

El ciclo de materia bariónica en las galaxias

Alfredo J. Mejía^{1,2}

7 de enero de 2018

1. MOTIVACIÓN

Los estudios del contenido estelar en las galaxias distantes ($z \sim 3$) solo tienen sentido en el límite de un número significativo de observaciones, pues debido a la gran variedad de fenómenos físicos que tienen lugar en estos sistemas (muchos aún en discusión) y distintas a las escalas temporales y espaciales en que estos ocurren, no es posible resolver las propiedades físicas de galaxias individuales de manera robusta. Por supuesto, las incertidumbres en los ingredientes de los modelos también juegan un papel importante. Aunque en principio en el universo local las galaxias se pueden resolver como imágenes extendidas en una exposición astronómica usando la técnica de la fotometría, la resolución espectral provista por esta clase de sondeos aunada al carácter degenerado del problema limitan considerablemente la información que se puede extraer de estos sondeos.

Hoy en día existen sondeos espectroscópicos que proporcionan información espectral mucho más detallada y que permiten resolver espacialmente a las galaxias en el universo local. La disponibilidad de estos datos en efecto nos ha permitido estudiar en un nivel de detalle sin precedentes las escalas temporales y espaciales de los fenómenos físicos que ocurren en las galaxias a lo largo de la secuencia de Hubble. En este seminario les hablaré en particular de la relación entre la masa estelar, la tasa de formación estelar y la metalicidad estelar (esencialmente el ciclo de la materia bariónica en las galaxias) en la era dorada de sondeos con unidades de campo integral.

2. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Simplemente considerando el tiempo de vida de aquellas estrellas que contribuyen al enriquecimiento del medio interestelar, en el cual se formará la siguiente generación de estrellas, uno puede tener una idea de la escala típica de enriquecimiento químico en una galaxia.

Una supernova tipo II retorna especies químicas más pesadas que el O (e. g. Mg, Ca, Ti y Si) en cuestión de unos 10^7 años. Las supernovas tipo Ia enriquecen el medio en una escala que puede ir desde 10^7 años hasta $\sim 10^9$ años. En las estrellas de baja masa, que pueden vivir por $> 3 \times 10^9$ años muestran evidencia de esta evolución química en sus distribuciones espectrales de energía. En galaxias tempranas estas son las estrellas que dominan su distribución espectral de energía, por lo tanto no es sorprendente que

la primera evidencia de una relación entre la edad y la metalicidad de una galaxia se encontrara en estos sistemas.

En galaxias tardías, los rasgos de metalicidad *estelar* en el óptico son débiles, mientras que la emisión del MIE difuso permite estimar la metalicidad en fase de gas. En estas galaxias es relativamente fácil estimar la TFE mediante la emisión de $H\alpha$, por ejemplo, de manera que se puede estudiar la primera relación fundamental del ciclo de masa bariónica.

3. Relaciones clásicas

RELACIÓN MASA-TFE. La relación entre la masa y la TFE es probablemente la relación más estudiada del ciclo de masa bariónica (e. g. Schmidt, 1959; Kennicutt, 1998). Por ejemplo Brinchmann y col. (2004) estimó la TFE de las galaxias con formación estelar reciente del universo local muestreado por el SDSS. Ellos encuentran una correlación directa entre la masa estelar y la TFE. Ahora la masa por sí sola dice simplemente cuánto material bariónico existe en estrellas, pero no dice nada de como está distribuido el material que es, según la ley de Kennicutt-Schmidt, la relación fundamental entre la masa y la TFE. En este sentido, es interesante ver que la relación entre la TFE específica y la masa no es tan estrecha como la relación entre la TFE específica y la densidad superficial de masa. Un resultado que apunta a una relación con fenómenos del tipo local.

RELACIÓN MASA-METALICIDAD. En los sistemas con formación estelar reciente, es particularmente sencillo estimar la metalicidad del MIE en fase de gas debido a la presencia de la emisión del gas. Tremonti y col. (2004) estimaron la relación masa-metalicidad en una muestra de galaxias con formación estelar, usando como trazador de la metalicidad la abundancia de oxígeno. Encontraron una estrecha relación entre la metalicidad y la masa estelar, donde las galaxias menos masivas eran también menos ricas en metales, mientras que las más masivas eran más ricas en metales, un resultado en acuerdo con estudios previos. Tremonti y col. discutió dos hipótesis para explicar el origen físico de la relación masa-metalicidad. Si es que las galaxias más masivas forman una fracción de estrellas mayor que sus contrapartes menos masivas en un tiempo de Hubble, entonces la relación indica una secuencia de astración, i. e. en las galaxias más masivas se forman más estrellas que enriquecen el medio rápidamente, mientras que las galaxias menos masivas se forman menos estrellas masivas de manera que los metales son encapsulados por más tiempo en las estrellas. Si es que la eficiencia de la tasa de formación estelar es irrespectiva de la masa estelar, entonces las galaxias menos masivas de alguna forma han perdido de manera selectiva los metales, tal vez mediante vientos galácticos. Evidencia de que la fracción másica de gas decrece con la masa estelar existe (Bell y de Jong, 2000) y podría explicar la relación masa-metalicidad en términos de que las galaxias menos masivas son menos eficientes formando estrellas masivas. Por otra parte, existe evidencia también de que las galaxias *star-burst* sufren de fuertes vientos galácticos, que el medio intracúmulo y el medio intergaláctico están en-

riquecidos en metales. De acuerdo con las expectativas de un modelo de caja cerrada, la metalicidad está directamente relacionada con el *yield* estelar de la siguiente manera:

$$Z = y \ln [\mu_{\text{gas}}^{-1}],$$

donde y es el *yield* y μ_{gas} es la fracción de masa en gas. Suponiendo que y es constante (i. e. la TFE decrece *continuamente* en el tiempo). Dada una fracción de metales Z y una fracción de masa en gas μ_{gas} , usando esta relación se puede calcular el *yield efectivo*, i. e. el *yield* producido por las estrellas para observar *al menos* la metalicidad Z . Si el modelo de caja cerrada efectivamente describe a las galaxias tardías como las de la muestra de Tremonti y col., entonces $y_{\text{efectivo}} = y$ independientemente de la masa bariónica. Sin embargo, lo que se observa es que y_{efectivo} decrece con la masa bariónica. Este hallazgo se interpreta como que la relación masa-metalicidad tiene un origen no solo en el fenómeno de formación estelar y en la subsiguiente evolución química, sino también en fenómenos reguladores en el MIE. Tal vez la evidencia más clara de que esto es así se puede apreciar en la relación entre la metalicidad estelar y la metalicidad del gas en el MIE: El hecho de que se ha observado que el medio intergaláctico está enriquecido y que las galaxias *star-burst* sufren fuertes vientos galácticos que superan la velocidad de escape, soportan esta hipótesis para explicar esta relación de escala.

RELACIÓN EDAD-METALICIDAD. La relación entre la edad y la metalicidad se ha estudiado de manera extensiva en la literatura reciente. Fue primero observada en galaxias tempranas, aunque la degeneración entre la ambas propiedades físicas, dificulta la interpretación de esta relación (Worthey, 1994). La mayor parte de los estudios posteriores se concentró en sistemas tempranos, incluyendo bulbos de galaxias tardías (Proctor y Sansom, 2002; Terlevich y Forbes, 2002), probablemente debido a que ambos, los modelos de síntesis de poblaciones y los índices espectrales usados para estimar la edad y la metalicidad, favorecían particularmente el estudio de estos sistemas. Sin embargo, poco después Gallazzi y col. (2005) presentó un análisis de la relación edad-metalicidad que incluía galaxias tardías. Sus resultados se pueden resumir como sigue: ambos, la edad y la metalicidad están correlacionados con la masa estelar, aunque la fuerza de dicha correlación depende fuertemente del rango de masa. En general, las galaxias menos masivas están dominadas por poblaciones más jóvenes y menos ricas en metales pero con una dispersión estadística más grande, mientras que las más masivas están dominadas por poblaciones más viejas y más ricas en metales con dispersión estadística menor, esto último en acuerdo con los estudios previos de galaxias tempranas. En el caso de las galaxias más masivas, la relación edad-metalicidad sugiere que estas se forman en escalas de tiempo más cortas (~ 1 Gaño) que sus homólogas menos masivas. Las galaxias menos masivas, por otro lado, se distribuyen en el plano edad-metalicidad dependiendo del tipo: dominadas por disco o dominadas por esferoides. Esto evidencia que la HFE presente podría depender de parámetros estructurales y/o fenómenos locales en estos sistemas. Es importante notar, sin embargo, para las galaxias con

formación estelar reciente, determinar la metalicidad es particularmente complicado, pues los trazadores de metalicidad en poblaciones jóvenes suelen ser débiles en el rango óptico debido al efecto del *outshining* (e. g., Conroy, 2013).

Algunos aspectos de estas dos escalas quedaban sin explicarse completamente y/o estaban plagadas de incertidumbres que limitaban una clara interpretación. Las fuentes de incertidumbres más importantes eran:

Incertidumbres observacionales. Probablemente el efecto sistemático más importante en estos estudios es el efecto de apertura. Es bien sabido que existen gradientes radiales en las propiedades de las galaxias, por lo tanto, estudiar las relaciones entre las propiedades físicas ‘integradas’, supone aproximaciones que deben tomarse en cuenta durante la interpretación de dichas relaciones. Más cuidado aún se debe tener cuando se comparan propiedades integradas con diferentes aperturas. En este sentido las galaxias tempranas han ofrecido mejores posibilidades, pues exhiben gradientes menos en su contenido estelar como función de su radio. Las galaxias tardías por otro lado, no solo muestran gradientes más pronunciados en su contenido estelar, también tienen brillos superficiales típicamente menores y por lo tanto requieren tiempos de exposición más prolongados para alcanzar determinada S/N. Una alta S/N es deseable en estos sistemas para determinar de manera confiable la metalicidad estelar usando rasgos espectrales como en Gallazzi y col. (2005), generalmente más débiles que en galaxias tempranas. Resolución espacial es deseable para estudios de galaxias tardías para interpretar de manera adecuada las relaciones de escala, i. e. tomando en cuenta los efectos de gradientes radiales y de ángulo de inclinación.

Incertidumbres en los modelos. Las galaxias tempranas de nuevo han sido favorecidas en el sentido de los modelos que usamos para interpretar su contenido estelar. Una población estelar simple por lo general es buena aproximación en estos sistemas, pues la relación masa luminosidad (en el óptico) evoluciona poco en poblaciones más viejas que unos pocos Gaños evolucionando pasivamente. Las galaxias tardías, por otro lado suponen retos que dificultan la interpretación de sus propiedades integradas como ya vimos en el punto anterior. Adicionalmente modelos de HFE más complejos deben adoptarse para interpretar de manera adecuada su emisión en el espectro óptico, considerando otras componentes además de la estelar, como por ejemplo el contenido de polvo y de gas. Es costumbre estudiar estas componentes por separado, probablemente debido a la ausencia de modelos de poblaciones estelares que incluyan de manera consistente la emisión del gas, la absorción. El efecto del *outshining* aunado al efecto de apertura atenta contra la interpretación de la masa estelar (usualmente menor que la masa real integrada de la galaxia) y de la metalicidad estelar. Varios intentos se han hecho por superar ambas limitaciones usando la resolución espacial provista por observaciones fotométricas (Sorba y Sawicki, 2015) y sondeos en el cercano infrarrojo, donde el dicho efecto se espera sea menor (Eminian y col., 2008). Sin embargo, las incertidumbres en el modelado de la emisión de las estrellas en la fase TP-AGB en el cercano infrarrojo de nuevo dificultan la interpretación (Zibetti y col., 2013).

4. CICLO DE MASA VISTO POR CALIFA

La madurez alcanzada por los sondeos con IFU en la última década ha permitido la construcción de muestras de galaxias de todas las clases espectrales. La culminación del sondeo CALIFA (Sánchez y col., 2012, 2016) ha significado un hito en este sentido, pues con el tercer *public data release* se ha puesto a la disposición de la comunidad astronómica $\sim 600 \times 1000$ espectros en el rango $\sim 3000 - 7000 \text{ \AA}$ para ~ 600 galaxias en el universo local. Ante las incertidumbres y las preguntas que quedaban abiertas respecto a la relación entre la edad, la masa y la metalicidad, sobre todo en sistemas con formación estelar, CALIFA presenta una oportunidad inigualable. Los estudios que buscaban desentrañar el carácter local de las relaciones de escala no tardaron en aparecer:

RELACIÓN MASA-METALICIDAD. Rosales-Ortega y col. (2012) estudia por primera vez la relación entre la masa, la metalicidad y la tasa de TFE específica en $\sim 2 \text{ k}$ regiones HII segregadas en una muestra de galaxias tardías sondeadas por CALIFA. Encontraron que la densidad superficial de masa y la metalicidad en las regiones HII están directamente correlacionadas y ambas propiedades inversamente correlacionadas con la TFE específica. Rosales-Ortega y col. demostraron que la relación masa-metalicidad encontrada en estudios usando datos integrados (con efectos de apertura incluidos) puede explicarse como la suma de dos efectos: un crecimiento tipo *inside-out*, en el que la región central de las galaxias se forma primero y luego la formación estelar se extiende sobre el disco; y un efecto de *downsizing* local, donde las regiones más masivas forman estrellas más rápido y por lo tanto en una escala temporal más corta. Ambos fenómenos a su vez explican los gradientes radiales observados en galaxias con discos. Es interesante notar también que el hecho de que la relación masa-metalicidad tenga un origen local sugiere que esta es en realidad una secuencia en astración, i. e., en las zonas de mayor formación estelar el enriquecimiento químico ocurre en una escala temporal más corta, mientras que en las de menor formación estelar los metales quedan atrapados en el interior de las estrellas de baja masa por más tiempo.

FENÓMENOS LOCALES VERSUS GLOBALES. Comparar el rol de los fenómenos locales y globales resulta entonces muy interesante de cara a un mejor entendimiento del ciclo de masa bariónica. González Delgado y col. (2014) estudió el rol de los efectos locales en la relación masa-metalicidad estelar. Ellos lograron recuperar las mismas tendencias en la relación masa-metalicidad (en fase de gas y estelar). Mostraron que la metalicidad en fase de gas, es trazador de la metalicidad en las poblaciones jóvenes, como es de esperarse en sistemas con formación estelar reciente donde el reciclaje ocurre en una escala de tiempo muy corta. La relación masa-metalicidad como función de la distancia al centro de las galaxias mostraba una dispersión en metalicidad que era claramente modulada por los efectos globales medidos por la masa estelar integrada de las galaxias. En las regiones menos densas (externas), por otro lado la densidad superficial de masa estelar correlaciona con la metalicidad estelar, como encontró Sánchez y col. (2013). Más interesante aún, la relación masa-metalicidad depende del radio

dentro de la galaxia donde, en acuerdo con los resultados en González Delgado y col. (2014), la densidad de masa regula la metalicidad estelar, mientras que en las regiones más internas y por lo tanto más densas, la masa global regula la metalicidad.

RELACIÓN MASA-METALICIDAD-TFE. Esta relación, también llamada relación fundamental (o plano fundamental) de masa-metalicidad ya había sido estudiada (Lara-López y col., 2010; Mannucci y col., 2010) y tiene la siguiente forma: a una masa fija, las galaxias con mayor TFE tienen menor metalicidad y para galaxias de baja masa esta dependencia con la TFE es más fuerte. Existen varios fenómenos que pueden alterar la abundancia química presente en una galaxia: el enriquecimiento es producido en primer lugar por la formación y la evolución estelar, la acreción de material pristino del medio intergaláctico que diluye y disminuye la metalicidad, y las corrientes de salida que eyectan material enriquecido al medio intergaláctico. Sin embargo, Sánchez y col. (2013) mostró que la correlación entre la TFE y la metalicidad (local e integrada) es producto de ambos, el sesgo de apertura introducido por los sondeos espectroscópicos tradicionales y porque la relación entre la metalicidad y la TFE es inducida a través de la relación de estas dos propiedades con la masa estelar. Las relaciones masa-TFE y masa-metalicidad han sido conocidas desde hace mucho tiempo y a estas alturas ya no se discuten. La primera es entendida en el marco del fenómeno de acreción de gas del medio intergaláctico, mientras que la segunda es entendida en la capacidad de las galaxias por retener los metales que producen.

Los resultados de Sánchez y col. de nuevo ponen en el tapete la necesidad de introducir fenómenos reguladores para explicar de manera convincente la ausencia de una relación TFE-metalicidad.

5. una visión teórica del ciclo de masa

FENÓMENOS RELEVANTES Y SUS ESCALAS. Los fenómenos dinámicos son los más fundamentales, así que la masa estelar (como aproximación de la masa bariónica) y su densidad superficial serán consideradas cantidades importantes en el ciclo de masa. La masa sola contiene información global sobre la dinámica de la galaxia, mientras que la densidad superficial contiene información local.

La capacidad del material bariónico en fase de gas para radiar su energía interna, define la escala temporal termodinámica en el que material del reservorio caliente se mueve al frío. La formación estelar define la escala típica en que el material del reservorio frío se mueve al reservorio estelar.

Ahora, dos preguntas interesantes después de haber visto lo que las observaciones indican y en el marco de estos procesos físicos son: ¿en qué escala temporal ocurre el enriquecimiento químico? y más importante aún ¿por qué este parece ser independiente de la TFE? En la siguiente figura está representado esquemáticamente el ciclo de masa bariónica en una galaxia. Tres reservorios son importantes: el estelar y los de gas caliente y frío. Por supuesto entre los tres habrá intercambio de materia debido a los procesos de enfriamiento del gas caliente,

la formación estelar y el *feedback* debido a vientos estelares y explosiones de supernova. Dependiendo de las propiedades dinámicas de la galaxias, una fracción del material expulsado por las estrellas puede ir directo al reservorio de gas caliente.

Debido a la evolución estelar, parte del material devuelto al MIE está enriquecido químicamente, de manera que las siguientes generaciones de estrellas tendrán una metalicidad cada vez más alta. Suponiendo conservación de la masa, el transporte de material de un reservorio a otro puede describirse mediante las ecuaciones de continuidad:

$$\dot{M}_\star = (1 - R)\psi \quad (1a)$$

$$\dot{M}_{\text{hot}} = -\dot{M}_{\text{cool}} + \beta\psi \quad (1b)$$

$$\dot{M}_{\text{cold}} = \dot{M}_{\text{cool}} - (1 - R + \beta)\psi \quad (1c)$$

$$\dot{M}_\star^Z = (1 - R)Z_{\text{cold}}\psi \quad (1d)$$

$$\dot{M}_{\text{hot}}^Z = -\dot{M}_{\text{cool}}Z_{\text{hot}} + (pe + \beta Z_{\text{cold}})\psi \quad (1e)$$

$$\dot{M}_{\text{cold}}^Z = \dot{M}_{\text{cool}}Z_{\text{hot}} + [p(1 - e) - (1 + \beta - R)Z_{\text{cold}}]\psi \quad (1f)$$

Ahora, estamos particularmente interesados en calcular la TEQ estelar y en fase de gas (frío), porque son las que podemos estimar a partir de las observaciones con relativa facilidad. Usando la relación $Z \equiv M^Z/M$ y las ecuaciones del ciclo de masa tenemos que:

$$\dot{Z}_\star = (1 - R)\frac{\psi}{M_\star}(Z_{\text{cold}} - Z_\star) \quad (2a)$$

$$\dot{Z}_{\text{cold}} = (Z_{\text{hot}} - Z_{\text{cold}})\frac{\dot{M}_{\text{cool}}}{M_{\text{cold}}} + p(1 - e)\frac{\psi}{M_{\text{cold}}} \quad (2b)$$

Es interesante notar que el enriquecimiento químico estelar ocurre en la misma escala temporal en que ocurre la formación estelar. En este caso, la dependencia con la densidad de masa se puede justificar directamente de la ley de KS, que supone que:

$$\tau_\star \equiv \frac{\Sigma_{\text{cold}}}{\Sigma_\psi} = (4 \pm 1) \times 10^9 \text{ años} \left(\frac{\Sigma_{\text{cold}}}{1 \text{ M}_\odot \text{ pc}^{-2}} \right)^{-(0,4 \pm 0,15)} \quad (3)$$

De manera que las conclusiones de González Delgado y col. (2014) cobran sentido en el terreno teórico: el enriquecimiento químico estelar depende de ambos, fenómenos locales ($\mu_\star \sim \Sigma_{\text{cold}}$) que regulan la evolución química y globales (M_\star) que modulan la amplitud de esta.

La TEQ del gas en el reservorio frío depende de la tasa de enfriamiento y de la TFE. Intuitivamente se espera que la escala temporal dinámica sea más corta que la escala térmica. Sin embargo, bajo ciertas circunstancias (densidad, temperatura y metalicidad) la escala temporal de enfriamiento puede ser más corta.

De hecho la dependencia de la escala temporal de enfriamiento con la densidad, la temperatura y la metalicidad del gas caliente es:

$$\tau_{\text{cool}} \approx 10 \times 10^9 \text{ años} \left(\frac{T_{\text{hot}}}{10^7 \text{ K}} \right) \left(\frac{10^{-3} \text{ cm}^{-3}}{\rho_{\text{hot}}} \right) \left(\frac{10^{-23} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}}{\Lambda(T_{\text{hot}}, Z_{\text{hot}})} \right) \quad (4)$$

Si comparamos ambas escalas temporales tenemos:

$$\frac{\tau_{\star}}{\tau_{\text{cool}}} \approx 0,4 \left(\frac{\Sigma_{\text{cold}}}{1 \text{ M}_{\odot} \text{ pc}^{-2}} \right)^{-0,4} \left(\frac{10^7}{T_{\text{hot}}} \right) \left(\frac{\rho_{\text{hot}}}{10^{-3} \text{ cm}^{-3}} \right) \left(\frac{\Lambda(T_{\text{hot}}, Z_{\text{hot}})}{10^{-23} \text{ erg cm}^3 \text{ s}^{-1}} \right)$$

En la figura se muestra el comportamiento de esta fracción variando los cuatro parámetros que interesan uno a la vez. Es claro que en la mayoría de los casos la escala temporal de formación estelar es más corta que la escala temporal de enfriamiento. La temperatura del reservorio caliente es el parámetro más sensible y que puede disminuir drásticamente la escala temporal de enfriamiento en el rango de plausibilidad. Es seguido por la metalicidad en el reservorio caliente y valores extremos de la densidad.

Las observaciones de que el gas está enriquecido en galaxias con formación estelar en un amplio rango de masa estelar ($10^{10} - 10^{12} \text{ M}_{\odot}$) mientras que las estrellas son comparativamente pobres en metales, respalda la hipótesis de que la formación estelar ocurre en una escala temporal larga en comparación con el enfriamiento de gas. Sin embargo resulta curioso que aunque en estas galaxias la formación estelar no es tan eficiente, el gas luzca tan enriquecido. Por ejemplo, una galaxia de $M_{\star} = 10^{10} \text{ M}_{\odot}$ forma una masa solar por año, mientras que galaxias más masivas pueden formar hasta diez masas solares por año (Sánchez y col., 2013). ¿Cómo llegó a enriquecerse el gas? Uno puede especular que estas galaxias sufrieron eventos de formación estelar importante en el pasado que pudo enriquecer el medio relativamente rápido, en cuyo caso ¿por qué la formación estelar ya no es tan eficiente ahora? Esta línea de razonamiento necesariamente conduce a que, aunque el enriquecimiento químico es catalizador para el enfriamiento del gas, no necesariamente promueve la formación de estrellas, especialmente de estrellas masivas capaces de enriquecer el MIE.

Uno puede irse por caminos más exóticos, especulando que estas galaxias obtienen el gas enriquecido del MIG y no por formación estelar. Lo cual está soportado por observaciones de gas enriquecido en el medio intracúmulo, sin embargo estas galaxias parecen haber formado sus estrellas pasivamente en una escala temporal que puede ser tan larga como la edad del universo. De manera que el enriquecimiento probablemente ha ocurrido *in situ*.

¿CAJA CERRADA? Durante la mayor parte de la discusión anterior se asumió implícitamente que las galaxias se comportan como cajas cerradas. Sin embargo el hecho de que el MIG se encuentre enriquecido en algunos casos definitivamente refuta esa hipótesis. La pregunta se reduce entonces a ¿es el fenómeno de *feedback* suficiente para remover efectivamente material enriquecido del MIE?

Intuitivamente uno espera que el enriquecimiento químico del MIG ocurra en una escala temporal más larga que la del enriquecimiento del MIE. Por lo tanto, el material acretado por los halos galácticos debe ser pobre en metales en comparación con el gas presente en el MIE. En este sentido, el material acretado actúa como un disolvente de la metalicidad en fase de gas, pero al mismo tiempo, de acuerdo con la discusión anterior, potencia la formación de estrellas contaminantes. En este escenario entonces, la tasa de enriquecimiento químico efectiva dependerá de la capacidad de las galaxias para retener el material enriquecido durante etapas de *feedback* estelar importantes. De nuevo, esto ocurre en una escala dinámica, esta vez global, probablemente relacionada con la masa estelar total.

Las galaxias de baja masa muestran una caída abrupta en la metalicidad en fase de gas en función de la masa, aún así esta es sistemáticamente mayor que la metalicidad estelar. Ya que para enriquecer el MIE, estas debieron haber formado estrellas contaminantes en algún momento, las cuales son además las únicas capaces de barrer material enriquecido fuera del halo, la única forma de que estas galaxias sean sistemáticamente pobres en metales es que nunca hayan formado este tipo de estrellas.

6. Prólogo — expectativas para el futuro

Los procesos locales responsables de regular la formación estelar y el enriquecimiento químico, son probablemente los tópicos más relevantes en la literatura extragaláctica en la actualidad. Mucho se ha avanzado desde el punto de vista observacional con los sondeos de IFS. En este sentido, CALIFA ha marcado un hito, pues ha puesto a la disposición de la comunidad científica espectroscopía de campo integrado de una muestra de ~ 600 galaxias distribuidas a lo largo de la clasificación de Hubble. Ahora podemos decir con seguridad que ambos, los efectos globales y los locales determinan la HFE en las galaxias y que el paradigma de caja cerrada comunmente adoptado para decir algo respecto al enriquecimiento químico, no tiene cabida de manera universal, no entre galaxias ni dentro de una misma galaxia. Quedan aún incertidumbres sobre el rol relativo que juegan la TFE, los vientos galácticos y el acrecimiento de material enriquecido presente en el medio intergaláctico. El *feedback* estelar se ha invocado para explicar la ausencia de metales en el medio interestelar (Tremonti y col., 2004; Kobayashi, Springel y White, 2007). Las variaciones en la función inicial de masa se han invocado como un mecanismo adicional para explicar la ausencia de metales en las galaxias menos masivas (Köppen, Weidner y Kroupa, 2007). Todos estos mecanismos se han medido tanto en observaciones como en simulaciones en estudios independientes, mas aún no son mutuamente excluyentes. Determinar cual(es) y bajo que circunstancias actúan para regular la HFE en las galaxias, será tópico de investigación por los próximos años.

7. ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU

El problema de adquisición de imágenes astronómicas es, en el sentido general, un problema de dos dimensiones espaciales y una dimensión espectral ($x, y; \lambda$). Desafortunadamente, debido a limitaciones de ingeniería, la mayoría de los esfuerzos que ofrecen una resolución espectral $R \sim 1000$, están limitados a una dimensión espacial, i. e. ($x; \lambda$). El uso del formato *long-slit* (rendija) resuelve parcialmente el problema de la dimensión perdida por espectrógrafos convencionales: si la dispersión de la luz proveniente de las fuentes se hace perpendicular al largo de la rendija, es posible en principio obtener espectros de distintas regiones de un mismo objeto extendido (e. g. una galaxia en el Universo local) o de varios objetos adyacentes en su proyección en el cielo. Existen sin embargo varias limitaciones que complican la adquisición efectiva de la segunda dimensión usando este formato, todas relacionadas con el hecho de que las componentes espaciales y la espectral están correlacionadas.

Las unidades de campo integrado (IFU en inglés Vanderriest, 1980) aparecieron en escena para resolver las limitaciones de resolución espacial de los previos intentos por registrar espectros de los objetos celestes. Vanderriest presentó un primer prototipo de IFU que consistía en un arreglo de fibras ópticas con forma hexagonal capaz de resolver espacialmente objetos en un campo de unas pocas decenas de segundos de arco ($\sim 20''$) y bajo brillo superficial. Tal dispositivo permitiría estudios de objetos cercanos siempre que la resolución espectral no fuera un factor importante para su desarrollo.

A mediados de los 90s aparecieron los primeros resultados obtenidos a partir del análisis de datos de IFU como fuera concebida por Courtes (1982) (véase Bacon y col., 1995, para un resumen de los hallazgos con el dispositivo TIGER).

- Primera medida de campos de velocidad estelar en la región central de galaxias cercanas (Bacon y col., 1995).
- Prueba de que las componentes de la cruz de Einstein (2237+0305) son en realidad imágenes múltiples del mismo objeto (Fitte y Adam, 1994).
- Se logró resolver y mapear fuentes de emisión y continuo en NGC 1275 (Ferruit y Pecontal, 1994).
- etc.

Las principales limitaciones eran el campo de visión, que seguía siendo demasiado pequeño para un estudio sistemático de una fuente extendida y la resolución espectral.

En los últimos 20 años las IFU han alcanzado madurez y han permitido estudios sistemáticos de muestras completas de galaxias en el universo local, abarcando en la mayoría de los casos la totalidad de la imagen proyectada de los objetos. En buena parte de lo que resta de este seminario hablaré de los resultados más importantes que estos sondeos han permitido y en qué sentido han cambiado los paradigmas en el contexto de la formación y la evolución de las galaxias.

8. SONDEOS CON IFU EN LA ACTUALIDAD

Las IFU de la actualidad (< 2012) presentan las siguientes ventajas frente a la primera generación de IFUs:

- Tienen grandes campos de visión, usualmente permitiendo abarcar la imagen proyectada de galaxias a $z \sim 0,05$
- Tienen una mejor función de respuesta que permite integrar espectros de fuentes más débiles en exposiciones cortas ~ 30 min.

. Aún así, dos principales desventajas permanecen: la limitada resolución espectral y solo una fuente por exposición puede observarse.

9. CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS

Los datos que se obtienen viven en el espacio (x, y, λ) , por lo tanto la información que permitiría construir mapas de determinada información espectral, a una resolución espacial fija, depende del rango y de la resolución espectral. Desde el punto de vista poblacional, probablemente los estudios más atractivos tienen que ver con la dependencia ambiental de las propiedades físicas de las galaxias, i. e., cómo cambian los promedios en la edad, la composición química, las propiedades del polvo, tasa de formación estelar (TFE), como función de la densidad bariónica, por ejemplo y a su vez como cambian estas propiedades de una galaxia a otra.

Por supuesto, como mostré en el seminario anterior, los resultados de sondeos con IFU han permitido el refinamiento de los modelos dinámicos de galaxias y una clasificación morfológica basada en las propiedades físicas de las galaxias.

El seminario anterior fue intencionalmente sesgado a galaxias tempranas porque la mayoría de los esfuerzos de los sondeos con IFU están también sesgados de la misma manera. Construir muestras de galaxias que permitan estudios cinemáticos sistemáticos necesariamente improndrá un sesgo hacia galaxias tempranas. Ahora mostraré los resultados de los estudios poblacionales, en los que la secuencia de Hubble se abarca en completitud. Por lo tanto los resultados que mostraré estarán claramente sesgados hacia los de CALIFA, que ya ha completado el sondeo de la muestra

Referencias

- Schmidt, M. (1959). "The Rate of Star Formation." En: *ApJ* 129, pág. 243.
- Vanderriest, C. (1980). "A fiber-optics dissector for spectroscopy of nebulosities around quasars and similar objects". En: *PASP* 92, págs. 858-862.
- Courtes, G. (1982). "An Integral Field Spectrograph (IFS) for Large Telescopes". En: *IAU Colloq. 67: Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes*. Ed. por C. M. Humphries. Vol. 92. Astrophysics and Space Science Library, pág. 123.
- Ferruit, P. y E. Pecontal (1994). "Sub-arcsecond resolution 2D spectrography of the central regions of NGC 1275 with TIGER". En: *A&A* 288, págs. 65-76.

- Fitte, C. y G. Adam (1994). “Sub-arcsecond integral field spectroscopy of the Einstein Cross 2237+0305: Lensing and microlensing effects”. En: *A&A* 282, págs. 11-18.
- Worthey, G. (1994). “Comprehensive stellar population models and the disentanglement of age and metallicity effects”. En: *ApJS* 95, págs. 107-149.
- Bacon, R. y col. (1995). “3D spectrography at high spatial resolution. I. Concept and realization of the integral field spectrograph TIGER.” En: *A&AS* 113, pág. 347.
- Kennicutt Jr., R. C. (1998). “The Global Schmidt Law in Star-forming Galaxies”. En: *ApJ* 498, págs. 541-552.
- Bell, E. F. y R. S. de Jong (2000). “The stellar populations of spiral galaxies”. En: *MNRAS* 312, págs. 497-520.
- Proctor, R. N. y A. E. Sansom (2002). “A comparison of stellar populations in galaxy spheroids across a wide range of Hubble types”. En: *MNRAS* 333, págs. 517-543.
- Terlevich, A. I. y D. A. Forbes (2002). “A catalogue and analysis of local galaxy ages and metallicities”. En: *MNRAS* 330, págs. 547-562.
- Brinchmann, J. y col. (2004). “The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe”. En: *MNRAS* 1179.4, págs. 1151-1179. issn: 00358711.
- Tremonti, C. A. y col. (2004). “The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey”. En: *ApJ* 613, págs. 898-913.
- Gallazzi, A. y col. (2005). “The ages and metallicities of galaxies in the local universe”. En: *MNRAS* 362, págs. 41-58.
- Kobayashi, C., V. Springel y S. D. M. White (2007). “Simulations of Cosmic Chemical Enrichment”. En: *MNRAS* 376, págs. 1465-1479.
- Köppen, J., C. Weidner y P. Kroupa (2007). “A possible origin of the mass-metallicity relation of galaxies”. En: *MNRAS* 375, págs. 673-684.
- Eminian, C. y col. (2008). “Physical interpretation of the near-infrared colours of low-redshift galaxies”. En: *MNRAS* 384, págs. 930-942.
- Lara-López, M. A. y col. (2010). “A fundamental plane for field star-forming galaxies”. En: *A&A* 521, L53, pág. L53.
- Mannucci, F. y col. (2010). “A fundamental relation between mass, star formation rate and metallicity in local and high-redshift galaxies”. En: *MNRAS* 408, págs. 2115-2127.
- Rosales-Ortega, F. F. y col. (2012). “A New Scaling Relation for H II Regions in Spiral Galaxies: Unveiling the True Nature of the Mass-Metallicity Relation”. En: *ApJ* 756, L31, pág. L31.
- Sánchez, S. F. y col. (2012). “CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation”. En: *A&A* 538, A8, A8.
- Conroy, C. (2013). “Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies”. En: *ARA&A* 51, págs. 393-455.
- Sánchez, S. F. y col. (2013). “Mass-metallicity relation explored with CALIFA. I. Is there a dependence on the star-formation rate?” En: *A&A* 554, A58, A58.
- Zibetti, S. y col. (2013). “Near-infrared spectroscopy of post-starburst galaxies: a limited impact of TP-AGB stars on galaxy spectral energy distributions”. En: *MNRAS* 428, págs. 1479-1497.
- González Delgado, R. M. y col. (2014). “Insights on the Stellar Mass-Metallicity Relation from the CALIFA Survey”. En: *ApJ* 791, L16, pág. L16.

- González Delgado, R. M. y col. (2014). “The star formation history of CALIFA galaxies: Radial structures”. En: *A&A* 562, A47, A47.
- Sorba, R. y M. Sawicki (2015). “Missing stellar mass in SED fitting: spatially unresolved photometry can underestimate galaxy masses”. En: *MNRAS* 452, págs. 235-245.
- Sánchez, S. F. y col. (2016). “CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. IV. Third public data release”. En: *A&A* 594, A36, A36.