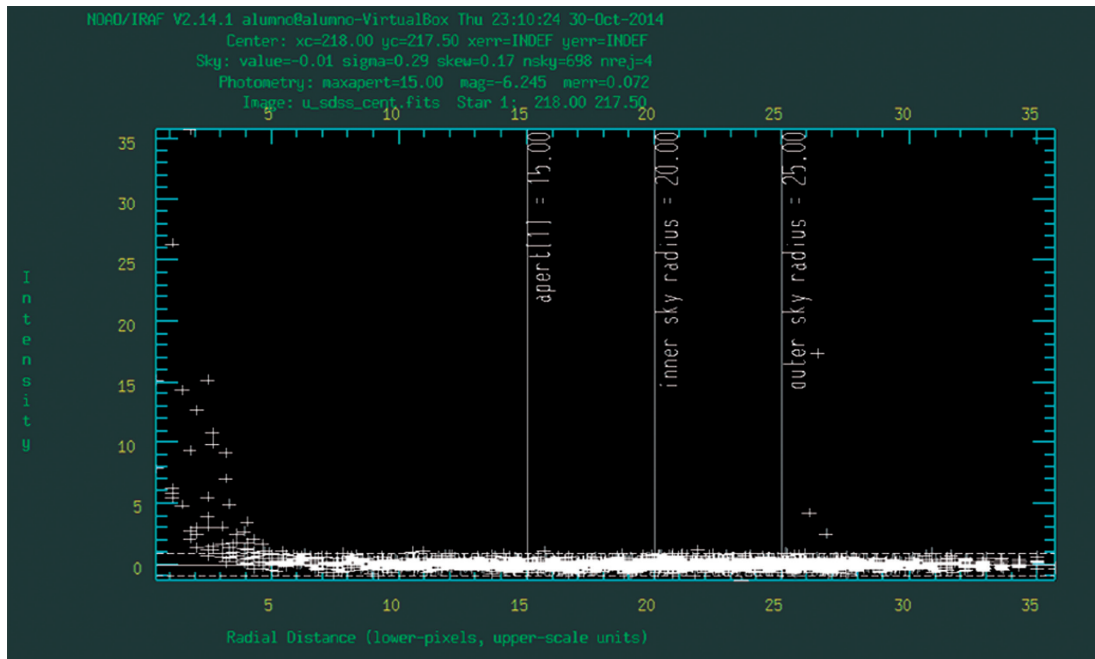


Figura 3. Perfil radial de la fotometría de la galaxia IZw18 en filtro “u” obtenida con el servidor de imagen de pantalla DS9 de IRAF. Se indica mediante las líneas verticales blancas: el radio de apertura utilizado (15 píxeles), el radio interior del cielo (20 píxeles), así como el exterior (25 píxeles) de izquierda a derecha respectivamente.

círculo verde se señala la a IZw18. Seguidamente se utilizó la tarea “phot” ubicada en el paquete “apphot” (se instala previamente noao y digiphot). Todo esto, no sin antes definir la apertura y editar los parámetros de centrado, datos y cielo. La apertura se definió de manera manual trabajando sobre la imagen en filtro “r” de la misión SDSS, con centro de apertura especificado en el fichero texto previamente mencionado. Trabajando sobre esta imagen se definió la apertura en 15 píxeles de radio, de forma cubrir sobradamente el tamaño de la galaxia y no abarcar otras fuentes de energía, como ser estrellas débiles.

El tamaño de pixel para esta imagen es de $1.0688 \times 10''/\text{pixel} = 6.41298 \times 10^{-3} \text{ arcsec}/\text{pixel}$, este valor da una apertura del orden de 0.192 arcsec para este caso y fue utilizado como referencia para la fotometría de las demás imágenes de forma a definir siempre la misma apertura, que corresponderá en ese caso a un número diferente de píxeles. En la Figura 3 podemos apreciar un perfil radial típico encontrado en la fotometría de IZw18.

En algunos casos fue necesario cambiar la

apertura, ya que la señal registrada sobrepasaba la posición de los 15 píxeles en el perfil radial correspondiente.

Para realizar la fotometría del cielo el *annulus* fue fijado en 5 píxeles sobre la apertura, es decir, en 20 píxeles. Mientras tanto el *dannulus* fue fijado en 5 píxeles.

Editando los parámetros de la tarea *phot*, específicamente el *apertur*, fue fijada la apertura en 15 píxeles.

Obtención del modelo de mejor ajuste

Una vez obtenidas las densidades de flujo en cada longitud de onda, fue utilizado el código *GRASIL*, de forma tal a ajustar estas mediciones con las salidas de dicho código.

La base de datos utilizada consiste en 864 modelos, con 14 entradas que se corresponden con las densidades de flujos obtenidos de las imágenes de las misiones *GALEX*, *SDSS*, *2MASS*, *WISE*, en donde las imágenes correspondientes a los filtros H ($1,65 \mu$) y K ($2,17 \mu$) del 2MASS arrojaron errores durante la realización de la fotometría por lo que

no fueron tenidas en cuenta. Estas imágenes presentaban una relación señal ruido muy baja. Para realizar el ajuste de los datos a las SEDs sintéticos es necesario calcular el Chi-cuadrado reducido definido por:

$$\chi^2 = \sum_i^n \chi_i^2 \quad (14)$$

$$\text{Donde } \chi_i^2 = (f_{\lambda,i} - c j_{\lambda,i})^2 / (\Delta f_{\lambda,i})^2 \quad (15)$$

Siendo respectivamente:

$f_{\lambda,i}$ = densidad de flujo medida a λ_i

$j_{\lambda,i}$ = densidad de flujo del modelo a λ_i

$\Delta f_{\lambda,i}$ = error en la densidad de flujo medida a λ_i

c = factor por el que se multiplica cada densidad de flujo del modelo, ya que sus valores están en unidades arbitrarias

El cálculo de c se realiza de forma tal a minimizar el χ^2 , por tanto derivando (15) con respecto a c y resolviendo para esta constante tenemos:

$$cc = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{j_{\lambda,i} f_{\lambda,i}}{\Delta f_{\lambda,i}^2} \right)}{\sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{j_{\lambda,i}}{\Delta f_{\lambda,i}} \right)^2} \quad (16)$$

Con esto podemos obtener el modelo que mejor se ajuste a nuestros valores de densidad de flujo medidas y luego analizar las propiedades de la galaxia IZw18 que se desprenden de dicho modelo.

De forma a evaluar la bondad de ajuste de los datos al modelo es útil calcular el *coeficiente de regresión* R^2 , definido por una ecuación de la forma:

$$R^2 = \left(\frac{S_t^2 - S_f^2}{S_t^2} \right) \quad (17)$$

Donde S_t^2 es la varianza total y S_f^2 es la varianza del ajuste o Chi-cuadrado por grado de libertad (Gil, S. y Rodríguez, E., 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de magnitud obtenidas en la fotometría fueron convertidos a densidad de flujo mediante las relaciones logarítmicas mencionadas anteriormente,

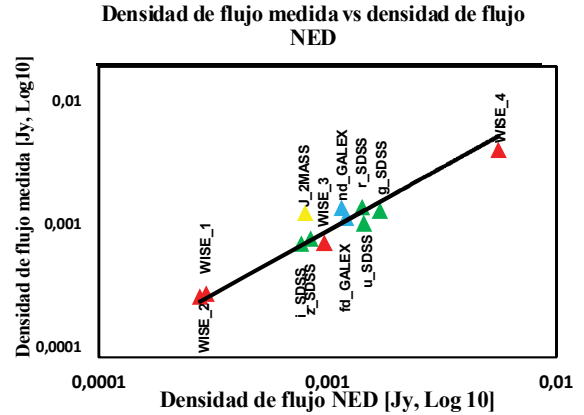


Figura 4. Gráfica de comparación entre los valores de densidad de flujo medidas (ordenada) contra los de la NED (abscisa), ambos en Janskys (Jy). En línea continua se tiene la gráfica función $y = x$ alrededor de la cual se dispersan los valores de densidad de flujo. Se ha etiquetado cada punto indicando el filtro y la misión correspondiente.

específicamente en Janskys (Jy) o equivalentemente en $\text{erg} \text{seg}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$. Estos valores lo comparamos con los valores de referencia obtenidas de la NED. En la Figura 4 se presentan los resultados: Se observa una dispersión de puntos muy próximos a la recta $y = x$. Se tiene que las mayores dispersiones corresponden a los filtros WISE_4, J_2MASS y nd_GALEX. Por tanto, se tienen valores que guardan buena relación con los de la bibliografía.

Esto nos permite avanzar hacia el siguiente paso consistente en el cálculo del modelo de mejor ajuste con ayuda de las ecuaciones del (14) al (16). De entre los 864 modelos, corresponde el mejor ajuste a aquel con Chi-cuadrado mínimo, que resultó ser una galaxia en cuya denominación se encuentra varias características resaltantes del mismo, como ser: Tiempo de escape de estrellas masivas igual a 4×10^7 años, masa de las nubes moleculares igual a $3 \times 10^5 M_{\text{Sol}}$, parámetro “ v ” de la ley de Schmidt (6) igual a 3.2, por tanto, la galaxia tiene una alta eficiencia de formación estelar, parámetro “ τ ” igual a 1.2 Gyr correspondiendo esto a una alta tasa de acrecimiento del gas de la galaxia, y el grado de inclinación de la galaxia es de 75 grados.

Todos estos valores corresponden a parámetros libres, no así la edad de la galaxia fijada para todos los modelos en 14Gyr años. En este punto es

Comparación entre la SED medida y la del modelo mejor ajuste

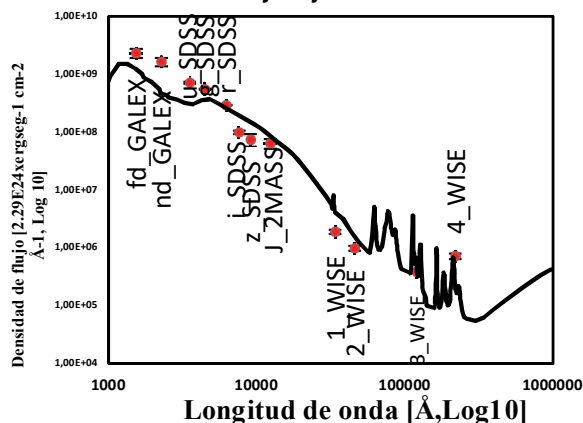


Figura 5. Gráfica de comparación entre la SED medida y la del modelo de mejor ajuste. Las longitudes de onda están en una escala logarítmica (abscisa) al igual que las densidades de flujo (ordenada). Se han calculado el error para cada densidad de flujo medida indicada por las barras correspondientes.

importante analizar la SED del modelo de mejor ajuste y compararlo con la correspondiente a los valores medidos en la fotometría, en la Figura 5 se presenta los resultados. Se observa una buena correspondencia entre las densidades de flujo medidas y la SED del modelo de mejor ajuste, sobre todo a altas longitudes de onda.

Comparación entre la SED medida y la del modelo de mejor ajuste

La dispersión aumenta para longitudes de onda menores, específicamente en 1540 Å, 2280 Å y 3540 Å del ultravioleta lejano/cercano de GALEX y el filtro *u* del SDSS respectivamente. Este resultado muestra un buen ajuste entre la SED sintética de GRASIL y la SED derivada de la fotometría con un coeficiente de correlación calculado de $R^2=0.792$, respaldando de esta

forma los parámetros descritos anteriormente. Podemos ver que la curva tiene una pendiente que asigna mayores valores de densidad de flujo a menores longitudes de onda. Esto sería consistente con la alta SFR de la galaxia, generándose así más emisiones en altas energías, generado por estrellas jóvenes.

Seguidamente pasaremos a analizar otro resultado que se desprende del modelo GRASIL de mejor ajuste como ser la historia de la tasa de formación estelar (SFRH del inglés Star Formation Rate History). En la Figura 6 se aprecia la SFRH. Se tiene un lento crecimiento de la SFR durante un periodo de unos 14 Gyr hasta una tasa actual del orden de los $0.094 M_{\odot}/\text{yr}$, a partir del valor de SFR constante de $1 \times 10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$ sugerido por Legrand *et al.* (2000), que se aprecia al inicio de la formación de la galaxia, pero recién después de unos 10 Myr de la formación de la misma.

Esta tasa va incrementándose gradualmente hasta la actualidad alcanzando el valor antes mencionado. Otro valor de referencia lo proporciona Annibali *et al.* (2013) con una tasa promedio de $1 M_{\odot}/\text{yr}$ durante los últimos 10 Myr en el cuerpo principal, esta alta tasa justificaría el color azul de la galaxia y el alto contenido de gas ionizado. Mientras tanto, generalmente una actividad muy inferior es encontrada en el cuerpo secundario o tercera componente con un promedio de $0.8 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$ también durante los últimos 10 Myr.

Estas tasas disminuyen si se considera periodos de tiempo entre 10-100 Myr a $38.9 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$ para el cuerpo principal (límite inferior). Para edades del

Historia de la tasa de formación estelar (SFRH)

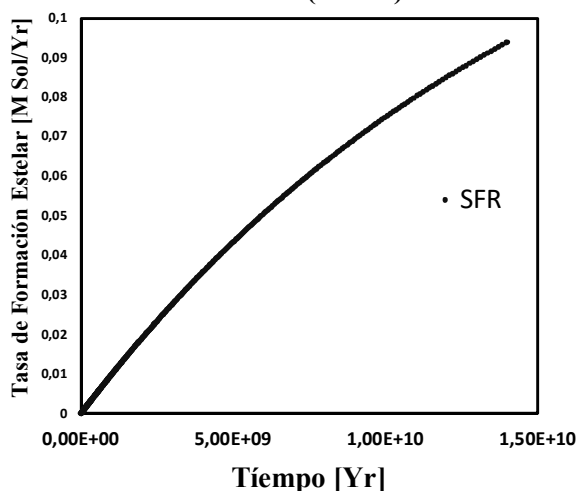


Figura 6. Gráfica de la tasa de formación estelar SFR (ordenada) contra el tiempo (abscisa).

orden de los 10 Gyr se tiene como límite inferior una tasa del orden de $1 \times 10^{-4} M_{\text{sol}}/\text{yr}$ también para el cuerpo principal.

Estos valores muestran coincidencias generales con los valores del modelo de mejor ajuste en las tasas iniciales de formación estelar y en el límite inferior para tiempos de entre 10-100 Myr.

Las discrepancias aparecen en los últimos 10 Myr y esto podría guardar relación con la forma de la realización de la fotometría en el presente trabajo, abarcando la totalidad de la galaxia en las aperturas utilizadas, mientras los valores de Annibali *et al.* (2013) se refieren a estudios realizados en regiones bien específicas de IZw18.

CONCLUSIONES

Mediante el estudio fotométrico multifrecuencia de la galaxia irregular IZw18 se ha podido obtener los valores de densidad de flujo en diferentes longitudes de onda, los cuales mostraron buen ajuste con los valores de la bibliografía. Luego se pudo ajustar estos valores a diferentes modelos sintéticos generados por el código GRASIL y seleccionar el modelo de mejor ajuste mediante una estadística bayesiana. Posteriormente el modelo seleccionado ha proporcionado una *Spectral Energy Distribution* (SED) que ha mostrado un máximo hacia longitudes de onda menores, consistente esto último con la alta eficiencia de formación de estrellas de la galaxia. La historia de la tasa de formación estelar (SFRH) muestra una formación estelar muy antigua del orden de los 14 Gyr tal como lo sugieren trabajos recientes, aunque las tasas que sugieren el modelo difieren de los valores de la bibliografía. Esto último se debería a la forma de realización de la fotometría abarcando la totalidad de la galaxia en la apertura.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y al Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), en la persona de: Jorge Iglesias Páramo, por sus valiosas aportaciones para la realización de este trabajo. A la Universidad Internacional de Valencia (VIU), por darme la oportunidad de formarme en esta rama tan hermosa de la Ciencia. A la Facultad

de Ciencias Exactas y Naturales FACEN en las personas del Prof. Tomás Rolón, Justo Lambaré y Julio Aguiar por motivarme a avanzar en el campo de la ciencia. Al Prof. Fredy Doncel por los años de trabajo y aprendizaje compartidos en el observatorio astronómico de la Facultad de Politécnica-UNA.

LITERATURA CITADA

- Aloisi, A., Clementini, G., Tosi, M., Annibali, F., Contreras, R., Fiorentino, G., Mack, J., Marconi, M., Musella, I., Saha, A., Sirianni, M. & van der Marel, R.P. (2007). IZw18 revisited with HST ACS and Cepheids: New distance and age. *The Astrophysical Journal Letters*, 667(2): L151-L154.
- Annibali, F., Cignoni, M., Tosi, M., van der Marel, R.P., Aloisi, A., Clementini, G., Contreras Ramos, R., Fiorentino, G., Marconi, M. & Musella, I. (2013). The Star Formation History of the Very metal-poor blue compact dwarf IZw18 from HST/ACS data. *The Astronomical Journal*, 146(6): 144: 13pp.
- Berry, R. & Burnell, J. (2002). *The Handbook of Astronomical Image Processing*. Primera edición. Estados Unidos de América: William-Bell, Inc. 624 pp.
- Cannon, J.M., Skillman, E.D., Garnett, D.R. & Dufour, R.J. (2002). Dust in IZw18 from Hubble Space Telescope Narrowband imaging. *The Astrophysical Journal*, 565(2): 931-940.
- Contreras Ramos, R., Annibali, F., Fiorentino, G., Tosi, M., Aloisi, A., Clementini, G., Marconi, M., Musella, I., Saha, A. & van der Marel, R.P. (2011). Spatial Distribution of the Stellar Distribution and Candidate Star Cluster in the Blue Compact Dwarf IZwicky 18. *The Astrophysical Journal*, 739(2): 74: 12pp.
- Gal, R. & Jester, S. (2004). *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)*. Disponible en <http://classic.sdss.org/dr3/algorithms/fluxcal.html>. [Consultado: 15 de agosto del 2015].
- Gil, S. & Rodríguez, E. (2001). *Física re-Creativa: Experimentos de Física Usando Nuevas Tecnologías*. Primera edición. Buenos Aires: Prentice Hall. 355 pp.

- Gutierrez, A. & Moreno, H. (1980). *Astrofísica General*. Primera edición. Santiago: Editorial Universitaria. 664 pp.
- Hunter, D.A. & Thronson, H.A. (1995). The massive star of IZw18 as seen in Hubble Space Telescope Images, *The Astrophysical Journal*, 452: 238-252.
- Kunth, D. & Sargent W.L.W. (1986). IZw18 and the existence of very poor metal blue compact dwarf galaxies. *The Astrophysical Journal*, 300: 496-499.
- Legrand, F. (2000). On the star formation history of IZw18. *Astronomy and Astrophysics*, 354: 504-512.
- National Optical Astronomy Observatory (2015). *Image Reduction and Analysis Facility (IRAF)*. Disponible en: <http://iraf.noao.edu/>. [Consultado: 12 de agosto del 2015].
- Neff, S. & Myers, J.D. (2012). *Galaxy Evolution Explorer (GALEX)*. Disponible en <http://galexgi.gsfc.nasa.gov/docs/galex/FAQ/>. [Consultado: 12 agosto del 2015].
- Santini, P. (2014). *Spectral Energy Distribution of galaxies*. Lectures, 2013-2014.
- Silva, L. (2009). Multi-Wavelength modelling of dusty galaxies. GRASIL and applications. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de conferencias)*, 37: 83-93
- Silva, L., Granato, G.L., Bressan, A. & Danese, L. (1998). Modeling the effect of the dust on Galactic Spectral Energy Distributions from the Ultraviolet to the Millimeter Band. *The Astrophysical Journal*, 509(1): 103-117.
- Skrutskie, M.F., Cutri, R., Green, B. & Stiening, R. (2006). *The Two Micron All Sky Survey at IPAC (2MASS)*. Disponible en <http://www.ipac.caltech.edu/2mass/releases/>. [Consultado: 12 de agosto del 2015].
- Vilchez, J.M. & Iglesias Páramo, J. (1998). Bi-dimensional Spectroscopic Mapping and Chemical Abundances of the Star-forming Dwarf Galaxy IZw18. *The Astrophysical Journal*, 508(1): 248-261.
- California Institute of Technology (2015). Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE). Disponible en <http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/> [Consultado: 14 de agosto del 2015].