

La era de la resolución espacial en sondeos de galaxias

Alfredo J. Mejía^{1,2}

¹Posgrado de Física Fundamental
Universidad de Los Andes

²Centro de Investigaciones de Astronomía

10 de abril de 2017

MOTIVACIÓN I

Hoy día existen sondeos que permiten resolver espacialmente a las galaxias en el universo local, pero ¿qué nos ha llevado a idear esta nueva era de la exploración de nuestro universo?

Las galaxias hasta $z \sim 1$ pueden resolverse como objetos extendidos en una imagen astronómica, sin embargo los sondeos espectroscópicos en su mayoría están limitados a una apertura fija y por lo general integran en una pequeña región de la imagen producida por las galaxias más cercanas debido a problemas de ingeniería (mostrar una imagen ejemplo de una galaxia del SDSS, con su z y la apertura correspondiente). La fotometría, por otro lado, permite integrar una imagen producida por una galaxia en su totalidad, más aún, permite variar la apertura dentro de la cual se mide el brillo integrado, pues una vez producida la imagen la forma en que esta se estudia no ofrece límites. Sin embargo, la fotometría tradicional se ha limitado a integrar la imagen en su totalidad o dentro de una

MOTIVACIÓN II

apertura variable, dependiendo de la extensión y/o perfil de la fuente que la produce (e.g. radio Petrosian, el perfil de brillo).

Ahora somos conscientes que en la formación y evolución de las galaxias intervienen una variedad de fenómenos físicos que tienen lugar en distintas escalas temporales y espaciales. Aunque la disponibilidad de observaciones profundas del cielo han permitido estudiar la evolución de las galaxias en escalas temporales del orden de la mitad de la edad de universo, apenas estamos rozando la superficie de lo que podemos hacer con sondeos que ofrecen resolución espacial.

En este seminario les hablaré de lo que hemos conseguido usando los sondeos con unidades de campo integrado actuales y las perspectivas con los próximos sondeos del mismo tipo.

ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU I

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 problemas 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.

ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU II

Las unidades de campo integrado (**Vanderriest1980**) aparecieron en escena para resolver las limitaciones de resolución espacial de los previos intentos por registrar espectros de los objetos celestes. **Vanderriest1980** 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 90's aparecieron los primeros resultados obtenidos a partir del análisis de datos de IFU como fuera concebida por **Courtes1982** (**Beacon1995**).

- Primera medida de campos de velocidad estelar en la región central de galaxias cercanas (**Bacon1994**).
- Prueba de que las componentes de la cruz de Einstein (2237+0305) son en realidad imágenes múltiples del mismo objeto (**Fitte1994**).

ANTECEDENTES DE SONDEOS CON IFU III

- Se logró resolver y mapear fuentes de emisión y continuo en NGC 1275 (Ferruit1994).
- etc.

Las principales limitaciones eran el campo de visión, que seguía siendo demasiado pequeño para un estudio de la sistemática 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.

SONDEOS CON IFU EN LA ACTUALIDAD I

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.

CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS I

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

CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS II

sistemáticos necesariamente impondrá 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

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS I

Primero es bueno recapitular rápidamente qué sabemos de las propiedades globales de las galaxias y de las posibles correlaciones que existen entre estas:

RELACIÓN EDAD–METALICIDAD. Esta relación se ha observado entre la edad media y la metalicidad media ponderadas por el flujo integrado de la galaxia, que son trazadores de la HFE reciente de las galaxias. Fue primero observada en galaxias tempranas, aunque la fuerte degeneración entre la ambas propiedades físicas, i. e. la degeneración edad–metalicidad, 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 (**Proctor2002; Terlevich2002**), 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](#)) presento un análisis de la relación edad–metalicidad que incluía galaxias

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS II

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 eran también dominadas por poblaciones más jóvenes y menos ricas en metales con una dispersión intrínseca más grande (i. e. el rango dinámico de las distribuciones de edad y de metalicidad por bin de masa eran más grandes), mientras que las más masivas eran dominadas por poblaciones más viejas y más ricas en metales (con dispersión intrínseca 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

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS III

evidencia que la HFE presente podría depender de parámetros estructurales y/o fenómenos locales en estos sistemas. Es importante notar, sin embargo, las galaxias menos masivas, por lo general dominadas por galaxias tardías, 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](#)).

RELACIÓN MASA–METALICIDAD. 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 en unidades de $12 + \log \text{O}/\text{H}$ medida de la emisión del gas en varias líneas prohibidas (i.e. usando trazadores de la metalicidad en el medio interestelar), encontró una estrecha relación entre la metalicidad y la masa estelar en galaxias con formación estelar, donde las galaxias menos masivas eran también menos ricas en metales, mientras que las más masivas eran más ricas en metales,

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS IV

un resultado en acuerdo con estudios previos, en los que se usaba la luminosidad como *proxy* para la masa estelar. Dos hipótesis competían para explicar el origen físico de la relación masa-metalicidad. Si es que las galaxias más masivas forman más una fracción de estrellas mayor que sus contrapartes menos masivas, en el mismo rango de tiempo, entonces la relación indica una secuencia de astración, i.e. las estrellas formadas en las galaxias más masivas enriquecen el medio más eficientemente, mientras que las galaxias menos masivas encapsulan los metales 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 (**Bell2000**) y podría explicar la relación masa-metalicidad como que las galaxias menos masivas están menos

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS V

enriquecidas en metales. 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 está enriquecidos 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:

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

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 la 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

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS VI

bariónica. Sin embargo, lo que se observa es que y_{efectivo} decrece con la masa bariónica. Este hallazgo sugiere que la relación masa-metalicidad tiene un origen local, en el sentido de que depende de la distribución de la materia total en las galaxias. 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.

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:

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS VII

Incertidumbres observacionales. Probablemente el efecto sistemático introducido por los sondeos espectroscópicos convencionales es el más importante, me refiero al 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. Las galaxias tardías por otro lado, 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

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS VIII

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

RELACIONES DE ESCALA – ANTES DE IFS IX

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 (**Eminian2008**). 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](#)).

RELACIONES DE ESCALA – EN LA ERA DE LA IFS I

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 (**Sanchez2016**; Sánchez y col., [2012](#)) 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 $\sim 3000\text{--}7000 \text{ \AA}$ 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 presentaban una oportunidad inigualable. Los estudios que buscaban desentrañar el carácter local de las relaciones de escala no tardaron en aparecer:

RELACIONES DE ESCALA – EN LA ERA DE LA IFS II

RELACIÓN MASA–METALICIDAD. **Rosales2012** estudiaron la relación entre la masa, la metalicidad y la tasa de TFE específica en 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. **Rosales2012** 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 forma 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.

RELACIONES DE ESCALA – EN LA ERA DE LA IFS III

RELACIÓN MASA–METALICIDAD–TFE. **Rosales2012** encontraron que existía una anticorrelación entre la relación masa–metalicidad y la TFE. Esta relación, también llamada relación fundamental (o plano fundamental) masa–metalicidad ya había sido estudiada (**Lara-Lopez2010**). La existencia de esta relación implica lo siguiente: a una misma masa, 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 estelar, la acreción de material enriquecido del medio intergaláctico que diluye y disminuye la metalicidad, y las corrientes de salida que eyectan material enriquecido al medio intergaláctico. **Sanchez2013** mostró que la correlación entre la TFE (específica) y la relación masa–metalicidad (local e integrada) es producto de ambos, el sesgo de apertura introducido por los sondeos espectroscópicos

RELACIONES DE ESCALA – EN LA ERA DE LA IFS IV

tradicionales y por la correlación que existe entre la (densidad superficial de) masa y la TFE (específica). Estos resultados son consistentes con que las galaxias dominadas por disco evolucionan de forma secular, como cajas cerradas, donde el reciclaje tiene lugar en escalas temporales más cortas que las dinámicas (e.g. correspondientes a vientos galácticos).

Prólogo – efectos locales *versus* globales I

Gonzalez2014a estudió los gradientes poblacionales en galaxias dominadas por discos y en galaxias dominadas por esferoides. En el mismo estudio concluyen que la HFE puede ser modulada por la masa estelar global o por la densidad de masa estelar, dependiendo de si la galaxia es dominada por una componente esferoidal o por un disco. **Gonzalez2014b** estudió el rol de los efectos locales en la relación masa-metalicidad, en el que ambos, la componente estelar y la componente de gas eran considerados. 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. La relación masa-metalicidad como función de la distancia al centro de las galaxias mostraba claramente una dispersión en metalicidad que era claramente modulada por los efectos globales medidos por la masa estelar integrada de las galaxias. A nivel local, por otro lado la densidad superficial de masa estelar correlaciona con la metalicidad estelar,

Prólogo – efectos locales *versus* globales II

como encontró **Sanchez2013**. Más interesante aún, la dependencia de la relación masa-metalicidad depende del radio dentro de la galaxia donde, en acuerdo con los resultados en **Gonzalez2014a**, 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.

Prólogo – Expectativas para el futuro I

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 distribuídas 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 (**Kobayashi2007**; Tremonti y col., [2004](#)). Las

Prólogo – Expectativas para el futuro II

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 (**Koppen2007**). Todos estos mecanismos se ha 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.

Referencias I

- Worthey, G. (1994). "Comprehensive stellar population models and the disentanglement of age and metallicity effects". En: *ApJS* 95, págs. 107–149.
- 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.
- 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.
- 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.

Referencias II

- 📄 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.