

Formacion Estelar

Abstract

La Formacion estelar es un parametro clave de la evolucion e historia de las galaxias. Para poder estudiarla es necesario acudir a los indicadores de formacion estelar, los cuales son parametros que guardan relacion con la presencia o no de actividad de formacion estelar. En el presente trabajo se estudian las relaciones Masa-Metalicidad, Masa-sSFR y Masa- $D_n(4000)$ para tratar de caracterizar que disen estas relaciones sobre la formacion estelar. Se encuentra que hay una relacion creciente entre metalicidad y masa, la relacion Masa-sSFR indica por otro lado que la Formacion estelar decae hacia galaxias mas masivas. Finalmente la relacion Masa- $D_n(4000)$ muestra un incremento del indice $D_n(4000)$ con la masa.

1 Introducci3n

1.1 Espectros galacticos

Tanto la formacion estelar, como los indicadores asociados a la misma estan asociados con los espectros obtenidos de las galaxias. El espectro de las galaxias esta formado por los miles de estrellas que conforman las galaxias mas las nubes moleculares y las regiones de formacion estelar[6].

Los espectros permiten determinar:

- Velocidades relativas de las galaxias.
- Tasa de Formacion Estelar (SF-*Star Formation*).
- El promedio de edad de la poblacion estelar.

Los espectros de las galaxias a su vez tienen asociados tres aspectos:

- El continuo: Es la combinacion de varios espectros de cuerpo negro a lo largo de un rango de temperaturas. La combinacion de estas produce un espectro plano. Su mayor caracteristica es el break de los 4000 Å Armstrong[6].
- Lineas de absorcion: Los atomos y moleculas en una estrella absorben la luz con longitudes de onda especificas. Por otro lado, el gas frio interestelar absorbe longitudes de onda especificas, este fenomeno de absorcion se denomina *Extinción*[6].
- Lineas de emision: Las estrellas masivas jovenes recién nacidas estan sumergidas en gas. Estas, calientan el gas (lo ionizan) provocando que el gas emita en longitudes de onda especifica. Esto genera las regiones HII correspondientes al Hidrogeno ionizado que es un indicador clave de formacion estelar.

1.1.1 Break 4000 Å - Indice $D_n(4000)$

El break de los 4000 Å, es la discontinuidad mas fuerte en el espectro optico de una galaxia y aparece por la acumulacion de un gran numero de lineas espectrales en un rango pequena de longitudes

de onda, cercano al valor de los 4000Å[4]. Este fenomeno es causado por:

- Absorcion, por parte de los metales en las atmosferas estelares, de la radiacion de alta energia.
- Ausencia de estrellas azules calientes.

El Breaking de los 4000 Å sera chico para poblaciones de estrellas jovenes y en cambio sera mucho mayor para poblaciones viejas ricas en metales[6].

El indice de break $D(4000)$ fue definido por Bruzual (1983)[3] como el cociente entre el flujo promedio de densidad F_ν en las bandas 4050-4250 y 3750-3950 Å.

Una definicion utilizando bandas mas estrechas (3850-3950 y 4000-4100 Å) Fue introducida recientemente por Balogh[2]. La ventaja principal de una definicion mas estrecha es que el indice es considerablemente menos sensible que los efectos de enrojecimiento.

$$D(4000) = \frac{(\lambda_2^- - \lambda_1^-) \int_{\lambda_1^+}^{\lambda_2^+} F_\nu d\lambda}{(\lambda_2^+ - \lambda_1^+) \int_{\lambda_1^-}^{\lambda_2^-} F_\nu d\lambda} \quad (1)$$

Donde inicialmente para Bruzual[3]: $(\lambda_1^-, \lambda_2^-, \lambda_1^+, \lambda_2^+) = (3750, 3950, 4050, 4250)$.

Mientras que para la definicion de Balogh[2]: $(\lambda_1^-, \lambda_2^-, \lambda_1^+, \lambda_2^+) = (3850, 3950, 4000, 4100)$.

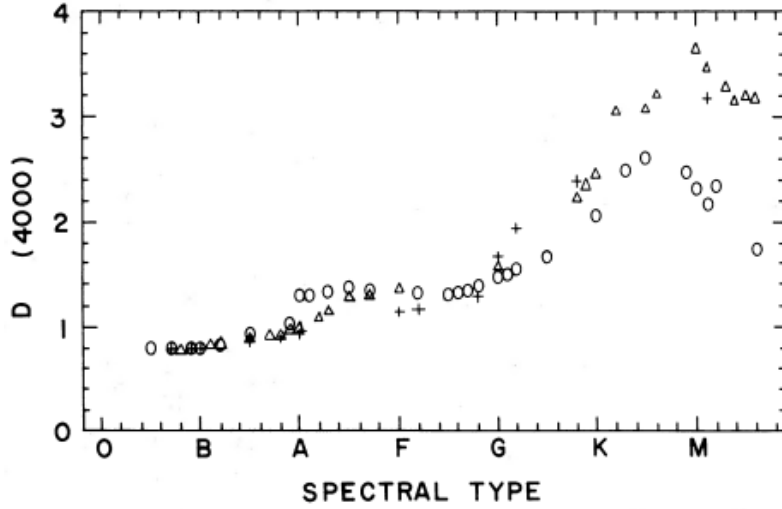


Figure 1. Variacion del indice $D(4000)$ para los distintos tipos de estrellas del sistema de clasificacion de Harvard. Puede verse como el indice aumenta a medida que las estrellas son mas viejas y ricas en metales. Los circulos representan estrellas en la secuencia principal, gigantes en triangulos y supergigantes con las cruces. Credits: Bruzual 1983 [3]

1.2 Formacion Estelar

Las cantidades cuantitativas que nos permiten describir la formacion se denominan:

- SFR (Star Formation Rate): Masa total de estrellas formada por unidad de tiempo (M_\odot/Yr). No todas las galaxias tienen el mismo SFR.

- sSFR (Specific Star Formation Rate): SFR por unidad de Masa. (Masa de estrellas formadas / Masa total de la galaxia por unidad de tiempo [1/Yr]). Dadas dos galaxias, con la misma SFR, Entonces la galaxia menos masiva tiene una SSFR mayor. Mide el esfuerzo de una galaxia para formar nuevas estrellas.
- IMF (Initial Mass Function): Distribucion inicial de masas para una poblacion de estrellas, en la region de formacion estelar. Se considera universal e independiente del entorno.

1.2.1 Indicadores de Formacion estelar

Las lineas de emision son caracteristicas de las regiones HII, zonas de gas ionizado alrededor de cúmulos estelares jóvenes que aún contienen estrellas OB. Estas estrellas son especiales porque son lo suficientemente calientes como para producir flujos significativos de radiación ionizante. Las regiones HII pueden encontrarse en su totalidad mediante imágenes en banda estrecha en $H\alpha$ si la extinción interna no es demasiado grande, y también mediante estudios de radio para la emisión de líneas de recombinación.

- $H\alpha$: Proviene del gas ionizado en las regiones HII. Entre mas vieja es la poblacion estelar, menores lineas de emision $H\alpha$ habra. Es la linea de emision mas importante del continuo.
- [OII] : La linea prohibida [OII] proviene de la des-excitacion por colision del gas. Despues de $H\alpha$ es la linea mas prominente y tiene la ventaja de que puede verse a alto redshift: $z \approx 1.4$, mientras que en contraste $H\alpha$ solo puede verse hasta $z \approx 0.4$.
- nUV : Espectro cercano(near) al ultravioleta. Esta asociado a las estrellas jovenes masivas como las O,B. Estas suelen emitir en estas longitudes de onda ionizando la nube de gas circundante formando las regiones de HII. El flujo en UV puede estar asociado a actividad de formacion estelar.

1.2.2 Masa

La masa es un parámetro que correlaciona con parámetros clave como la luminosidad, tamaño y color. Las galaxias más masivas tienden a ser más rojas y luminosas, indicando una población estelar más vieja y evolucionada y con una menor tasa de formación estelar reciente.

En [4] se encuentra que las galaxias exhiben una variedad de historias de formación estelar en dependencia de su masa estelar. Las galaxias más masivas tienen una tendencia a haber experimentado su pico de formación estelar en el universo temprano y presentan poca o nula actividad de formación estelar actual. En contraste galaxias con menor masa exhiben tener una actividad de formación estelar más reciente.

En cuanto a la morfología por ejemplo, se observa que esta impacta fuertemente en la formación estelar. Las galaxias elípticas, que suelen ser mas masivas, muestran actividad de formación estelar en el pasado, con un cese de la mayoría de la actividad en el presente. Las galaxias espirales, en cambio, tienden a sostener actividad de formación estelar a lo largo de periodos largos.

1.2.3 Relacion Masa Metalicidad

Las galaxias pueden caracterizarse por su metalicidad promedio. Esta representa la cantidad de gas que ha sido re procesado por las estrellas y que posteriormente se ha intercambiado con su entorno.

Pueden distinguirse dos tipos de metalicidad en las galaxias[6]:

- Metalicidad promedio de las estrellas.
- Metalicidad promedio del gas.

Dependiendo de la historia de formacion estelar en la galaxia y dependiendo de el flujo entrante y saliente, estas metalicidades pueden ser muy distintas.

La metalicidad del gas puede ser medida de las lineas espectrales de la galaxia, mientras que la metalicidad de las estrellas puede ser obtenida de las lineas de absorcion en las atmosferas de las estrellas.

En [7] utiliza datos de más de 53,000 galaxias con formación estelar en el Sloan Digital Sky Survey (SDSS) para explorar la relación masa-metalicidad, una correlación fundamental entre la masa estelar de la galaxia y la metalicidad de la fase gaseosa. El estudio de los datos obtenidos con el SDSS arroja que las galaxias más masivas exhiben una mayor metalicidad, mientras que las galaxias de baja masa suelen ser más pobres en metales.

El estudio se basa en el *Stellar Yield*, termino que hace referencia a los elementos producidos por estrellas y que se retornan al medio interestelar tras la muerte de la estrella. Este proceso enriquece el medio interestelar con elementos mas pesados, metales.

En las galaxias de baja masa, es probable que los fuertes vientos galácticos de las explosiones de supernova expulsan gas rico en metales del medio interestelar, reduciendo su metalicidad. En cambio, las galaxias de alta masa retienen más de sus metales debido a su mayor potencial gravitacional.

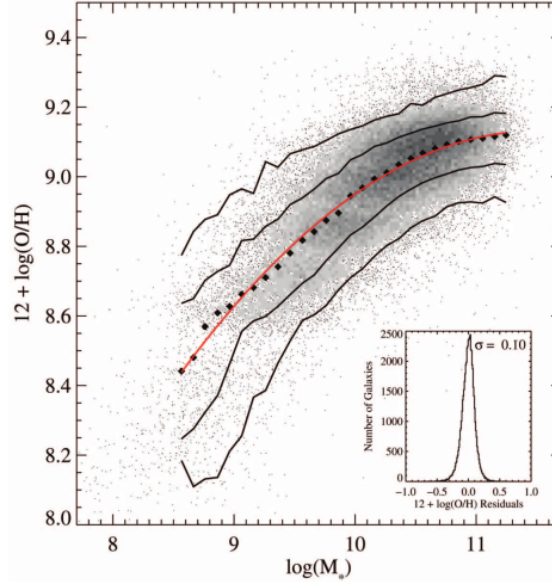


Figure 2. Relacion de abundancia de Oxigeno gaseoso vs la masa estelar para galaxias del SDSS. La abundancia de oxigeno se expresa como: $12 + \log[\text{O}/\text{H}]$ donde O/H es la abundancia por numero de oxigeno relativo al hidrogeno. La figura revela un flatening arriba de las $10^{10} M_{\odot}$. Mientras que es bastante inclinada entre $10^{8.5}$, $10^{10.5}$. Credits Tremonti 2004 [7].

2 Datos

Se trabajan con dos sets de datos, una muestra constituyente de galaxias de campos y otra muestra

que contiene grupos de galaxias. Los datos para la muestra de campo son obtenidos del catalogo MPA-JHU[1]. Esta muestra tiene las siguientes propiedades resumidas en la Tabla 1:

Propiedad	Nombre en el catalogo	Descripcion	Unidad
α	ra	Ascencion recta	Arcsec
δ	dec	Declinacion	Arcsec
z	z	Redshift	
M_r	Mr	Magnitud Absoluta banda r	
$u - r$	ur	Magnitud $u - r$	
r_{50}	r50	Radio Brillo 50%	Arcsec
c	c	Indice de Concentracion	
smass	smass	Masas estelares	M_{\odot}
SFR	sfr	Star Formation Rate	M_{\odot}/Yr
sSFR	ssfr	Specific SFR	1/Yr
$D_n(4000)$	d4000	Break 4000A Balogh et al (1999)	
$12 + \log[\text{O}/\text{H}]$	met	Abundancia de Oxigeno Gaseoso	
$1/V_{\text{max}}$	w	Parametro de peso V_{max}	
pe	pe	Probabilidad eliptica Galaxy Zoo	
ps	ps	Probabilidad espiral Galaxy Zoo	
$m_{\text{NUV}} - m_r$	nuvr	Near UV $- r$	

Table 1. Propiedades del catalogo de galaxias de campo. Las galaxias de grupo tienen propiedades similares excepto que no tienen el indice de abundancia de Oxigeno Gaseoso.

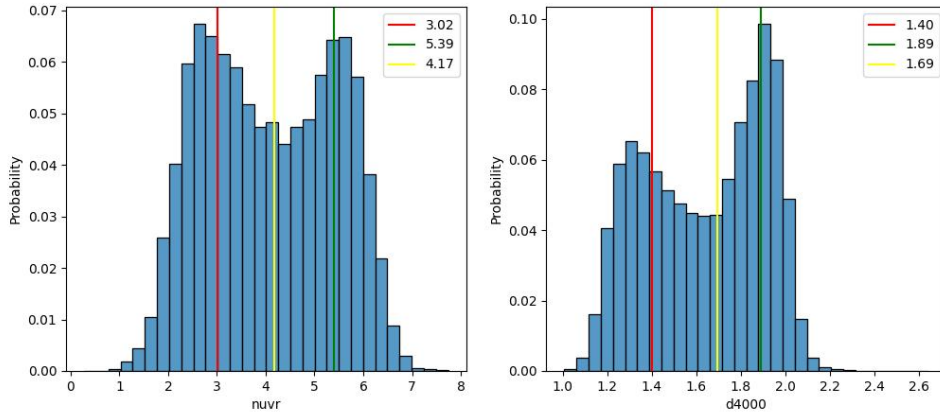


Figure 3. Distribuciones Normalizadas de Near UV-r y $D_n(4000)$ para la muestra de grupos. La distribucion revela la presencia de dos poblaciones. Los valores medios de estos(rojo y verde) asi como un estimado de las lineas divisorias se obtuvieron del ajuste de una doble gaussiana en las distribuciones.

3 Resultados

3.1 Masa vs Metalicidad

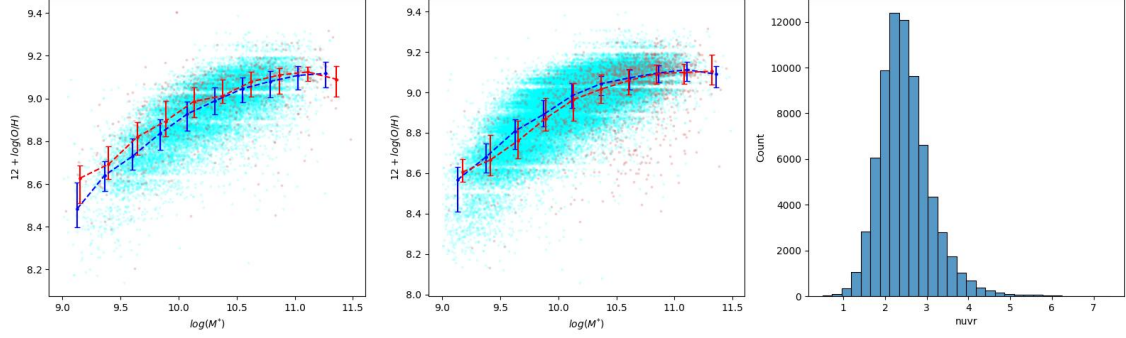


Figure 4. Masa vs Metalicidad para la muestra de galaxias de campo. De izquierda a derecha: i) Muestra separada en base a la clasificacion de galaxias del Galaxy Zoo[5]. En aguamarina las galaxias Espirales, y en Marron las galaxias Elípticas. ii) Muestra separada en base al indice de concentracion. En aguamarina galaxias con $C < 2.5$ y en Marron galaxias con $C > 3.0$. iii) Distribucion de indice UV. No se ve existencia de dos poblaciones para realizar una separacion. Los puntos y los errores corresponden a la mediana de la distribucion de puntos considerando 10 bines.

3.2 Relacion Masa - sSFR

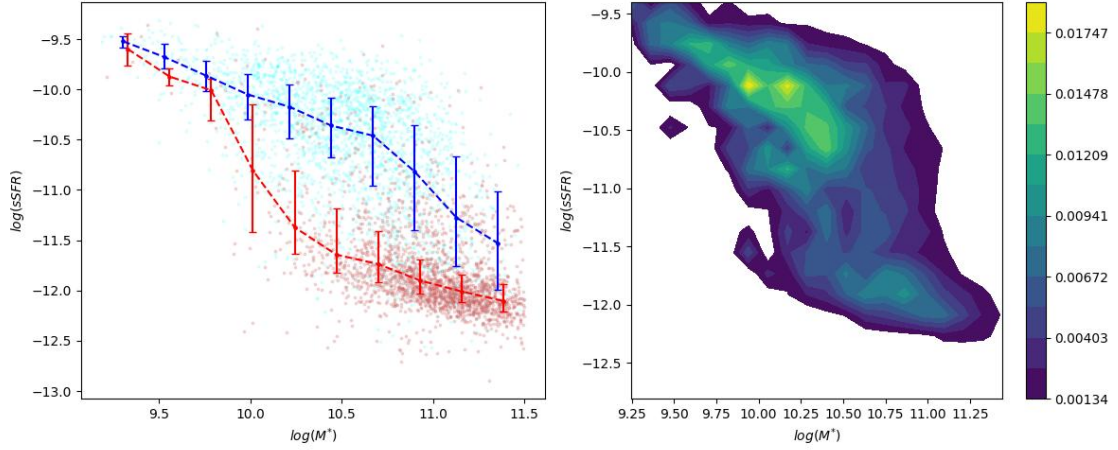


Figure 5. Relacion Masa-sSFR. Izquierda: galaxias de grupo, separadas segun la clasificacion del Galaxy Zoo[5]. Derecha: contornos, separados con el mismo sistema.

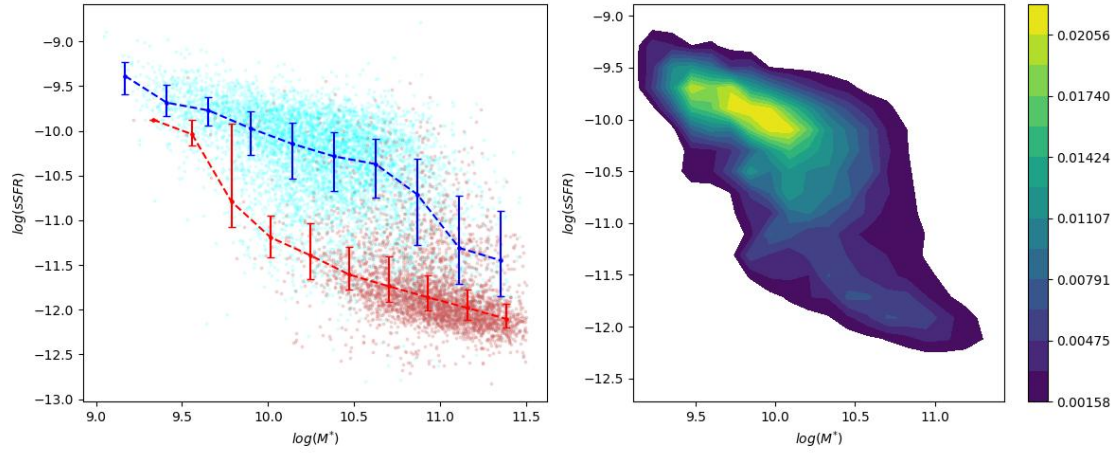


Figure 6. Relacion Masa-sSFR. Izquierda: galaxias de grupo, separadas segun indice de concentracion aguamarina: $C < 2.5$, marron: $C > 3.0$. Derecha: contornos, separados con el mismo sistema.

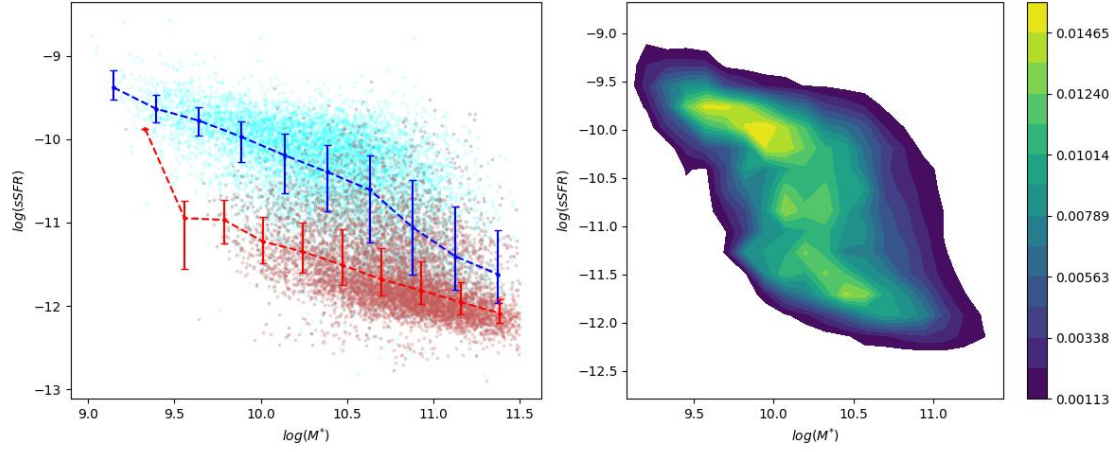


Figure 7. Relacion Masa-sSFR. Izquierda: galaxias de grupo, separadas segun la magnitud $n \text{ UV} - r$ aguamarina: $n \text{ UV} - r < 3.5$, marron: $n \text{ UV} - r > 4.5$. Derecha: contornos, separados con el mismo sistema.

3.3 Relacion Masa - Indice $D_n(4000)$

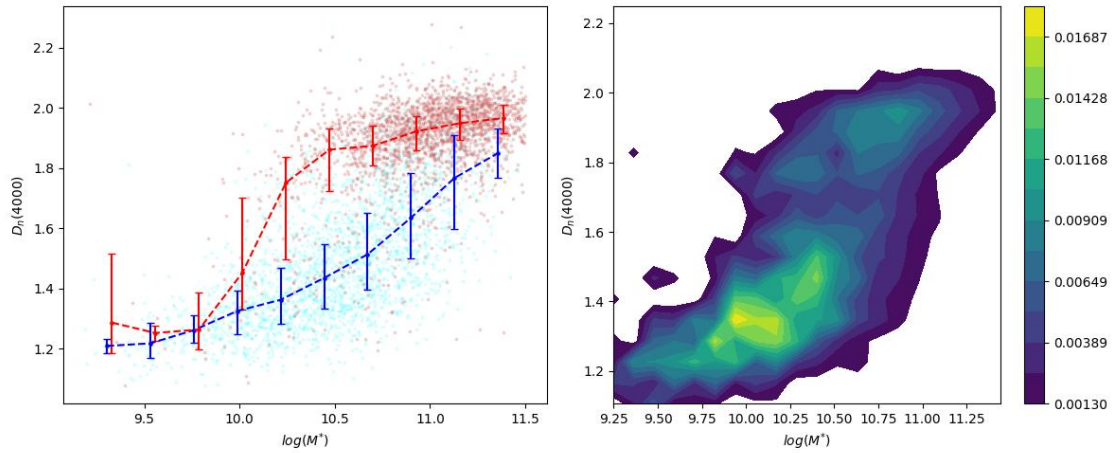


Figure 8. Relacion Masa-Indice $D_n(4000)$. Izquierda: galaxias de grupo, separadas segun la clasificacion del Galaxy Zoo[5]. Derecha: contornos, separados con el mismo sistema.

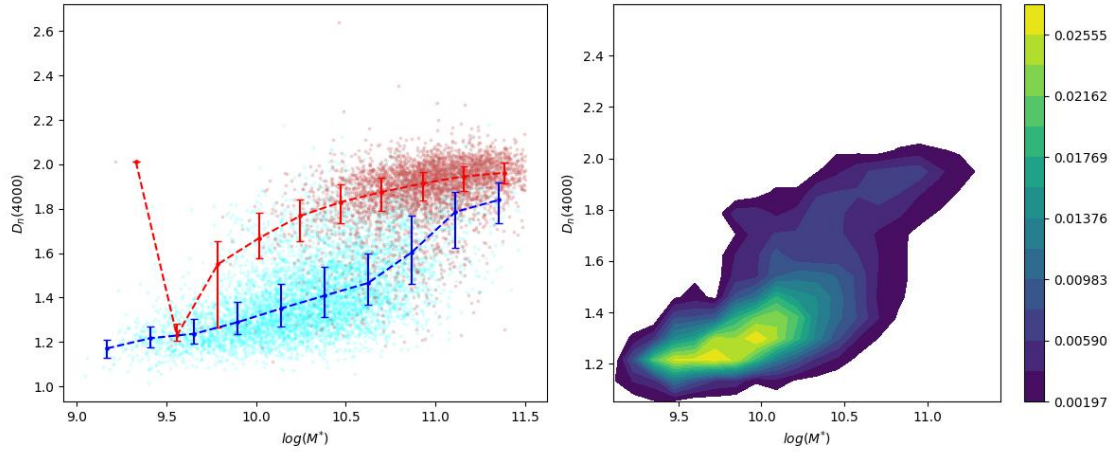


Figure 9. Relacion Masa-Indice $D_n(4000)$. Izquierda: galaxias de grupo, separadas segun indice de concentracion aguamarina: $C < 2.5$, marron: $C > 3.0$. Derecha: contornos, separados con el mismo sistema.

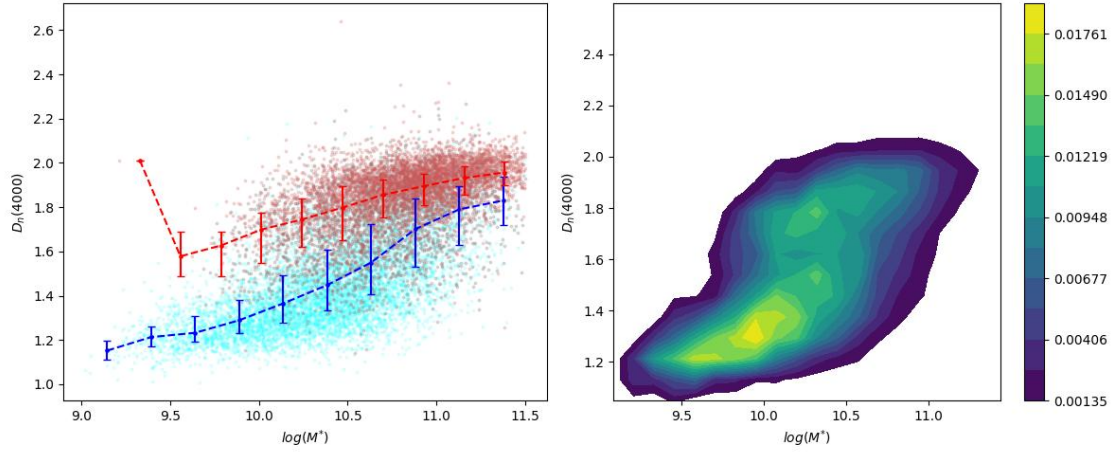


Figure 10. Relacion Masa-Indice $D_n(4000)$. Izquierda: galaxias de grupo, separadas segun la magnitud $n \text{ UV} - r$ aguamarina: $n \text{ UV} - r < 4.0$, marron: $n \text{ UV} - r > 5.0$. Derecha: contornos, separados con el mismo sistema.

4 Analisis y conclusiones

4.1 Relacion Masa - Metalicidad

Se analizaron dos tipos de poblaciones para un conjunto de datos del SDSS. La primera poblacion consta de galaxias de campo y la segunda consta de una distribucion con grupos. La Figura 4 muestra la relacion existente entre la masa y la metalicidad, medida como abundancia de oxigeno gaseoso. La tendencia que se observa, similar a la Figura 2, es que hay un incremento de la metalicidad con la masa. Si se separa la muestra en galaxias elipticas y espirales (Teniendo en cuenta que hay una predominancia de galaxias de campo-espirales) obtendremos que esta tendencia se mantiene. Para una dada masa, segun la clasificacion del Galaxy Zoo[5] (Primer panel Figura 4), tendremos una mayor metalicidad asociada a las galaxias elipticas. Si se separa en cambio las galaxias segun el indice de concentracion se muestra una tendencia invertida (Segundo panel de la Figura 4), sin embargo esta tendencia cambia, aproximadamente para una masa de $10^{11} M_{\odot}$, que coincide con el aumento de abundancia de galaxias elipticas, por lo cual es probable que la primera parte de esta tendencia se deba a la esasez de galaxias elipticas.

Un estudio similar para grupos de galaxias seria interesante de hacer, sin embargo para estas no se dispone de la metalicidad como abundancia de oxígeno gaseoso.

4.2 Relacion Masa - sSFR

Este estudio se realiza utilizando la muestra de grupos de galaxias, debido a que la muestra de campo, esta muy sesgada hacia un tipo particular de galaxia y no permite una distinción muy clara de los parámetros $nUV - R$ y C .

La Figura 5, panel izquierdo, muestra la relación Masa-sSFR, segregando en galaxias elípticas y espirales de acuerdo al sistema de clasificación del proyecto Galaxy Zoo[5]. Para una misma masa, puede verse que el índice sSFR es mayor para las galaxias espirales. El panel derecho es un diagrama de contornos que muestra como es la distribución de la muestra en el espacio Masa vs sSFR. La muestra contiene una gran cantidad de galaxias de baja masa. Estas justamente son las galaxias con mayor formación estelar, por lo cual los tres paneles derechos de las Figuras 5,6,7 muestran un pico en la región de menor masa y mayor sSFR.

La Figura 6, panel izquierdo nos muestra la misma relación, pero en este caso separando por índice de concentración C . Nuevamente se ven dos poblaciones, bien marcadas, donde nuevamente, para una dada masa hay un mayor sSFR asociado a galaxias espirales. El panel derecho muestra una concentración alta de galaxias con valores $\log(sSFR) \in [-10.2, -9.5]$ y $\log(M) \in [9.7, 10]$.

La Figura 7 muestra, nuevamente, la misma relación, pero esta vez separando por el índice $nUV - r$. Como puede verse en la Figura 3 (Panel Izquierdo), esta magnitud también sirve para separar la población galáctica en 2 componentes. Nuevamente queda claro que sSFR es superior para galaxias espirales.

En todas las figuras en general puede verse un decaimiento de la sSFR con el aumento de masa (Para todos los tipos de galaxias).

4.3 Relacion Masa - Indice $D_n(4000)$

Las Figuras 8,9,10 muestran el espacio $\log(M), D_n(4000)$ separando las galaxias en espirales y elípticas según: (Zoo, C , $nUV - r$).

En todos los paneles izquierdos vemos la misma tendencia, esperable, de que el índice $D_n(4000)$ sea mayor para galaxias elípticas, para todos los tipos de separaciones estudiadas. Los paneles derechos en cambio revelan lo mismo que la sección 4.2 en cuanto a la masa: Hay una mayor cantidad de galaxias de baja masa. Debido a que los picos de densidad en el espacio $\log(M), D_n(4000)$ están en la parte menor Masa menor índice $D_n(4000)$ se concluye que la muestra esta compuesta mayormente de galaxias con estas características.

En todas las figuras puede verse en general un aumento del índice $D_n(4000)$ con el aumento de masa (Para todos los tipos de galaxias).

5 Conclusiones

- Los paneles de la Figura 4 muestran claramente que hay una anti-correlación de masa y metalicidad en las galaxias. Aunque se realizan distintas separaciones que dan lugar a distintas relaciones masa-metalicidad para los distintos tipos de galaxias, tiene más sentido que en general las galaxias más masivas sean más metálicas, por poseer una población de estrellas viejas ricas en metales.
- En las Figuras 5,6,7 muestran la relación Masa-sSFR. Puede verse claramente, en los paneles izquierdos, que son las galaxias menos masivas y en general de tipo S las que tienen mayor sSFR. Por otro lado, los paneles derechos de dichas figuras, muestran que la muestra esta compuesta por una gran cantidad de estas galaxias. Finalmente, y principalmente, puede verse claramente que para ambos tipos de galaxias, hay un decaimiento de la formación estelar al aumentar la masa.

- En las Figuras 8,9,10 puede verse que, paneles izquierdos, las galaxias mas masivas y de tipo E son las que tienen mayor $D_n(4000)$, en cambio las galaxias menos masivas de tipo S, tienen en general un menor valor para este indice. Los paneles derechos de las figuras muestran que la distribucion de las galaxias esta orientada a las galaxias menos masivas con bajo indice $D_n(4000)$. Puede verse en general una tendencia al aumento del indice $D_n(4000)$ al aumentar la masa, lo cual tiene sentido con los resultados obtenidos en las figuras 5,6 y 7 y la naturaleza del indice $D_n(4000)$. Se puede inferir en ultima instancia entonces que el aumento de este indice estara asociado a un decaimiento del sSFR.

Bibliography

- [1] Kevork N Abazajian, Jennifer K Adelman-McCarthy, Marcel A Agüeros, Sahar S Allam, Carlos Allende Prieto, Deokkeun An, Kurt SJ Anderson, Scott F Anderson, James Annis, Neta A Bahcall et al. The seventh data release of the sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 182(2):543, 2009.
- [2] Mike L Balogh, David Schade, Simon L Morris, Howard KC Yee, Ray G Carlberg, and Erica Ellingson. The dependence of cluster galaxy star formation rates on the global environment. *The Astrophysical Journal*, 504(2):0, 1998.
- [3] A Bruzual et al. Spectral evolution of galaxies. i-early-type systems. *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 273, Oct. 1, 1983, p. 105-127. Research supported by the University of California, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, and Centro de Investigaciones de Astronomía., 273:105–127, 1983.
- [4] Guinevere Kauffmann, Timothy M Heckman, Simon DM White, Stéphane Charlot, Christy Tremonti, Jarle Brinchmann, Gustavo Bruzual, Eric W Peng, Mark Seibert, Mariangela Bernardi et al. Stellar masses and star formation histories for 105 galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341(1):33–53, 2003.
- [5] Chris J Lintott, Kevin Schawinski, Anže Slosar, Kate Land, Steven Bamford, Daniel Thomas, M Jordan Raddick, Robert C Nichol, Alex Szalay, Dan Andreescu et al. Galaxy zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the sloan digital sky survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 389(3):1179–1189, 2008.
- [6] Houjun Mo, Frank Van den Bosch, and Simon White. *Galaxy formation and evolution*. Cambridge University Press, 2010.
- [7] Christy A Tremonti, Timothy M Heckman, Guinevere Kauffmann, Jarle Brinchmann, Stéphane Charlot, Simon DM White, Mark Seibert, Eric W Peng, David J Schlegel, Alan Uomoto et al. The origin of the mass-metallicity relation: insights from 53,000 star-forming galaxies in the sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal*, 613(2):898, 2004.