

# Síntesis de Poblaciones Estelares con FSPS: SSP y CSP

Vicente Cáceres Maldonado<sup>1</sup> & Vicente Honorato Rodríguez<sup>1</sup>

Departamento de Física, Universidad Técnica Federico Santa María, Av. Vicuña Mackenna 3939, Santiago, Chile.<sup>1</sup>

Received May 29, 2024

## ABSTRACT

Utilizando el paquete “Flexible Stellar Population Synthesis” se modelan poblaciones estelares simples y compuestas, para analizar espectros de galaxias según su función de masa inicial y las librerías espetrales, además de modelos de polvos y su historia de formación estelar. Para una población estelar simple se observa la evolución de su espectro en el tiempo y se tiene que a mayor edad (tiempo del universo  $\approx 13.7$  Gyr) se asemeja más a una galaxia elíptica. Al considerar distintas metalicidades y distintas funciones de masa inicial, se tiene un cambio en los espectros. Para una población estelar compuesta se divide en: **galaxia espiral** donde al considerar la historia de formación estelar y el polvo se observa una absorción a longitudes de ondas pequeñas y reemisión en longitudes mayores, **galaxia starburst** que muestra de manera similar, aún más absorción en UV y mayor reemisión en IR, dado que se considera una galaxia con alta formación estelar (tienden a tener más polvo) y con dos tipos de polvos distintos, uno correspondiente a las *molecular clouds* y otro al medio interestelar (Charlot & Fall, 2000) [4], **galaxia elíptica** cuyos espectros son similares a los de una SSP a tiempos antiguos, solo que este fue resultado de considerar un e-folding time ( $\tau$ ) corto y un tiempo donde inició la formación estelar cercano a la edad de la misma galaxia, para decir que tuvo un *burst* temprano y corto, típico de una galaxia *early-type*. Finalmente, se modela el espectro de nuestra galaxia vecina *Andromeda* según datos observacionales en el rango óptico, dados por (P. Lira, 2007) [9], donde se observa la misma forma del espectro al considerar los parámetros de una galaxia espiral en *FSPS*, pero desplazado (en el eje del flujo), donde al multiplicar por un factor de  $2.3 \cdot 10^{26}$ , se pueden observar en la misma escala.

**Key words.** Espectros – Poblaciones Estelares Compuestas (CSP): Dust, Star Formation History, Burst – Poblaciones Estelares Simples (SSP): Librerías Espectrales, Función de Masa Inicial.

## 1. Introducción

Para modelar el espectro de una estrella, bastaría con ver los valores tabulados según su tipo (Posición en el diagrama H-R), sin embargo para una galaxia no es posible sólo con estas características. Esto se debe principalmente a que las galaxias se componen a partir de distintos tipos de estrellas, según sus poblaciones estelares.

La síntesis de poblaciones estelares es un herramienta utilizada para modelar espectros de galaxias de manera realista, según su tipo, considerando parámetros físicos que contribuyen a distintas componentes de los espectros. Como aproximación, podrían entenderse los espectros de galaxias como una suma de los espectros que contribuye cada estrella (también polvo y gas, según sea el caso), por lo que se consideran parámetros y funciones claves en esta obtención de espectros. En primer lugar, están las poblaciones estelares simples (*Simple Stellar Populations*, SSPs) las cuales se utilizan para la obtención de los espectros según librerías estelares que contienen la información tabulada sobre los espectros (según tipos de estrellas), pesados por una función de masa inicial que indican la fracción de estrellas de cierta masa, integrando desde una masa mínima, hasta una máxima. En segundo lugar, se tienen las poblaciones estelares compuestas (*Composite Stellar Populations* CSPs), las cuales dependen de las SSPs e incluyen más factores para considerar otras componentes de los distintos tipos de galaxias, tal como la historia de formación estelar y el polvo, donde cada uno está descrito por diversos modelos. Estos espectros, según el tipo de población estelar, se obtienen mediante Eq. 1 y Eq. 2,

respectivamente.

$$S_{\lambda,Z}^{SSP}(t) = \int_{m_L}^{m_U} dm_i \phi(m_i) f_{\lambda,Z}[L(m_i|Z,t), T_{eff}(m_i|Z,t)] \quad (1)$$

$$L_{\lambda,Z}(t) = \int_0^t dt' \Psi(t-t') S_{\lambda,Z(t-t')}^{SSP}(t') e^{-\hat{\tau}_\lambda(t')} \quad (2)$$

Donde  $\phi(m_i)$ ,  $f_{\lambda,Z}$ ,  $\Psi(t-t')$ ,  $\hat{\tau}_\lambda$  corresponden a la función de masa inicial, según las masas dentro del rango de integración, a las librerías estelares que contienen los espectros de estrellas, a la historia de formación estelar dependiente del tiempo y a la extinción por polvo, asociada a la profundidad óptica, respectivamente.

En la Sección 2 se hablará sobre la librería *FSPS*, comentando los principales parámetros y modelos que se consideraron para el análisis espectral de los distintos tipos de galaxias. En la Sección 3 se mostrarán las diferencias entre las distintas funciones de masa inicial para el espectro obtenido, a partir de una SSP, para una galaxia vieja, con una metalicidad cercana a la del vecindario solar. Además se verá como cambian estos espectros para una IMF de Salpeter, para la misma edad de la galaxia, según distintas metalicidades. Por otra parte, se mostrará como cambia el espectro de esta galaxia (con la metalicidad del vecindario solar y con la IMF de Salpeter), en distintos tiempos. En la Sección 4 se verá cómo cambian los espectros modelados para galaxias espirales, starburst y elípticas, tomando valores típicos de los parámetros para cada una (e.g. SFH, Polvo). Por último, en

la Sección 5 se modelará el espectro, con *FSPS*, de una galaxia espiral, tomando valores propios de Andrómeda, para compararlo con datos observacionales del (telescopio WHT 4.2m) [1] en el rango óptico y luego extrapolarlo.

## 2. FSPS

Flexible Stellar Population (*FSPS*) es una librería creada por (Conroy, 2010) [5], que nos permite modelar poblaciones estelares simples y compuestas. Esta versátil herramienta facilita el modelamiento de la evolución temporal de poblaciones estelares, recreando espectros teóricos de galaxias bajo diferentes contextos físicos que podemos ajustar al variar parámetros disponibles en *FSPS*. Dentro de los parámetros más importantes, encontramos:

1. La función de masa inicial (IMF): Corresponde a la fracción de estrellas que se podrían formar con cierta masa, con respecto a una población estelar en un volumen. Los cinco modelos de IMF disponibles a implementar en *FSPS*, son:

- Salpeter (Salpeter, 1955) [10]
  - Chabrier (Chabrier, 2003) [3]
  - Kroupa (Kroupa, 2001) [8]
  - van Dokkum (van Dokkum, 2008) [11]
  - Dave (Dave, 2008) [6]
2. La historia de formación estelar (SFH): Describe un modelo en el que una galaxia forma estrellas a lo largo del tiempo. Al estudiar la SFH, se puede analizar como cambian los espectros de galaxias para diferentes tiempos, pudiendo tomar distintos casos, como por ejemplo una intensa formación estelar en una etapa inicial, o estudiando una formación estelar continua en el tiempo. Encontrando en *FSPS* dos principales modelos a utilizar.

El primero es  $\tau$ -model, en este modelo estaremos considerando que la tasa de formación estelar decae exponencialmente. Este modelo es utilizado con 6 parámetros, de los cuales destacamos la importancia de 4, los cuales son  $\tau$ ,  $const$ ,  $sf\_start$  y  $tburst$ .

- $\tau$ , determina la rapidez con la que formación estelar va a decaer, en donde para un valor pequeño de  $\tau$  nos dirá que la formación estelar será corta, mientras que un valor de  $\tau$  grande, nos dice que la formación estelar se extiende durante mas tiempo, decayendo mas lentamente.
- $const$ , se define como la fracción de masa que se forma constantemente en el tiempo.
- $sf\_start$ , nos servirá para definir el inicio (temporal) de la formación estelar en la galaxia.
- $tburst$ , nos permitirá añadir una intensa formación estelar en algún tiempo para la edad del universo

El segundo es el *Delayed*  $\tau$ -model, el cual cumple la misma función de describir la SFH, pero considera otra forma de decaimiento, cuya expresión se escribe como  $te^{-t/\tau}$ .

3. El modelo de atenuación por polvo: Este cumple un rol importante en la absorción y reemisión de luz en las galaxias (sobre todo en espirales y starburst), por lo tanto el incluir un modelo de atenuación para el polvo nos ayudará a analizar adecuadamente el espectro de una galaxia. Algunos de los modelos de atenuación que podemos considerar son:

- Modelo de Calzetti (Calzetti et al., 2000) [2]
- Modelo de Kriek & Conroy (Kriek & Conroy, 2013) [7]

Estos dos modelos también son empleados con los parámetros *dust1* y *dust2*. La variable *dust1* es usada para describir la atenuación de la luz de estrellas mas jóvenes, mientras que *dust2* es para describir la atenuación de la luz de estrellas mas viejas. Lo que implica poder controlar, de cierta forma, como el polvo afecta la luz y por lo tanto el espectro en distintas longitudes de onda.

## 3. Modelamiento SSP

Como se muestra en Eq. 1, las poblaciones estelares simples dependen de la función de masa inicial y de las librerías estelares de los espectros según los tipos de estrellas, en un rango de masa aproximado entre 0.1 y 100 [ $M_{\odot}$ ]. En Fig. 1 se observa, en específico, que la función de masa inicial para (Salpeter, 1995) se encuentra bajo todas las demás IMF (puede verse mejor en Fig. 10, donde se encuentran ordenadas por los mismos colores y por los rangos UV, óptico e IR, respectivamente) para el espectro modelado de una galaxia con una metalicidad cercana a la del vecindario solar (parámetro  $\log(Z/Z_{\odot}) = 0$ ) y de edad 13.7 Gyr. Esto puede deberse, principalmente a que este modelo permite valores de estrellas menos masivas, donde sabemos que sus periodos de vida son más largos y con una luminosidad menor, en comparación a los demás modelos, que consideran estrellas más masivas con periodos de vida más cortos y más energéticas, que aportaría mayor luminosidad al espectro.

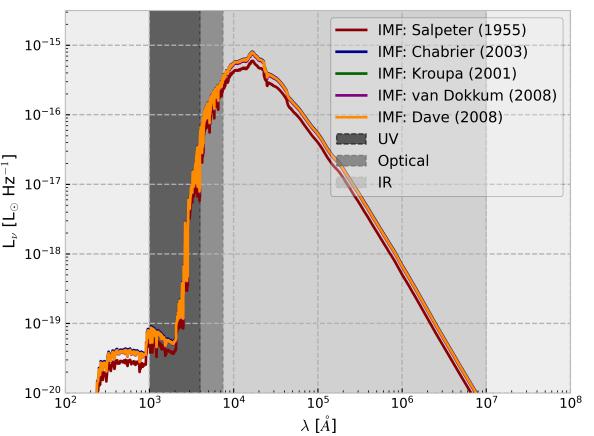


Fig. 1: Espectros de una galaxia envejecida (13.7Gyr), considerando una SSP, según las distintas funciones de masa inicial presentadas en Sección 2.

Si se considera la misma galaxia con la misma edad, pero con una función de masa inicial fija (la de Salpeter, 1955) y ahora variando la razón de metalicidad, se tiene la Fig. 2. Donde se observa que para metalicidades mayores los espectros se

desplazan hacia la derecha, sin embargo, para longitudes de onda menores al IR, la luminosidad disminuye notoriamente (Puede verse mejor en Fig. 11, donde se encuentran ordenadas por los mismos colores y por los rangos UV, óptico e IR, respectivamente), dado que a mayor metalicidad, se tienen poblaciones estelares más envejecidas que emiten menos en el UV, tal como ocurre para galaxias elípticas.

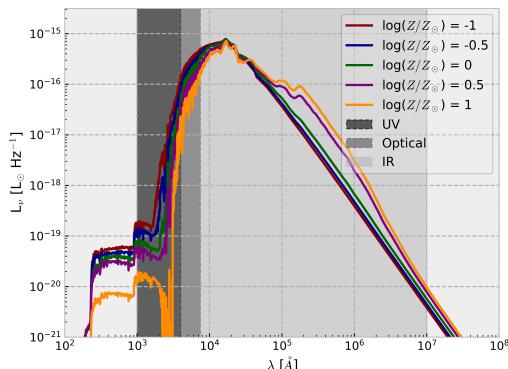


Fig. 2: Espectros de una galaxia envejecida (13.7Gyr), considerando una SSP, según distintos valores para la metalicidad, con la función de masa inicial correspondiente a la de (Salpeter, 1955) [10].

Por otra parte, es importante comprender cómo evoluciona el espectro con el tiempo, por lo que en Fig. 3, se observa como en un tiempo joven de la galaxia ( $t = 0.01$  Gyr), se emite mayor luminosidad en todos los rangos, en específico a menores longitudes de onda (UV y óptico). Esto es interesante si se quisiera modelar alguna galaxia tipo espiral, ya que físicamente hablando, podría considerarse una galaxia con estrellas tipo O, B o A, las cuales viven poco tiempo por ser muy masivas, por lo que podría que considerarse alguna especie de "burst". Sin embargo, esto no es válido para un espectro real, dado que no se considera el factor de absorción por polvo (principalmente en UV) y la reemisión de este en IR, además de no que se considera una historia de formación estelar en una SSP.

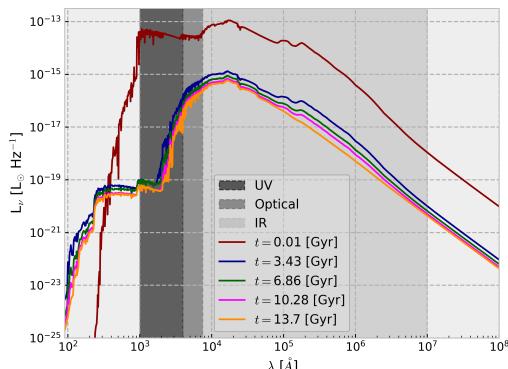


Fig. 3: Evolución temporal del espectro de una galaxia, considerando una SSP de metalicidad cercana a la del vecindario solar y una función de masa inicial dada por (Salpeter, 1955) [10].

Dado estos últimos problemas mencionados es necesario hablar de poblaciones estelares compuestas, tales que dependan de la formación estelar en el tiempo y del polvo presente en el medio interestelar o nubes moleculares existentes en los discos de galaxias espirales o centros galácticos con núcleo activo (e.g. Galaxia elíptica M87 con agujero negro supermasivo en el centro).

## 4. Modelamiento CSP

Como ya mencionamos anteriormente, para crear un modelo de población estelar compuesta descrito por Eq. 2 necesitamos expresarla en términos de las SSPs, añadiendo factores como la SFH y atenuación por polvo, con la intención de recrear espectros de galaxias realistas.

Tal como presentamos en la Sección 2, estos factores pueden incorporarse mediante los modelos mencionados, con sus respectivos parámetros disponibles en *FSPS*. Estos modelos y valores de parámetros, utilizados para la obtención de los espectros de distintos tipos de galaxias, ocupando una CSP, se pueden observar en Tabla 1.

Galaxia	IMF	SFH	Tau	Dust Type	LogzSol
Espiral	2	1	3	2	0
Starburst 1	2	1	5	2	-1
Starburst 2	2	1	5	4	-1
Elíptica	2	1	0,5	2	0.5

Table 1: Tabla con los parámetros utilizados para modelar, en *FSPS*, los espectros de los distintos tipos de galaxia, según una CSP.

Por otra parte, es necesario comprender bien los valores del parámetro  $\tau$ , dado que indica el tiempo de duración del estallido de formación estelar para un modelo de decaimiento exponencial, lo cual es útil para modelar en *FSPS*, dado que se tienen los modelos  $\tau$ -model y *Delayed*  $\tau$ -model. Para esto se modelan los distintos tipos de galaxias, variando el valor de este parámetro según la edad de la galaxia, por lo que, tanto para las galaxias espirales, starburst y elípticas, se tienen la misma dependencia, tal como se muestra en Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 y en Fig. 15, respectivamente. Dejando en evidencia que, para galaxias con un tiempo de duración del estallido mayor, los espectros se encuentran más arriba que para las de tiempos menores. El sentido físico de este suceso puede explicarse al considerar que las galaxias con un  $\tau$  mayor, siguen formando estrellas por más tiempo, lo que implicaría tener una tasa de formación estelar más reciente si se observa a redshift cero, lo que indicaría tener más estrellas jóvenes y energéticas que emitan, sobre todo, a longitudes de ondas menores. Relación que está más presente para galaxias espirales y elípticas, mas no para las starburst.

### 4.1. Galaxia Espiral

Para modelar una galaxia espiral hemos utilizado los parámetros mostrados por la Tabla 1, de donde se extrae que estamos ocupando una IMF de Kroupa, un  $\tau = 3$ , el cual es importante para que la historia de formación estelar sea más extensa y constante, lo cual es una característica importante de las galaxias espirales. A partir de esta misma idea de que las galaxias espirales poseen una tasa de formación estelar continua, hemos utilizado el

modelo de Calzetti para caracterizar la extinción por el polvo, ya que para poseer una SFH constante, debemos estar en presencia de nubes moleculares, las cuales tienen una gran cantidad de polvo.

La metalicidad ocupada es corresponde a un  $\log(Z/Z_{\odot}) = 0$  lo que implica una metalicidad solar, esto es coherente para galaxias espirales, como la Vía Láctea.

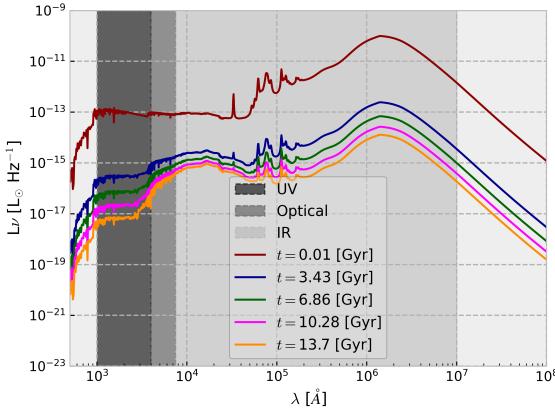


Fig. 4: Evolución del espectro de una galaxia espiral considerando un sólo tipo de polvo (para estrellas viejas, con un valor de 0.2) y un periodo de formación estelar constante, con un alto valor para e-folding time en comparación a una galaxia elíptica.

De Fig. 4 podemos observar un gran crecimiento en la emisión de luz en el infrarrojo, esto es debido a la reemisión del polvo para longitudes de onda mas grandes. Sabemos que la atenuación por polvo absorbe mucha luz en el UV y óptico, luz principalmente emitida por estrellas jóvenes, la cual está siendo reemitida en longitudes de onda mas largas, por lo que al observar este crecimiento de luz para el IR es debido que estamos en presencia de estrellas jóvenes, lo que guarda coherencia con la continua SFR en su historia presente en galaxias espirales.

También podemos comentar que al evolucionar el espectro en el tiempo, este se desplaza hacia abajo, esto puede ser debido a que si bien, proporcionamos parámetros para que la SFH sea constante, este modelo sigue estando bajo un  $\tau$ -model, lo que implica que la tasa de formación estelar decaerá, afectando a la emisión en longitudes de onda cortas y debido a la presencia de polvo, a las longitudes de onda mas largas.

#### 4.2. Galaxia Starburst

Con respecto a las galaxias de tipo starburst, sabemos que son galaxias jóvenes, y que al ser comparadas con galaxias espirales, son aún menos metálicas y con una intensa formación estelar. Por estas razones hemos elegido parámetros coherentes con estas características en la Tabla 1.

Se han realizado dos modelos de galaxias starburst para analizar su dependencia según el tipo de polvo, por ende, de la tabla podemos notar que los parámetros son los mismos a excepción del tipo de polvo, en donde para el primer modelo hemos usado el modelo de Calzetti, que nos permitía agregar el parámetro  $dust2$  y para el segundo utilizamos el modelo de

Kriek & Conroy, en el que era posible ajustar valores para  $dust1$  y  $dust2$ , en ambos modelos hemos usado un valor de  $dust2 = 1.2$ , y para el modelo en el que agregamos la atenuación por polvo de la luz de estrellas jóvenes, tomamos un valor de  $dust1 = 0.3$ .

Otro parámetro importante que agregamos y no se muestra en la tabla, es el de  $const$ , este valor lo hemos colocado en 0.8 para indicar que la galaxia forma el 80% de su masa de manera constante en el tiempo de duración del estallido estelar, indicando que la intensa formación estelar sea constante durante el tiempo y no solamente en una época específica, como ocurre para galaxias *early-type*.

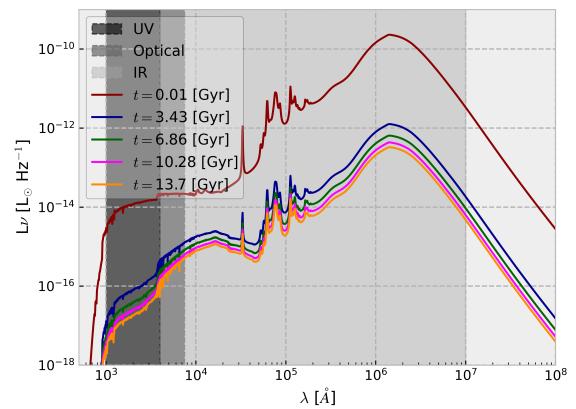


Fig. 5: Evolución del espectro de una galaxia starburst considerando un modelo con un sólo tipo polvo.

Refiriéndonos a las Fig. 5 y 6, en ambos casos notas una alta reemisión por polvo en el IR debido a la gran emisión de luz por la intensa SFR de las galaxias starburst.

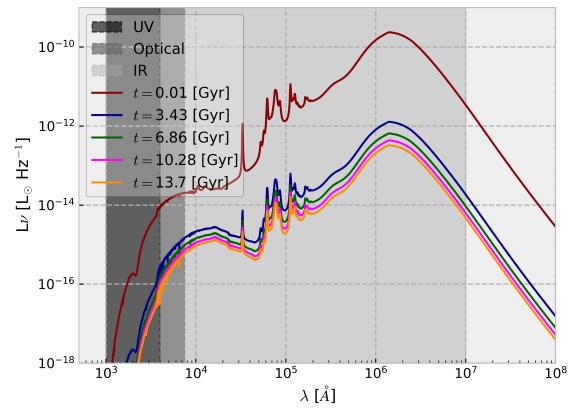


Fig. 6: Evolución del espectro de una galaxia starburst considerando un modelo de polvo con dos tipos (para estrellas viejas y estrellas jóvenes).

Con respecto al movimiento vertical del espectro al evolucionarlo en el tiempo, podemos decir que se nota una luminosidad mucho mas alta cuando se forma la galaxia, la

cual luego disminuye, pues las primeras estrellas formadas alcanzaron a evolucionar un poco, para finalmente estabilizarse según avanza el tiempo, sin resaltar grandes diferencias, esto a causa de la intensa y constante formación estelar.

En cuanto al análisis del polvo y estudiar como afecta ocupar un modelo u otro en las galaxias starburst, la principal diferencia que observamos es en la luminosidad en el UV, donde al usar el modelo de Kriek & Conroy, que nos permitía agregar dos tipos de polvos, la luminosidad es menor para longitudes de onda cortas al ser comparada con el espectro en el que utilizamos el modelo de Calzetti, esto debido que al incluir el parámetro *dust1*, que corresponde a la atenuación de luz para estrellas mas jóvenes, se presenta una mayor absorción para longitudes de onda pequeñas.

### 4.3. Galaxia Elíptica

Sabemos que las galaxias elípticas poseen una formación estelar en épocas más tempranas y cortas, además de altas metalicidades. En consecuencia hemos elegido parámetros que reflejan estas propiedades, las que se pueden ver en la Tabla 1.

Donde es coherente elegir un  $\tau$  de 0.5, el que nos indica que la formación estelar será corta, y además agregamos el parámetro *tburst* con un valor de 13, el que indica que la galaxia elíptica experimentó una formación estelar relevante hace 13 Gyr, lo que es consistente con que la tasa de formación de estrellas ocurrió para edades tempranas en la historia del universo.

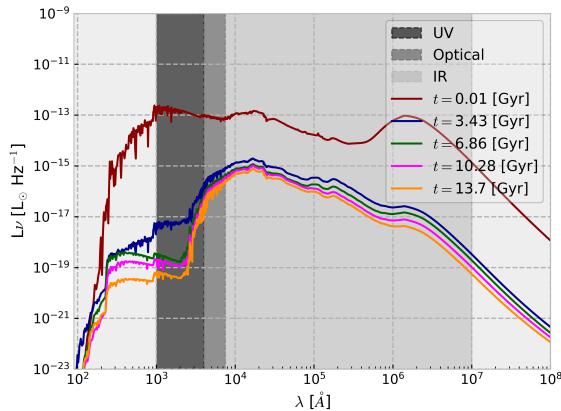


Fig. 7: Evolución del espectro de una galaxia elíptica considerando un tipo de polvo con un valor pequeño, un periodo de formación estelar corto y un burst a temprana edad de esta galaxia.

Sobre la Fig. 7, podemos mencionar que para edades tempranas de la galaxia, su espectro no pareciera ser de una galaxia elíptica, pero esto es debido al burst de formación de estrellas que debía tener el modelo para épocas tempranas, por lo tanto se presenta mucha luz en longitudes de onda pequeñas, posteriormente, al evolucionar el modelo, este rápidamente se comporta como el espectro de una galaxia elíptica, donde se cumple que hay poca emisión de luz en longitudes de onda en el UV y mayor emisión en IR, sin contemplar el polvo como para el caso de las espirales y starburst.

## 5. Modelamiento de Andrómeda

Al utilizar los datos del espectro de Andrómeda, en el rango óptico, mencionados en (P. Lira, 2007) [9], capturados por el telescopio *WHT 4.2m* con las especificaciones en (Arribas, S. et al., 1990) [1], se modela en *FSPS* este espectro, mediante una CSP considerando un modelo de polvo de (Calzetti, 2000) con un valor de 0.2. A su vez, se utiliza una metalicidad como la del vecindario solar y una edad de la galaxia de 10.1 Gyr. Puede verse en Fig. 8 que la forma del espectro recreado es similar a la de los datos observacionales. Sin embargo, para esto, se necesitó amplificar la Luminosidad entregada por *FSPS* en un factor de  $2.3 \cdot 10^{26}$  para que quedaran en la misma escala. Para los datos observacionales tienen en consideración la distancia hasta Andrómeda, mientras que en *FSPS* se desconoce esta información. Además, en *FSPS* tenemos normalizada la IMF a una masa solar, lo que implica tener valores pequeños de luminosidad en los espectros, por lo que el factor por el cual se amplificó puede ser un buen estimador en la masa de la galaxia y en la distancia (en caso de no conocer los valores).

En este análisis se incluyeron las bandas de color de SDSS (en específico la banda *g* y la banda *r*), con la finalidad de observar la contribución de cada una en el espectro. Cabe mencionar que para esto también se amplificaron sus valores. Donde se muestra que al sumar ambas componentes, recreamos una gran parte del espectro (debido a que pertenece al rango óptico).

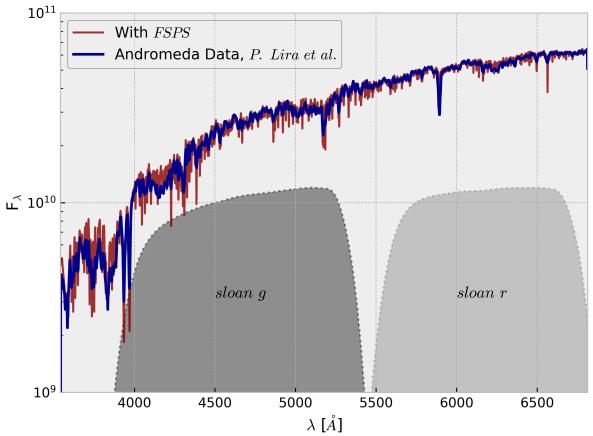


Fig. 8: Espectro en el óptico de galaxia vecina Andrómeda, los datos del flujo se encuentran en el repositorio en Github mencionado en la Sección 6. En *FSPS* se observa la contribución de cada filtro en el espectro y la línea roja (Esto tras dejarlos a la misma escala de flujo, por lo que podrían considerarse unidades arbitraria de Flujo, según algún parámetro que entregue información de la masa y distancia de la galaxia).

Por otra parte, este análisis también es útil para la extrapolación de espectros de galaxias, dado que al tener datos observacionales del flujo (o Luminosidad), en algún rango de longitudes de onda, y al tener conocimientos del tipo de galaxia y su estructura, es posible conocer la forma del espectro en otras regiones que no fueron capturadas en la observación. Para el caso de la galaxia vecina, se tiene la Fig. 9, donde se muestra el espectro en distintos rangos de longitudes de onda.

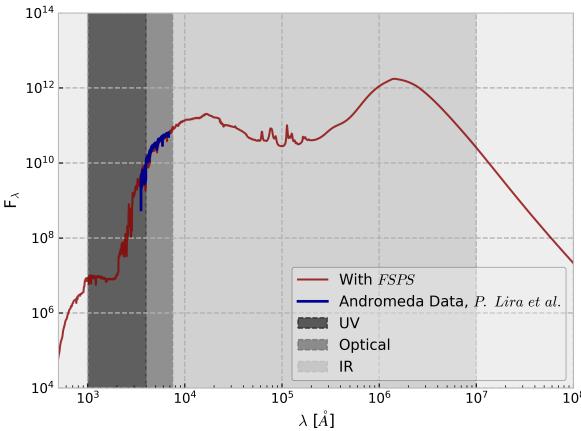


Fig. 9: Espectro de Andrómeda presentado en Fig. 8 extrapolado a más longitudes de ondas. Se observa una absorción en el rango UV y una reemisión en el rango IR.

En Fig. 9 es posible ver una de las características principales de las galaxias espirales, dado que se aprecia la absorción en el rango UV y una reemisión en el IR, producto de considerar del polvo presente, principalmente, en el medio interestelar. Siendo esto un indicador coherente para el modelamiento de Andrómeda.

## 6. Conclusión

Para comprender de manera correcta las SSPs y las CSPs es importante no tratarlas como poblaciones excluyentes, sino como complementarias. Las CSPs dependen de las SSPs, dado que estas últimas incluyen las fracciones de masas de estrellas iniciales que le dan estructura y peso a los espectros resultantes. De la misma manera, es necesario considerar el tiempo de formación estelar de la galaxia, debido a que es una información crucial para entender mejor las galaxias como *early – type* o *late – type*, y el polvo para comprender la absorción en longitudes de onda en el rango UV y la reemisión en IR.

Además, al modelar diferentes tipos de galaxias hemos analizado como los parámetros de los modelos afectan a los espectros resultantes, encontrando gran relevancia en el parámetro  $\tau$ , pues representa que tan rápido va a decaer la formación estelar de las diferentes galaxias, también estudiamos los distintos modelos de polvo y como estos guardan una profunda relación con la absorción y reemisión de luz al estar presentes o no. También consideramos el parámetro  $const$  para representar una formación estelar sostenida en el tiempo.

Por otro lado, el modelamiento del espectro de Andrómeda podría realizarse para otras galaxias, de distintos tipos, para extraer los espectros a otras longitudes de onda y estudiar casos más específicos sobre los espectros, usando la herramienta teórica de síntesis de poblaciones estelares.

## References

- [1] S. Arribas et al. “Fibre Optics at the 4.2-METER Telescope - WHT / William Herschel Telescope”. In: *Ap&SS* 171.1-2 (Sept. 1990), pp. 293–296. doi: [10.1007/BF00646866](https://doi.org/10.1007/BF00646866).
- [2] Daniela Calzetti et al. “The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies”. In: *ApJ* 533.2 (Apr. 2000), pp. 682–695. doi: [10.1086/308692](https://doi.org/10.1086/308692). arXiv: [astro-ph/9911459 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9911459).
- [3] Gilles Chabrier. “Galactic Stellar and Substellar Initial Mass Function”. In: *PASP* 115.809 (July 2003), pp. 763–795. doi: [10.1086/376392](https://doi.org/10.1086/376392). arXiv: [astro-ph/0304382 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0304382).
- [4] Stéphane Charlot and S. Michael Fall. “A Simple Model for the Absorption of Starlight by Dust in Galaxies”. In: *ApJ* 539.2 (Aug. 2000), pp. 718–731. doi: [10.1086/309250](https://doi.org/10.1086/309250). arXiv: [astro-ph/0003128 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0003128).
- [5] Charlie Conroy and James E. Gunn. *FSPS: Flexible Stellar Population Synthesis*. Astrophysics Source Code Library, record ascl:1010.043. Oct. 2010.
- [6] Romeel Davé. “The galaxy stellar mass-star formation rate relation: evidence for an evolving stellar initial mass function?” In: *MNRAS* 385.1 (Mar. 2008), pp. 147–160. doi: [10.1111/j.1365-2966.2008.12866.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2008.12866.x). arXiv: [0710.0381 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/0710.0381).
- [7] Mariska Kriek and Charlie Conroy. “The Dust Attenuation Law in Distant Galaxies: Evidence for Variation with Spectral Type”. In: *ApJ* 775.1, L16 (Sept. 2013), p. L16. doi: [10.1088/2041-8205/775/1/L16](https://doi.org/10.1088/2041-8205/775/1/L16). arXiv: [1308.1099 \[astro-ph.CO\]](https://arxiv.org/abs/1308.1099).
- [8] Pavel Kroupa. “On the variation of the initial mass function”. In: *MNRAS* 322.2 (Apr. 2001), pp. 231–246. doi: [10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.2001.04022.x). arXiv: [astro-ph/0009005 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0009005).
- [9] P. Lira et al. “Multiwavelength study of the nuclei of a volume-limited sample of galaxies - II. Optical, infrared and radio observations”. In: *MNRAS* 382.4 (Dec. 2007), pp. 1552–1590. doi: [10.1111/j.1365-2966.2007.12006.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12006.x).
- [10] Edwin E. Salpeter. “The Luminosity Function and Stellar Evolution.” In: *ApJ* 121 (Jan. 1955), p. 161. doi: [10.1086/145971](https://doi.org/10.1086/145971).
- [11] Pieter G. van Dokkum. “Evidence of Cosmic Evolution of the Stellar Initial Mass Function”. In: *ApJ* 674.1 (Feb. 2008), pp. 29–50. doi: [10.1086/525014](https://doi.org/10.1086/525014). arXiv: [0710.0875 \[astro-ph\]](https://arxiv.org/abs/0710.0875).

## Anexo

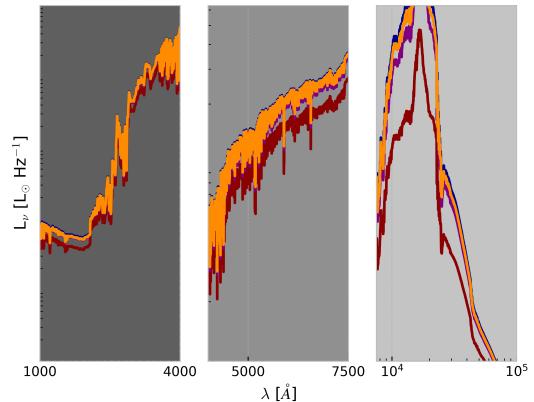


Fig. 10: Zoom in de Fig. 1, según rangos de los UV, ópticos e IR. Se aprecian mejor las diferencias locales entre rangos, mostrando que el espectro de la IMF de Salpeter se encuentra bajo las demás en todos los rangos.

Los códigos y archivos utilizados se encuentran adjunto en el siguiente repositorio de GitHub: <https://github.com/vahonorato/FSPS-Espectra-Modeling/tree/main>.

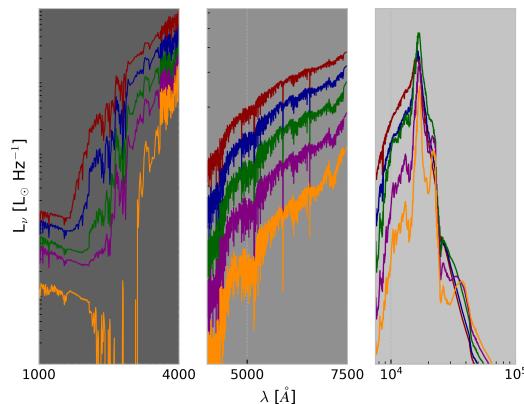


Fig. 11: Zoom in de Fig. 2, según regiones de los rangos UV, ópticos e IR. Se aprecian mejor las diferencias locales entre rangos.

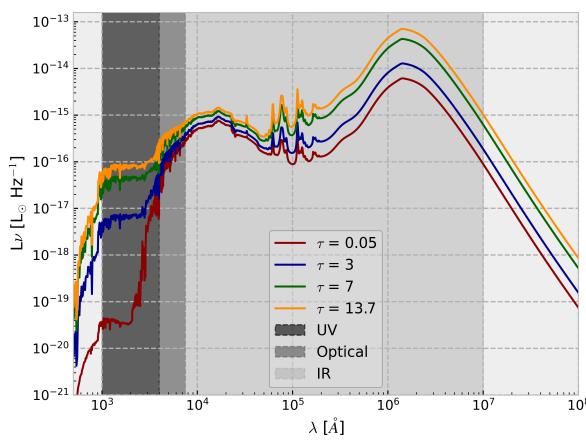


Fig. 12: Espectros de una galaxia espiral para distintos períodos de tiempos de formación estelar (distintos e-folding time,  $\tau$ ). En específico este tiempo, es el tiempo característico en donde la SFR decrece como  $e^{-1}$ .

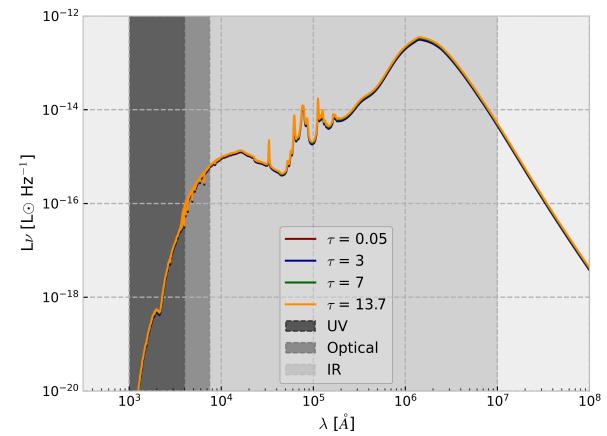


Fig. 14: Espectros de una galaxia *starburst* considerando dos tipos de polvo (de estrellas jóvenes (*birth clouds*) y estrellas viejas (medio interestelar)), para distintos períodos de tiempos de formación estelar (distintos e-folding time,  $\tau$ ).

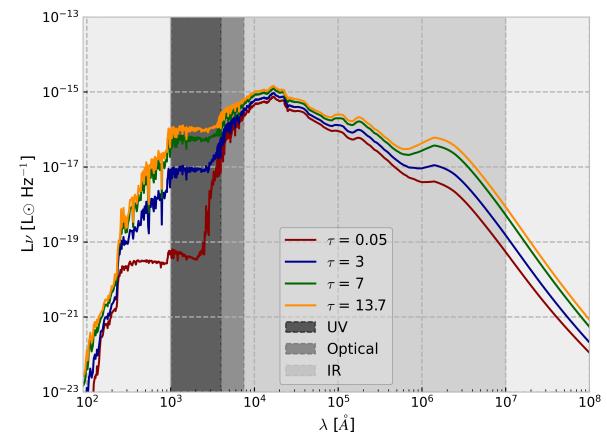


Fig. 15: Espectros de una galaxia elíptica para distintos períodos de tiempos de formación estelar (distintos e-folding time,  $\tau$ ).

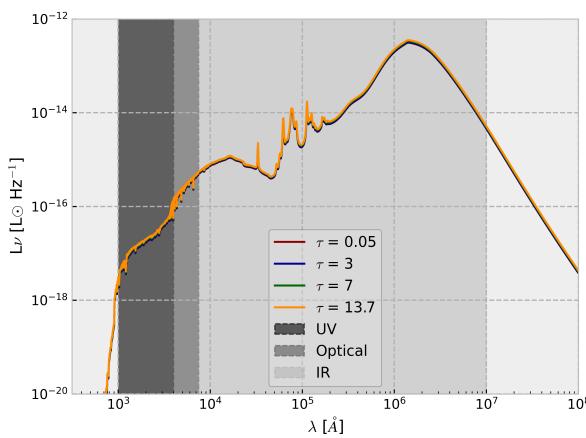


Fig. 13: Espectros de una galaxia *starburst* considerando un sólo tipo de polvo, para distintos períodos de tiempos de formación estelar (distintos e-folding time,  $\tau$ ).