

¿Qué sabemos de las galaxias?: Comparación de propiedades integradas vs. espacialmente resueltas usando espectroscopía de campo integral

What do we know about galaxies?: Comparison between integrated properties vs. spatially-resolved using integrated field spectroscopy

J. S. Castellanos-Durán ^a ^{*}, F. F. Rosales-Ortega ^b.

^aObservatorio Astronómico Nacional, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 45 # 26-85 Bogotá D.C., Colombia.

^bInstituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Luis E. Erro 1, 72840 Tonantzintla, Puebla, Mexico

Aceptado Diciembre 2014; Publicado en línea Marzo 2015

ISSN 2256-3830.

Resumen

Desarrollos recientes en la tecnología están liderando una nueva generación de observaciones astronómicas, revolucionando así nuestro conocimiento acerca del Universo. Una de estas nuevas herramientas es la Espectroscopía de Campo Integral (EPI), la cual provee a los astrónomos información acerca de la evolución de las galaxias, su enriquecimiento en metales, sus procesos de emisión/absorción, todas resueltas en 2 dimensiones. En este trabajo, estudiamos 43 galaxias del universo cercano usando datos IFS tomados por el catálogo PINGS (Rosales-Ortega et al., 2010 [1]) y de la muestra preliminar al catálogo CALIFA (Mármol-Queraltó et al., 2011 [2]). Ambos catálogos fueron observados con el instrumento PPKA en el Observatorio Calar Alto, España. Primero comparamos los espectros integrados de los datos IFS con aquellos que fueron medidos por la técnica de escaneo (Moustakas & Kennicutt, 2006 [3]) concluyendo que las discrepancias entre estos dos métodos son menores que los errores observacionales intrínsecos. Integramos los espectros IFS para obtener uno representativo de cada galaxia, y así, comparamos las propiedades integradas con aquellas resueltas espacialmente, como lo son las regiones HII y el gas difuso. Por último, se probaron diferentes aperturas circulares variando su radio, simulando diferentes corrimientos al rojo, para estudiar cómo cambian son las propiedades físicas de galaxias.

Palabras Claves: Espectroscopía de Campo Integral, Extragaláctico, procesos de líneas.

Abstract

Recent developments in technology are leading to a new generation on astronomical observations, revolutionizing our knowledge about the Universe. One of these new tools is the Integral Field Spectroscopy technique (IFS), which provide to astronomers important clues about galaxy evolution, metal enrichment, emission/absorption processes, all resolved in 2 dimensions. In this work, we study 43 galaxies in the nearby universe using IFS data from the PINGS survey (Rosales-Ortega et al., 2010 [1]) and from the early sample of the CALIFA Survey (Mármol-Queraltó et al., 2011 [2]), both observed with the PPKA instrument at Calar Alto observatory, Spain. First we compare the integrated spectra from IFS data to those using drift scanning techniques (Moustakas & Kennicutt, 2006 [3]) concluding that discrepancies between this two methods are less than the observational intrinsic errors. We integrate the IFS spectra to obtain a

* jscastellanosd@unal.edu.co

representative spectrum for each galaxy, and then, we compare the integrated with the spatially-resolved properties, such as HII regions and diffuse gas. Ultimately, we test different circular apertures with varying radii, simulating different redshifts, in order to study how the integrated physical properties of the galaxies changed or can be recovered compared with the spatially-resolved information provided by IFU.

Keywords: Integral field spectroscopy, Extragalactic, line processes.

1. Introducción

El estudio de las propiedades cinemáticas, los procesos de emisión y absorción, la composición estelar; así como las propiedades químicas en las galaxias ha sido desarrollado haciendo pasar la luz que nos llega de estos objetos a través rejillas de difracción y estudiando las propiedades físicas que se pueden inferir a partir de sus espectros. Utilizando esta técnica se ha podido desarrollar grandes *surveys* como lo es el Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [4] que nos ha ayudado ampliar el conocimiento que tenemos sobre las galaxias, su entorno y el universo en general.

Las galaxias son sistemas extragalácticos compuestos de estrellas, gas, polvo, medio interestelar, energía y materia oscura atados gravitacionalmente. Al observar las galaxias se ha encontrado que existe una gran variedad de ellas que se pueden catalogar por sus características morfológicas, su cinemática o por los procesos de emisión/absorción que ocurren en ellas. En la clasificación morfológica de Hubble se encuentran las galaxias elípticas, espirales, lenticulares e irregulares. Mientras que la clasificación dada por las características y procesos físicos deducidos de sus espectros se encuentran las galaxias con gran producción de estrellas (*Starburst*), los núcleos activos de galaxias (AGN) como las Seyfert I y II, las LINER, los Quasares, los Blazares y las radio galaxias.

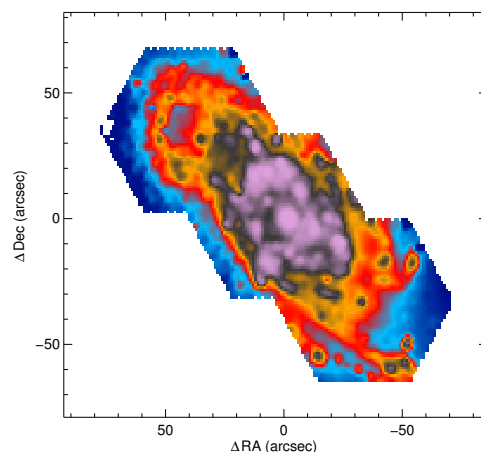


Fig. 1. Imagen IFU usando el filtro H α de la galaxia NGC 6643 observada con el instrumento PPAK [5] en el telescopio de 3.5 metros en Calar Alto, España.

Las galaxias *cercanas* pueden subtender tamaños angulares sobre la esfera celeste hasta de algunos minutos de arco², lo que nos permite alcanzar alta resolución espacial de sus estructuras internas de algunos cientos de parsecs mediante el uso de grandes telescopios. Sin embargo, a la hora de usar una sola rejilla de difracción o fibra para medir el espectro de una galaxia (técnica usada por el SDSS) se obtiene información integrada proveniente de las diversas zonas que componen la galaxia, lo que conlleva a que la información obtenida de los procesos físico sea el *promedio* de cada uno de los procesos que se llevan a cabo en localidades específicas de las galaxias. Para solventar estos problemas se desarrolló en las dos últimas décadas una técnica conocida como la espectroscopía de campo integral (IFU, por sus siglas en ingles), que permite resolver espacial y espectralmente la información que recibimos

de las galaxias. En la figura 1 se presenta la imagen de la galaxia NGC 6643 centrada en $H\alpha$ y con un filtro de 80 \AA tomada con la técnica IFU en el telescopio de 3.5 en Calar Alto, España.

En este trabajo se presenta un análisis observacional de las propiedades espacialmente resueltas e integradas de galaxias del universo cercano usando los datos de la muestra preliminar de los *surveys* CALIFA [6], PINGS [1] y técnica de escaneo [3].

2. Datos observacionales

Se analizaron 39 galaxias con corrimiento al rojo entre $0.00173 < z < 0.025$ observadas para la muestra estudio del Calar Alto Legacy Integral Field Area survey (CALIFA) [7] y el PPAK IFS Nearby Galaxies Survey (PINGS) [1] con el instrumento PPAK [5] montado en el telescopio de 3.5 metros en observatorio Calar Alto, España. El rango espectral utilizado es de $\lambda\lambda 3620 - 7056 \text{ \AA}$, con una resolución espectral de $\sim 10.7 \text{ \AA FWHM}$. La descripción completa de las propiedades generales de las galaxias estudiadas se encuentra en [1,2].

Adicionalmente, 8 de las galaxias de la muestra IFU cuentan también con espectros obtenidos por medio la técnica de barrido [3], la cual consiste en realizar un pseudo-IFU tomando una serie espectros con un slit haciendo un barrido a lo largo de la galaxia. El rango espectral en este survey es $\lambda\lambda 3600 - 6900$, con una resolución de $\sim 8 \text{ \AA FWHM}$ (ver figura 2). Todos el análisis observacional se realizó usando el software especializado en datos IFU PINGSOFT [8].

3. IFU Vs. La técnica de barrido

La técnica barrido fue una alternativa para poder obtener resolución espacial en galaxias antes de ser desarrollada completamente la espectroscopía de campo integral. Por esta razón es pertinente conocer si estas dos técnicas conducen a resultados físicos comparables.

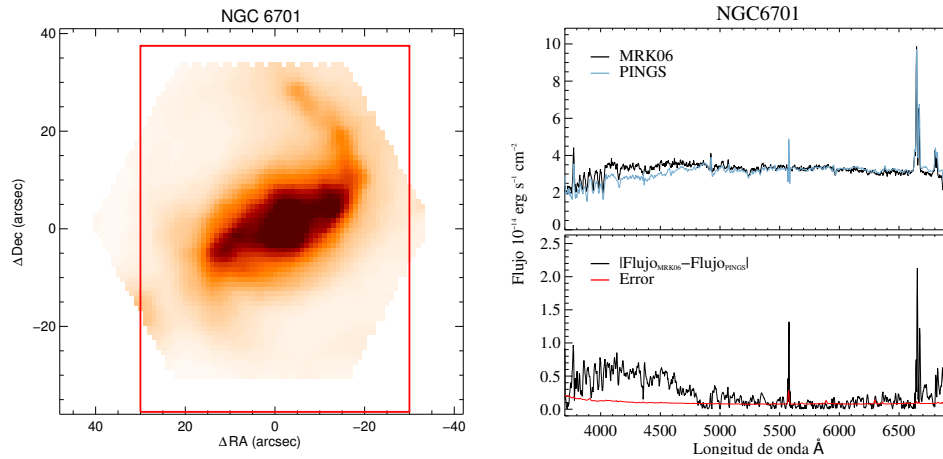


Fig. 2. *Izquierda*: Imagen de NGC 6701 tomada con el instrumento PPAK [5] en el telescopio de 3.5 metros en Calar Alto, España. El rectángulo rojo representa al campo de observación del pseudo IFU tomada con la técnica de escaneo. *Derecha*: En panel superior se encuentran los espectros integrados de NGC 6701 tomados con los surveys PINGS (azul) y de escaneo (negro). En la parte inferior se presenta la resta en flujos de estos dos espectros (negro) y los errores asociados a la medida (rojo).

Se analizaron observaciones del tipo IFU para 8 galaxias de la muestra, que a su vez fueron observadas por la técnica de barrido (ver figura 2, izquierda). Para ello se integraron los espectros provenientes de estas técnica y se compararon con los errores sistemáticos de la observación (ver figura 2, derecha). Se encontró que en efecto ambas técnicas son comparables teniendo en cuenta que: (i) la discrepancia entre ambas técnicas es menor que los errores observaciones intrínsecos como lo es la calibración de flujo, los errores estadísticos, la diferencia entre *seeing* y la incertidumbre en el coeficiente de absorción. (ii) Mientras la diferencia entre los campo observados entre estas

dos técnicas no sea muy grande, estas son comparables; puesto al observar con aperturas se obtiene información de procesos físicos emitidos en distintas zonas de la galaxia como ocurre con los datos de NGC 628, donde la técnica de barrido sólo logra observar el núcleo de NGC 628 a diferencia de los datos del survey PINGS que cubren completamente la galaxia con el mosaico más grande obtenido hasta la actualidad.

4. Propiedades de emisión en las regiones HII

Las regiones HII son zonas de formación estelar, donde el gas se encuentra parcialmente ionizado y que deben su nombre a la gran cantidad de hidrógeno que las compone. Para determinar las regiones HII dentro de nuestra muestra de galaxias se usó el código HIIEXPLORER [7] que se basa en dos propiedades de las regiones HII: (i) Estas estructuras están aisladas y presentan una fuerte emisión del gas que está sobre la emisión del continuo. (ii) El tamaño típico de las regiones HII es del orden de algunos cientos de parsecs.

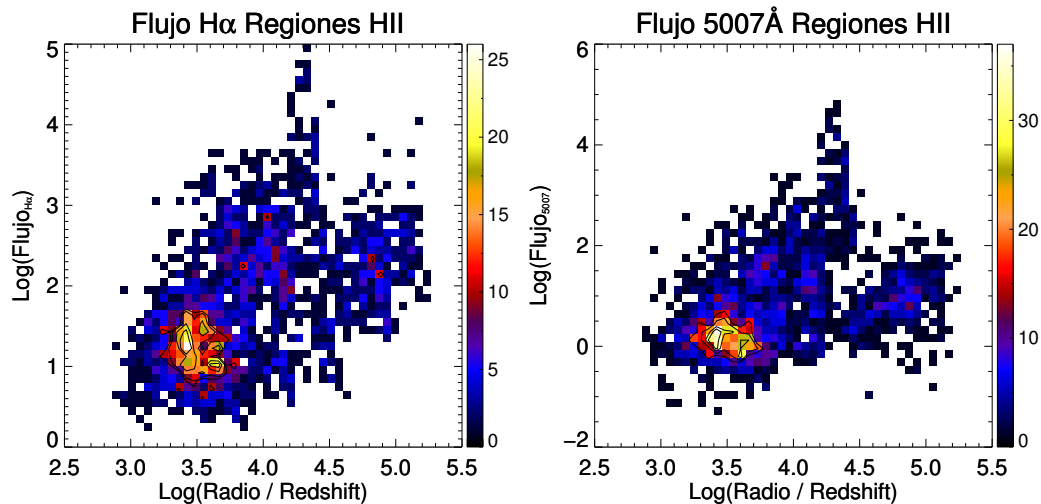


Fig. 3. Diagrama de densidad del flujo de $H\alpha$ (izquierda) y $[OIII]$ (derecha) de todas las regiones HII de la muestra. El radio es medido desde el centro de cada galaxia, tomando como referencia la zona más brillante en el mapa de $H\alpha$, y está dividido por el corrimiento al rojo (z) que es un parámetro relacionado con la distancia que existe entre de cada galaxia y el observador.

Se midieron las líneas de emisión de todas las regiones HII luego de haber sustraído el continuo estelar mediante el software FIT3D [9], el cual encuentra el mejor ajuste dentro de una base de espectros estelares con una gran espectro de edades y metalicidades (ver figura 3). Se encontró que existe una tendencia a encontrar regiones HII cercano a 3.5 radios/ z y las regiones más externas presentan una mayor emisión.

Se comparó la emisión de $H\alpha$ de las regiones HII con respecto a la emisión de $H\alpha$ integrada de toda la galaxia (ver figura 4, izquierda). Esta relación se esperaría que fuese uno a uno puesto que la locación predominante para la emisión de la primera transición de Balmer son las regiones HII. Se encontró que para galaxias que tienen un tamaño angular ~ 1 arcmin² (campo de observación del PPAK) siguen la relación esperada. Sin embargo, las galaxias de mayor tamaño angular observadas divergen de esta relación, como lo son las observadas por el survey PINGS o como NGC 4625 donde los datos IFU sólo alcanzan a cubrir su estructura interior. De esta manera, se infiere que a medida que la resolución espacial se aumenta y se puede resolver estructuras más pequeñas dentro de la galaxia, la intervención de otros procesos físicos como lo es el gas difuso comienzan a ganar preponderancia en la emisión de la galaxias.

Para las propiedades de emisión locales como los son los anchos equivalentes de la línea y su flujo, se realizaron aperturas circulares en los datos IFU para así poder integrar los espectros provenientes de las galaxias, comenzando desde su centro hasta contener a toda la galaxia. Este procedimiento se aplicó a los datos en cuatro casos: (i) El

cubo de datos sin ninguna modificación. (ii) Se corrigió el cubo de datos por las velocidades propias del gas en cada pixel. (iii) Las regiones HII encontradas por HIIEXPLORER. (iv) Regiones de gas difuso, i.e., El cubo de datos sustrayendo las regiones HII.

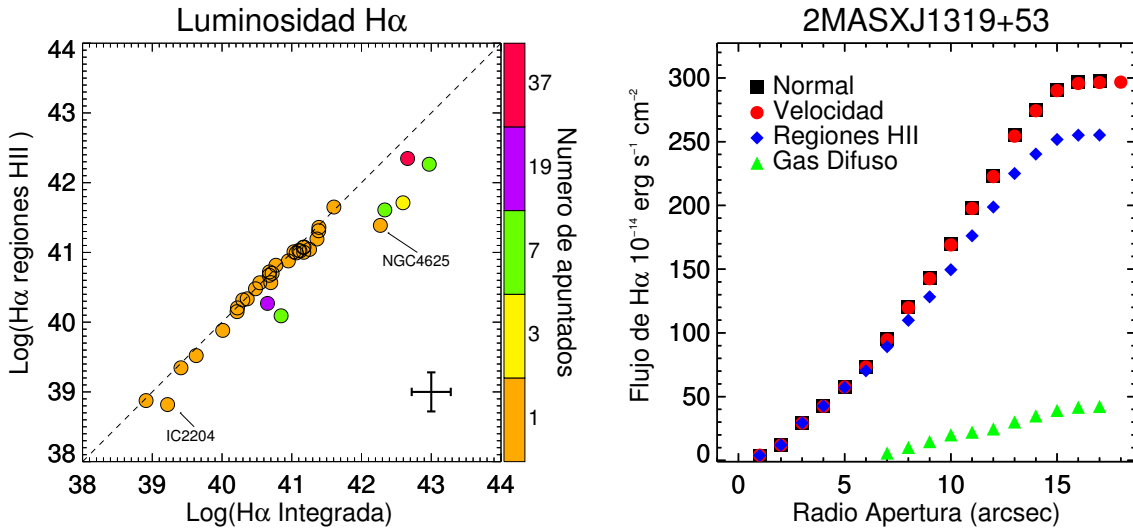


Fig. 4. *Izquierda*: El flujo de H α dedido de las regiones HII con respecto al flujo de H α medido de el espectro integrado de toda la galaxia. El patrón de colores indica la cantidad de apuntados (65 x 74 arcsec) que fueron usados en el survey PINGS para poder observar completamente dicha galaxia; donde cada uno de ellos tiene un tamaño aproximado de ~ 1 arcmin². La relación 1:1 se presenta con la línea punteada. *Derecha*: Flujo integrado de H α de la galaxia 2MASXJ13193595+5330102 tomando aperturas circulares desde 1 arcsec hasta completar toda la galaxia, variando su tamaño en 1 arcsec.

El flujo de H α de la galaxia 2MASXJ13193595+5330102 para estos cuatro casos se presenta en panel derecho de la figura 4. Observa que la suma de las contribuciones integradas del gas difuso, más las provenientes de las regiones HII reconstruyen el flujo total. Debido a la fuerte emisión de las regiones HII, la contribución del gas difuso comienza a ser distinguible con respecto del que proviene de las regiones HII al alejarse del núcleo de la galaxia. Este efecto podría asociarse a la resolución espacial con la que se cuenta en la actualidad no es suficiente para resolver regiones más pequeñas dentro de la galaxia.

5. Conclusiones

Se estudiaron 38 galaxias observadas entre los surveys PINGS, la muestra inicial a CALIFA y el survey de barrido. Se analizaron tanto las propiedades de emisión espacialmente resueltas así como las integradas. Se encontró que los resultados de propiedades integradas tomando observaciones IFU (e.g. PINGS) o pseudo-IFU (técnica de escaneo) son comparables dentro de los errores observacionales. De igual manera, se encuentra una influencia de la resolución espacial en la emisión de H α en las galaxias de la muestra, lo que indicaría que las contribuciones del gas difuso dentro de una galaxia empiezan a tener influencia en el espectro observado a medida que se logra resolver más en detalle regiones dentro de las galaxias. De esta manera, los nuevos instrumentos con alta resolución tanto espectral y espacial como el Multi Unit Spectroscopic Explorer (MUSE) de ESO, el James Webb Space Telescope (JWST) de NASA y los grandes surveys como CALIFA y MANGA nos permitirán estudiar los procesos físicos que sólo pueden ocurrir en los grandes laboratorios astrofísicos.

6. Agradecimientos

Este trabajo se realizó gracias al programa Summer Internship in Astrophysics and Astronomical Instrumentation at INAOE Puebla, México y con la ayuda imprescindible de su director de entonces Dr. Divakara Mayya.

References

- [1] F. F. Rosales-Ortega, R. C. Kennicutt, S. F. Sánchez, A. I. Díaz, A. Pasquali, B. D. Johnson, and C. N. Hao. PINGS: the PPAK IFS Nearby Galaxies Survey. *MNRAS*, 405:735–758, June 2010.
- [2] E. Mármol-Queraltó, S. F. Sánchez, R. A. Marino, D. Mast, K. Viironen, A. Gil de Paz, J. Iglesias-Páramo, F. F. Rosales-Ortega, and J. M. Vilchez. Integral field spectroscopy of a sample of nearby galaxies. I. Sample, observations, and data reduction. *A&A*, 534:A8, October 2011.
- [3] John Moustakas and Robert C Kennicutt. An integrated spectrophotometric survey of nearby star-forming galaxies. *ApJS*, 164:81, May 2006.
- [4] Donald G York, J Adelman, John E Anderson, et al. The sloan digital sky survey: Technical summary. *AJ*, 120:1579, Sep 2000.
- [5] M. M. Roth, A. Kelz, T. Fechner, T. Hahn, S.-M. Bauer, T. Becker, P. Böhm, L. Christensen, F. Dionies, J. Paschke, E. Popow, D. Wolter, J. Schmoll, U. Laux, and W. Altmann. PMAS: The Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer. I. Design, Manufacture, and Performance. *PASP*, 117:620–642, June 2005.
- [6] S. F. Sánchez, R. C. Kennicutt, A. Gil de Paz, G. van de Ven, J. M. Vilchez, L. Wisotzki, C. J. Walcher, D. Mast, J. A. L. Aguerri, S. Albiol-Pérez, A. Alonso-Herrero, J. Alves, J. Bakos, T. Bartáková, J. Bland-Hawthorn, A. Boselli, D. J. Bomans, A. Castillo-Morales, C. Cortijo-Ferrero, A. de Lorenzo-Cáceres, A. Del Olmo, R.-J. Dettmar, A. Díaz, S. Ellis, J. Falcón-Barroso, H. Flores, A. Gallazzi, B. García-Lorenzo, R. González Delgado, N. Gruel, T. Haines, C. Hao, B. Husemann, J. Iglésias-Páramo, K. Jahnke, B. Johnson, B. Jungwiert, V. Kalinova, C. Kehrig, D. Kupko, Á. R. López-Sánchez, M. Lyubenova, R. A. Marino, E. Mármol-Queraltó, I. Márquez, J. Masegosa, S. Meidt, J. Mendez-Abreu, A. Monreal-Ibero, C. Montijo, A. M. Mourão, G. Palacios-Navarro, P. Papaderos, A. Pasquali, R. Peletier, E. Pérez, I. Pérez, A. Quirrenbach, M. Relaño, F. F. Rosales-Ortega, M. M. Roth, T. Ruiz-Lara, P. Sánchez-Blázquez, C. Sengupta, R. Singh, V. Stanishev, S. C. Trager, A. Vazdekis, K. Viironen, V. Wild, S. Zibetti, and B. Ziegler. CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation. *A&A*, 538:A8, February 2012.
- [7] S. F. Sánchez, F. F. Rosales-Ortega, R. A. Marino, J. Iglesias-Páramo, J. M. Vilchez, R. C. Kennicutt, A. I. Díaz, D. Mast, A. Monreal-Ibero, R. García-Benito, J. Bland-Hawthorn, E. Pérez, R. González Delgado, B. Husemann, Á. R. López-Sánchez, R. Cid Fernandes, C. Kehrig, C. J. Walcher, A. Gil de Paz, and S. Ellis. Integral field spectroscopy of a sample of nearby galaxies. II. Properties of the H ii regions. *A&A*, 546:A2, October 2012.
- [8] F. F. Rosales-Ortega. PINGS OFT: An IDL visualisation and manipulation tool for integral field spectroscopic data. *New A*, 16:220–228, April 2011.
- [9] S. F. Sánchez, B. García-Lorenzo, K. Jahnke, et al. A new technique for decoupling the host and nuclear spectra of type i agns using integral field spectroscopy. *AN*, 327:167, Mar 2006.