

INFORME PRELIMINAR SOBRE EL ESTUDIO DE LA GALAXIA Y LAS GALAXIAS EXTERNAS PARA LA PRÓXIMA DÉCADA 2015-2025.

Elaborado por el panel formado por:

Ángeles I. Díaz (Coordinadora)
Emilio Alfaro, Francesca Figueras, Santiago García Burillo, Javier Gorgas, Isabel Márquez,
Ismael Pérez Fournón

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Interrogantes abiertos al Siglo XXI

- 1.1. Formación y evolución de las galaxias
 - 1.1.1. Poblaciones estelares y evolución química y dinámica de galaxias
 - 1.1.2. Galaxias activas (AGNs, QSOs)
 - 1.1.3. Formación estelar y medio interestelar en galaxias. Astro-química extragaláctica.
 - 1.1.4. Grupos y cúmulos de galaxias. Influencia del entorno en la evolución de las galaxias
- 1.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos
 - 1.2.1. Arqueología galáctica
 - 1.2.2. Estructura y dinámica del disco galáctico
 - 1.2.3. El centro galáctico
 - 1.2.4. Formación, evolución y disrupción de sistemas estelares

2. Instrumentación requerida para alcanzar los objetivos

- 2.1. Observación desde Tierra
 - 2.1.1. Observaciones multi-frecuencia con gran campo de visión: desde el UV hasta las radio frecuencias
 - 2.1.2. Espectroscopía bi-dimensional: espectroscopía multi-objeto (MOS) y espectroscopía de campo integral (IFS)
 - 2.1.3. Imagen y espectroscopía infrarroja (IR)
 - 2.1.4. Cartografiados espectroscópicos de la Galaxia 2015-2025
- 2.2. Observación desde el espacio
 - 2.2.1. Observatorios espaciales en funcionamiento y en fase de desarrollo
 - 2.2.2. Planes de nuevas misiones espaciales

3. Contribución española a grandes colaboraciones internacionales

- 3.1. ESA – Astrofísica desde el espacio
 - 3.1.1. La era de Gaia
 - 3.1.2. JWST
- 3.2. ESO y grandes infraestructuras en desarrollo
 - 3.2.1. ALMA
 - 3.2.2. E-ELT
 - 3.2.3. Square Kilometeric Array (SKA)

4. Papel clave de las ICTS españolas

1. INTERROGANTES ABIERTOS AL SIGLO XXI

1.1. Formación y evolución de las galaxias

1.1.1. Poblaciones estelares y evolución química y dinámica de galaxias

- ¿Cómo se formaron las galaxias tras la época de re-ionización? ¿Cuál es el origen de la actual secuencia de Hubble?
- ¿Es el modelo cosmológico estándar (LCDM) compatible con el actual conjunto de datos? ¿Qué restricciones se pueden imponer a este modelo desde el punto de vista observacional?
- ¿Qué sucede dentro de las galaxias en el universo temprano y cómo se compara con lo que conocemos de las galaxias en el universo cercano donde podemos observar las velocidades de las estrellas y el gas en gran detalle?
- ¿Cuáles son las escalas temporales de consumo de gas y cuáles son las eficiencias de formación estelar en diferentes poblaciones de galaxias?
- ¿Cuál es la masa de una galaxia y cómo influye este parámetro en el resto de sus propiedades y en sus caminos evolutivos? ¿Cuál es la relación existente entre la cinemática de las estrellas y el gas y cómo describen éstas el estado dinámico de las galaxias?
- ¿Cuál es el papel de las galaxias enanas en la construcción de las galaxias masivas? ¿Cuál es el origen de las galaxias masivas observadas a alto desplazamiento al rojo?
- ¿Cómo se forman las galaxias espirales y cuál es el papel de sus componentes estructurales en su posterior evolución?
- ¿Cómo se ensambla la estructura y la dinámica de los diferentes tipos de galaxias? ¿Cómo pueden transformarse las galaxias a través de una evolución secular o de múltiples interacciones?
- ¿Cuál es el papel de los procesos menores de acreción o fusiones importantes de galaxias?
- ¿Cómo se desarrolla el proceso de acreción de gas y cuáles son sus consecuencias?

Conocer cuál es la trayectoria evolutiva que siguen las galaxias desde su formación hasta la época actual es un de los retos más importantes a acometer durante la próxima década y la respuesta a las preguntas formuladas más arriba puede conducir a una consecución parcial de la misma.

La mayor parte de la materia bariónica que ha constituido parte de las galaxias en algún momento se encuentra en la actualidad en forma de estrellas. Por lo tanto, las poblaciones estelares contienen, a través de sus abundancias químicas y sus distribuciones espaciales, información relativa a la historia de la masa bariónica de las galaxias y a su evolución temporal a través de complejos procesos de formación estelar.

El estudio de las poblaciones estelares de los diferentes tipos de galaxias y de la interrelación de estrellas, gas y polvo requiere la interpretación de observaciones obtenidas por telescopios de gran apertura y en un amplio rango de longitudes de onda, desde el UV extremo hasta las ondas de radio. Sin embargo, se puede obtener información muy relevante mediante el uso de la instrumentación adecuada instalada en telescopios de apertura mediana (de 2 a 4 m) en muestras selectas de galaxias cercanas. De hecho, estos estudios son indispensables para poder interpretar correctamente la gran cantidad de datos que se espera obtener a partir de los extenso cartografiados a realizar en el futuro.

La espectroscopía de resolución moderada permite realizar en el universo local un examen crítico de los mecanismos físicos que participan en los procesos globales de formación y evolución de galaxias tales como: fusiones, brotes de formación estelar, núcleos galácticos activos, retroalimentación por supernovas, flujos refrigerantes etc ... Esto es crucial para interpretar después la información mucho menos detallada que se obtiene para galaxias más lejanas, a alto desplazamiento al rojo, para así poder construir una imagen coherente de la evolución de las galaxias a través del tiempo cósmico. Los estudios dinámicos requieren, además, la obtención de imágenes de alta resolución espacial hasta una escala de 0.01 segundos de arco.

Hasta ahora, las propiedades derivadas espectroscópicamente a través de las galaxias se han venido caracterizando mediante distribuciones radiales. Sin embargo, esto en realidad responde a una limitación observacional derivada de la necesidad del uso de aperturas fijas y/o espectroscopía de larga rendija. Afortunadamente, el advenimiento de espectrómetros multi-rendija (MOS) y unidades de campo integral (IFU) con gran campo de visión (FoV) ofrece la oportunidad de obtener una nueva generación de observaciones basadas en muestras que contabilizan cientos de regiones de hidrógeno ionizado (HII) y proporcionan una completa cobertura de las galaxias en dos dimensiones.

Por otra parte, las galaxias no son completamente simétricas con respecto a un eje; por ejemplo, la existencia de los brazos espirales cambia el escenario en el cual una única dimensión es suficiente para explicar lo que sucede en el disco de una galaxia. En realidad, esto requiere una descripción bi-dimensional completa de modo que los brazos espirales, las barras y cualesquiera otras estructuras presentes, tales como las que aparezcan como consecuencia de interacciones o fusiones puedan ser tenidas en cuenta.

La técnica desarrollada recientemente de la espectroscopía de campo integral (IFS) ha abierto una nueva ventana a la investigación en el campo de la evolución de galaxias permitiendo el paso de una descripción uni-dimensional a una en dos dimensiones. Teniendo en cuenta los ambiciosos cartografiados a realizar usando estas técnicas un futuro próximo, nos encontramos ahora en el momento adecuado para diseñar las metodologías, herramientas y técnicas necesarias para acometer muchos problemas científicos cuyo estudio puede proporcionar importantes avances en el campo.

Hay grupos españoles trabajando muy activamente en temas relacionados con la formación y evolución de galaxias a través de proyectos consolidados, entre ellos SHARDS (Surbey for High Absorption Red and Dead Sources; <http://guaix.fis.ucm.es/~pgperez/SHARDS/>), constituido alrededor un programa de observación ESO/GTC para el estudio de la formación de galaxias masivas; CALIFA (Calar Alto Legacy Integral Field spectroscopy Aerial survey; <http://califa.caha.es/>), programa de legado de CAHA para la obtención de observaciones de campo integral de una muestra de galaxias cercanas; RAVET (Real and Virtual Early Type Galaxies), proyecto para combinar observaciones de galaxias, modelos de poblaciones estelares y simulaciones cosmológicas teóricas en el estudio de la formación y evolución de galaxias; ESTALLIDOS (<http://estallidos.iac.es/estallidos/Estallidos.jsp>) grupo dedicado al estudio de procesos de formación estelar a gran escala; AMIGA (Analysis of the interstellar Medium of Isolated Galaxies, <http://amiga.iaa.es/>).

1.1.2. Galaxias activas (AGNs, QSOs)

- ¿Cuáles son las características de los SMBH situados en los centros de las galaxias? ¿Cuál es su conexión con las propiedades de la galaxia que lo alberga?
- ¿Cuál es la conexión entre SMBH y formación estelar en galaxias y cómo afecta esta conexión a su formación y evolución en el tiempo?
- ¿Cuál es el mecanismo que controla la relación entre la masa del agujero negro y la dispersión de velocidades en los centros de las galaxias?
- ¿Cómo crecen los SMBH? ¿Es la evolución de los centros galácticos y de los SMBH coetánea?
- ¿Cómo es la evolución con el tiempo cósmico de la población de AGN?
- ¿Cuál es el mecanismo de acreción dominante en AGN? ¿Es la física de la acreción universal? ¿Existe algún tipo de evolución entre los diferentes tipos de AGN?
- ¿Qué mantiene a los chorros de partículas que emanan de los AGN colimados a lo largo de grandes distancias (alrededor de 100 kpc)?
- ¿Está el modelo unificado totalmente comprobado? ¿Cuáles son los parámetros más importantes en este modelo unificado?

Una fracción considerable de galaxias albergan potentes fuentes de energía en sus centros (AGN) cuyo origen no se encuentra en las estrellas. Estos núcleos galácticos activos emiten radiación en todos los rangos de energía y abarcan un enorme abanico de luminosidades, con LINERs, galaxias Seyfert y cuásares (QSOs) de menor a mayor luminosidad. Actualmente, se cree que la energía emitida por estos objetos la proporciona la acreción de materia por un agujero negro supermasivo (SMBH) situado en el centro de la galaxia huésped.. Esta materia, que ha perdido su momento angular, se mueve en espiral alrededor del SMBH formando un disco de acreción. En las proximidades del SMBH, las partículas relativistas son aceleradas y colimadas a lo largo de las líneas de intensos campos magnéticos en las partes internas del disco y son eyectadas a lo largo del eje de rotación del sistema formado por el disco y el SMBH, dando lugar a los chorros relativistas extendidos que se observan en un número de AGN.

En la actualidad se piensa que todas las galaxias con bulbos masivos hospedan un SMBH en su centro y que la masa de este SMBH es proporcional a la masa del bulbo, estableciéndose así una relación entre estas masas que se mantiene en un rango que cubre más de cuatro órdenes de magnitud en masa. Esta relación parece sugerir que el crecimiento del SMBH se ha producido al mismo ritmo que el propio crecimiento del bulbo de la galaxia. El paradigma actual postula que la acumulación de materia en el bulbo se detiene por efecto del propio AGN (retroalimentación) a través de la interacción del jet con el gas que rodea al SMBH y/o la potente radiación emitida por el AGN.

Los AGN de más alta luminosidad parecen haber sido mucho más numerosos en el universo temprano y esto sugiere que (1) los SMBH se formaron en las primeras épocas del universo y (2) que las condiciones necesarias para la formación de AGN (por ejemplo, la disponibilidad de gas frío cerca de los centros de las galaxias) eran más comunes en el pasado. También parece sugerir que muchos objetos que fueron cuásares luminosos en el pasado, son en la actualidad AGN mucho menos luminosos o incluso objetos inactivos. La evolución de los AGN de baja luminosidad es mucho más difícil de establecer debido a la dificultad de observar estos objetos a elevados desplazamientos al rojo y porque la contribución relativa de la galaxia albergadora es mucho mayor.

En el campo de las galaxias activas, hay grupos españoles trabajando en los rangos óptico, infrarrojo, Rayos X y radio. Algunos grupos desarrollan un trabajo de gran impacto en LIRGS y ULIRGS a la que aportan su experiencia en el diseño y desarrollo de instrumentación infrarroja de vanguardia. La existencia de ESAC cerca de Madrid posibilita la colaboración de científicos españoles con astrónomos especialistas trabajando en el XMM-Newton Operation Center. Hay también grupos trabajando en la estructura de jets relativistas y en la estructura de centros de galaxias activas con alta resolución espacial (<http://www.iac.es/proyecto/parsec/main/index.php>).

1.1.3. Formación estelar y medio interestelar en galaxias. Astro-química extragaláctica.

- ¿Difieren las condiciones físicas del medio interestelar y su química, los procesos de formación estelar, la evolución de AGN en galaxias con formación estelar extrema de aquéllos en galaxias normales?
- ¿Qué papel juegan las moléculas y el polvo en los mecanismos de retroalimentación presentes en las galaxias con intensos brotes de formación estelar?
- ¿Cuál es el impacto de las propiedades de las nubes moleculares en la evolución de las galaxias?
- La masa total en gas molecular es un parámetro clave en la evolución de galaxias con núcleo activo y/o formación estelar vigorosa y también de los vientos asociados con éstas. ¿Cómo se pueden obtener estimaciones fiables de estas masas?

Las galaxias con brotes de formación estelar extremos, a menudo clasificadas como galaxias luminosas o ultra-luminosas en el infrarrojo (LIRG y ULIRG respectivamente), sufren una rápida evolución y son el foco de muchos estudios, en particular a longitudes de onda milimétricas y submilimétricas que nos permiten penetrar

las capas masivas de gas y polvo existentes en estos objetos, y caracterizar las condiciones físicas extremas de sus regiones. Estos objetos pueden a su vez servir como ejemplos para entender las galaxias oscurecidas por polvo (DOGs) a elevados desplazamientos al rojo.

Todavía no está claro cómo las propiedades detalladas de las galaxias con brotes de formación estelar extremos difieren de las correspondiente en galaxias normales. Las cuestiones claves están arriba enunciadas.

Con el advenimiento de nuevas infraestructuras como ALMA, para la cual astrónomos españoles tienen varios programas admitidos dentro de este campo, y una cercana colaboración entre observadores y teóricos, las técnicas de astroquímica están emergiendo como herramientas esenciales de diagnóstico para identificar la actividad en galaxias, trazando su estado evolutivo y por tanto contribuyendo a entender los fenómenos de formación estelar en diferentes poblaciones de galaxias.

Algunas cuestiones específicas a responder por ALMA son:

- ¿Cuál es el papel evolutivo de las galaxias con brotes de formación estelar (“starburst”, SB) extremos en relación con las galaxias normales?
- ¿Cuáles son las especies moleculares y sus líneas de emisión claves para proporcionar diagnósticos certeros que permitan distinguir galaxias con brotes de formación estelar oscurecidos de galaxias con un núcleo activo (AGN)?
- ¿De qué manera las propiedades moleculares de los flujos de gas (condiciones físicas, estructura, química) reflejan la naturaleza de la fuente que produce dichos vientos?
- ¿En qué estadio de su evolución desarrollará un SB/AGN un viento molecular masivo y frío?
- El total de la masa molecular de gas es un parámetro clave en AGN y SB así como en sus vientos asociados. ¿Cómo se pueden obtener las estimaciones de masa más fiables? ¿Cómo cambian las propiedades del trazador escogido, con el entorno y con el tipo de actividad que se pretende trazar?
- ¿Podemos derivar factores de conversión para distintos estimadores de masa de gas molecular (por ejemplo, CO, HCN, HCO+).
- ¿Cuáles son las escalas temporales para el consumo de gas y las eficiencias de formación estelar en diferentes poblaciones de galaxias?

Astrónomos del OAN lideran dos proyectos de ALMA que se ocupan del estudio de la alimentación de la actividad en discos de galaxias Seyfert. Dichos proyectos se han beneficiado de los resultados obtenidos en el pasado reciente en el proyecto NUGA, un survey realizado por el interferómetro de IRAM .

Hay grupos españoles participando también en el programa de legado, PHIBBS2, un cartografiado de gas molecular en una muestra de más de 100 galaxias que abarcan un amplio rango de desplazamientos al rojo ($z = 0.5 - 2.5$). Este proyecto, que incluye a más de 20 investigadores de todo el mundo se desarrollará en gran medida gracias a la ampliación del Interferómetro de IRAM (NOEMA) a la que España contribuye de manera decisiva como miembro activo de IRAM.

1.1.4. Grupos y cúmulos de galaxias. Influencia del entorno en la evolución de las galaxias

- ¿Cómo evoluciona la estructura a gran escala del Universo?
- ¿Cuáles son los efectos del entorno en la evolución de las galaxias? ¿Cuál es la importancia relativa de los distintos procesos implicados?
- ¿De qué manera induce el entorno transformaciones morfológicas de galaxias?
- ¿Cómo es la evolución de las galaxias en grupos compactos?
- ¿Cuál es la historia de la producción de metales en galaxias y en el medio intergaláctico entre ellas?

En simulaciones numéricas de la evolución de la estructura a gran escala del universo, los cúmulos de galaxias aparecen situados en los nodos de la tela de araña cósmica. Con masas de hasta $10^{15} M_{\odot}$ representan las mayores estructuras colapsadas del universo. La dinámica de estos cúmulos está dominada por la alta densidad y la gran proporción de materia oscura en ellos y por los profundos potenciales gravitatorios existentes.

Estudios dinámicos muestran que alrededor del 80% de la masa de los cúmulos de galaxias se encuentra en forma de materia oscura. El resto consiste de masa bariónica constituida principalmente de gas difuso a alta temperatura ($T \approx 10^7$ K) que emite radiación X. Estos cúmulos proporcionan pues una gran oportunidad de para investigar procesos fuera del equilibrio en astrofísica de plasmas. Pero a su vez permiten el estudio de lo que podemos llamar “ecosistemas astrofísicos”, es decir un volumen que es prácticamente un denso microcosmos prácticamente desacoplado del Universo, constituyendo excelentes laboratorios para estudiar la evolución de las galaxias y sus interacciones en entornos de alta densidad.

Durante los últimos años, cartografiados de galaxias como 2dFGRS y SDSS han proporcionado un número sin precedentes de información espectroscópica de galaxias en cúmulos, tanto en las zonas internas, más densamente pobladas, como en las externas, mucho más dispersas y se ha avanzado en el estudio de las propiedades de las galaxias más luminosas ($M_r < -18.0$) de cúmulos cercanos y a desplazamiento al rojo moderado. Sin embargo, no existe un estudio de galaxias enanas en un número significativo de cúmulos. La obtención de estos datos requiere el uso de espectrógrafos de gran campo con capacidades multi-objeto o equipados con IFUs. El uso de estos instrumentos puede incrementar la eficiencia de los cartografiados a obtener, en un factor de casi un orden de magnitud. Instalados en telescopios del orden de 4m (por ejemplo, WEAVE en el WHT) podrán proporcionar observaciones de galaxias enanas en cúmulos cercanos y en telescopios de apertura más grande, permitirá su observación en cúmulos a desplazamiento al rojo intermedio. Estos instrumentos también permitirán la realización de estudios de las poblaciones estelares en las galaxias más luminosas de los cúmulos.

En la actualidad hay grupos trabajando en grupos y cúmulos de galaxias sobre todo en el rango óptico con técnicas de fotometría y espectroscopía para la observación de galaxias individuales en entornos de alta densidad.

1.2. La Vía Láctea y el Grupo Local como laboratorios cosmológicos

El objetivo de la “cosmología local” (“near-field cosmology”) es dar respuesta a algunas de las preguntas mencionadas más arriba relativas a la formación y evolución de las galaxias, inspeccionando cuidadosamente, casi diseccionando, las galaxias cercanas, especialmente nuestra Galaxia y las galaxias pertenecientes al Grupo Local. De hecho, los mecanismos de formación y evolución de las galaxias se hallan codificados en la localización, cinemática y química de las estrellas para la derivación de las cuales resulta crítica la obtención de la edad y la composición química de las estrellas, así como de las órbitas seguidas por ellas. Gaia, la misión espacial europea que será lanzada en Octubre 2013, resultará fundamental en este contexto. Gaia producirá durante los cinco años que se espera dure la misión, datos de altísima calidad sobre posiciones y movimientos propios de alrededor de mil millones de estrellas de la Vía Láctea con la finalidad de obtener un amplio censo de las órbitas, edades y composiciones químicas de las estrellas en nuestra Galaxia que haga posible la reconstrucción de la historia de su formación y su posterior evolución. Sin embargo, para un cierto número de objetivos, la misión Gaia podría no ser suficiente en sí misma y se beneficiará enormemente de información espectroscópica adicional procedente de telescopios anclados en tierra.

1.2.1. Arqueología galáctica

- ¿Cómo se formó nuestra galaxia y cómo se formaron sus componentes? ¿Cuál ha sido el mecanismo de formación del halo estelar galáctico, in-situ o acreción?
- ¿Cuál es la distribución de materia oscura en la Vía Láctea? ¿Cómo se relaciona esta distribución con el paradigma CDM?
- ¿Cuál es la masa total de la Vía Láctea y la forma del potencial gravitatorio galáctico?

El origen y la evolución de las galaxias como nuestra propia Vía Láctea es una de las cuestiones fundamentales de la astrofísica moderna. En particular, los modelos de materia oscura fría predicen un escenario de agrupamiento jerárquico en el cual la historia del ensamblaje de una galaxia puede diferir en gran medida de la historia de formación estelar en la misma. Sin embargo, mientras que los modelos LCDM alcanzan un éxito notable en cuanto a la descripción de la estructura a gran escala del universo se refiere, este éxito no resulta comparable a escalas más pequeñas (grupos y cúmulos de galaxias) donde al menos tres problemas potencial parecen emerger: 1) el número de galaxias satélites de la Vía Láctea es inferior al número de satélites que el modelo predice que deberían estar asociados al halo (Moore et al. 1999); 2) la relación masa-luminosidad de las galaxias no se ajusta a las predicciones; y 3) el momento angular por unidad de masa medido en la Vía Láctea es menor que el predicho por los modelos. Se han propuesto una gran variedad de mecanismos físicos con el fin de resolver estos problemas para así mantener los rasgos generales del escenario LCDM. Para discriminar entre estos posible mecanismos, se requiere un conjunto de datos observacionales que describan con la más alta de las precisiones los diferentes subsistemas galácticos que forman la Vía Láctea. En este sentido, las características que definen el proyecto de cartografiado J-PAS lo hacen altamente apropiado para este propósito, considerando que no existe otro de similares características que aúne los necesarios, profundidad y resolución espectral. Los 54 filtros estrechos de sistema fotométrico de J-PAS pueden en realidad considerarse como una espectroscopía de muy baja resolución del halo galáctico.

1.2.2. Estructura y dinámica del disco galáctico

- ¿Cómo se formó el disco galáctico y cómo ha sido su posterior evolución?
- ¿Cuál es la naturaleza de los brazos espirales?
- ¿Se puede establecer un modelo quemo-dinámico realista del disco de nuestra Galaxia?

En nuestros días, en la era de Gaia, debemos adoptar una aproximación holística para estudiar la evolución dinámica del disco de nuestra galaxia. Para ello han de desarrollarse complejos modelos quemo-dinámicos que nos permitan entender la interrelación dinámica y química de gas, estrellas y materia oscura, tanto en un escenario estático como también en un entorno cosmológico. Sin embargo, para proporcionar un marco autoconsistente deberíamos tener presente que tanto el número de parámetros libres del modelo como el número de observables que potencialmente pueden aportar restricciones al mismo, es enorme y requiere un complejo tratamiento. Como ejemplo, actualmente se cree que la mezcla radial de estrellas en el disco galáctico puede jugar un importante papel en en la evolución quemo-dinámica del disco galáctico; sin embargo, aunque simulaciones hidrodinámicas y de N-cuerpos encuentran que esta mezcla radial podría ser considerable, sólo la comparación con las observaciones determinará finalmente la importancia de este fenómeno en la evolución del disco. El objetivo principal para la próxima década es obtener un censo completo de las órbitas, edades y composiciones químicas de las estrellas en el disco de nuestra propia galaxia. La misión Gaia se focalizará en los movimientos estelares, un elemento clave para la determinación de sus órbitas que a su vez es necesaria para la derivación del potencial gravitatorio total (a partir del cual podemos obtener la distribución de masa en la Vía Láctea y el contenido y la distribución de materia oscura). Para llevar a cabo este análisis, deberemos acometer, entre otros, estudios que nos proporcionen pistas

sobre procesos dinámicos tales como el origen de las corrientes de estrellas observados en el espacio de las fases y sus relaciones con las resonancias inducidas por los componentes no simétricos radialmente – los brazos espirales y las barras galácticas – o la caracterización dinámica de pasados eventos de acreción. Se requieren tanto métodos de cálculo computacional paralelo masivo como un enorme esfuerzo observacional para llevar a cabo este análisis. Nuestra aproximación holística para la próxima década requiere no sólo Gaia sino también misiones astrométricas futuras y exploraciones espectroscópicas desde tierra.

1.2.3. El centro galáctico

- Formación estelar y poblaciones estelares en un entorno singular

El centro galáctico (GC) es la región de la Galaxia con los más intensos campo de radiación, magnéticos y de marea, donde la extinción interestelar es muy elevada ($A_V \sim 30$), el campo estelar muy poblado y existe un agujero negro masivo (Sagitario A^{*}). También, por unidad de volumen, es la región más activa de formación estelar dentro de la Vía Láctea. Es por lo tanto un laboratorio crucial para el estudio de núcleos galácticos y su papel en el contexto de la evolución de galaxias, y para la investigación de la interacción entre agujeros negros masivos y su entorno, además de los procesos de dinámica y formación estelar en sistemas densos. Sagitario A^{*} nos permitirá realizar pruebas cruciales de la Relatividad General en el futuro a corto o medio plazo.

1.2.4. Formación, evolución y disrupción de sistemas estelares

- Formación y evolución de cúmulos abiertos
- Cúmulos globulares como trazadores de sistemas galácticos y de su evolución química
- El Cinturón de Gould y los grandes complejos estelares
- Formación estelar a gran escala y su conexión con la estructura espacial y cinemática de la Vía Láctea.

La mayor parte de la materia visible en el universo está condensada en estrellas, con densidades más de 30 órdenes de magnitud más elevadas que la densidad media del universo y 20 órdenes de magnitud más elevada que la densidad de las nubes interestelares a partir de las cuales se forman. Por lo tanto, una pregunta fundamental no es cómo los bariones terminan formando parte de las estrellas, si no cómo algunos de ellos permanecen en forma de gas interestelar caliente y de baja densidad. Este enigma yace en el corazón de una teoría predictiva de la formación estelar, uno de los objetivos principales de la astronomía moderna. Todavía estamos lejos de poseer una solución global a este problema complejo cuya respuesta depende en gran medida de la existencia de un conjunto de datos empíricos bien estructurado y completo, así como de la construcción de herramientas de simulación confiables y precisas.

En la actualidad, está ampliamente aceptado que las estrellas se forman en sistemas altamente jerarquizados que se parecen e cierto modo a la estructura escalonada del medio interestelar o, por lo menos, a la morfología de las regiones más densas. Este patrón jerárquico, tanto espacial como temporal, presenta condensaciones singulares, los cúmulos estelares, cuyas características principales los hacen firmes trazadores de los procesos de formación estelar en galaxias. La estructura jerárquica se extiende desde complejos estelares (o grandes porciones de brazos espirales en galaxias “floculentas” o algodinosas), y cúmulos embebidos, hasta estrellas individuales dentro de dichos cúmulos. La escala de los cúmulos es la mejor métrica para medir y analizar el rango espacial completo en la formación de sistemas estelares. El estudio de la formación de los cúmulos estelares y su conexión no lineal con los procesos que conducen a la generación de estrellas es un programa clave que se encuentra enmarcado en varios objetivos científicos: ¿Cuál es la influencia de la estructura geométrica de una nube donde se forman estrellas sobre la estructura espacial interna de la población estelar a la que dará lugar?, ¿cuál es su evolución temporal?, ¿cuáles son las

variables internas y externas que controlan la eficiencia de la formación estelar en cúmulos?; 2) ¿Dónde y cómo se forman las estrellas masivas en la Galaxia?, ¿es la fracción de estrellas masivas ligada a la masa y/o la estructura espacial del sistema estelar donde se formaron?, ¿se forman las estrellas de baja y alta masa a través del mismo mecanismo aparte de un factor de escala? ; 3) ¿Cómo se forman las estrellas dentro de un cúmulo?, ¿son coetáneas?, ¿cuán precisamente podemos medir las masas de estrellas individuales en un cúmulo?, ¿existe una masa estelar típica en los mismos?, ¿es esta universal? Y si es así, ¿qué significado tiene esto en términos físicos

Existen grupos trabajando en la estructura de nuestra galaxia y en galaxias del grupo local. Gran parte de los estudios dedicados a nuestra Galaxias se canalizan a través de las redes relacionadas con la misión Gaia como se explica más adelante.

2. INSTRUMENTACIÓN REQUERIDA PARA ALCANZAR LOS OBJETIVOS

2.1. Observación desde Tierra

2.1.1. *Observaciones multi-frecuencia con gran campo de visión: desde el UV hasta las radio frecuencias*

Como se puede deducir fácilmente de lo expuesto más arriba, la investigación en el campo extragaláctico requiere de observaciones en todo el rango de frecuencias, tanto desde el punto de vista de imagen como de espectroscopía. En los últimos años se han realizado importantes exploraciones de gran calado tanto el óptico como en el IR, que han permitido grandes avances en el descubrimiento y la confirmación de correlaciones fundamentales con un gran respaldo estadístico. Sin embargo, el completo entendimiento de las mismas requiere el seguimiento y estudio detallado de objetos individuales seleccionados cuidadosamente. Si bien, dada la naturaleza de esos objetos, en muchos casos se requerirá el uso de telescopios de gran apertura (8-10m), los objetos más cercanos podrán ser estudiados con telescopios de menor apertura (2-4m). En cualquier caso, se necesita disponer de espectrógrafos de resolución baja a moderada, de apertura simple o larga rendija; el uso de capacidades multi-rendija aumentará la eficiencia de las observaciones, sobre todo en el caso de la observación de grupos o cúmulos de galaxias.

Dentro de la instrumentación disponible en territorio nacional se encuentran: ISIS@WHT (R= 2000-20000), TWIN@CAHA3.5 (R=3000-14000), IDS@INT (R= 1500-10000), ALFOSC@NOT (R=200-10000), CAFOS@CAHA2.2 (multi-rendija, R=600-3000), LIRIS@WHT (R=1000-3000, espectroscopía e imagen en el IR), NOTCAM@NOT (R=2500, 5500; también imagen). Además, los investigadores españoles tienen acceso a la instrumentación disponible en los telescopios de ESO- VLT: FORS2, ISAAC, NACO, CRIRES, VISIR, X-Shooter. Este último es sin duda un instrumento extremadamente competitivo para el estudio de galaxias a distinto desplazamiento al rojo, dado su gran cubrimiento espectral, desde el corte atmosférico hasta 2.5 μ m.

Desde el campo de la radioastronomía, las observaciones de alta resolución espacial en los dominios centimétricos y milimétricos son de una importancia crítica para interpretar adecuadamente las observaciones a través de modelos de evolución química. Las observaciones de CO a longitudes de onda milimétricas se pueden usar para estimar la fracción de gas en nubes moleculares y las observaciones de HI a longitudes de onda de radio pueden usarse no sólo para obtener el contenido de gas atómico sino también para obtener las curvas de rotación terminales de galaxias y para estimar la contribución de materia oscura a escala galáctica. También la importante información que se puede derivar del estado cinemático de las regiones más externas de galaxias a partir de estas curvas de rotación terminales, se puede usar para estudiar una variedad de fenómenos en grupos y cúmulos de galaxias, tales como el despojamiento de gas producido por presión de empuje y acoso entre galaxias.

En lo que respecta a los núcleos galácticos activos (AGN), el uso de telescopios de gran apertura es esencial. Para entender el proceso de crecimiento de los agujeros negros y la relación entre las galaxias y los agujeros negros que albergan durante su formación y evolución, se requiere una buena caracterización de su demografía, es decir, necesitamos saber cuántos agujeros negros hay y cuál es la distribución de sus masas, en cada época cosmológica, es decir a cada desplazamiento al rojo. Esto implica realizar el seguimiento espectroscópico de candidatos seleccionados a partir de muestreos profundos en rayos-X. La mayoría de estos objetos son débiles ($R > 24$ mag) y su selección requiere el uso de telescopios de gran apertura, como GTC (≈ 10 m). Una vez se hayan seleccionado los SMBH, el propósito final es la determinación de sus masas y la obtención de su función de masa.

La mejor manera de determinar las masas de SMBH es hacerlo de forma directa, lo que, de nuevo, requiere el uso de telescopios de gran apertura para la mayor parte de la muestra (todos los objetos excepto los más cercanos). Sin, embargo y pese a la dificultad de estos estudios, debemos insistir en que la evolución con el desplazamiento al rojo de la relación entre la masa de los SMBH y la dispersión de velocidades de los bulbos galácticos, proporcionará importantes cotas a los modelos de formación de galaxias y retroalimentación (“feedback”), una de las cuestiones más candentes de la actualidad.

También, las imágenes ópticas profundas con alta resolución pueden revelar la conexión entre los SMBH y sus galaxias huéspedes. Estas imágenes ópticas también nos darían información sobre el entorno de los SMBH incluyendo posibles evidencias de fusiones entre galaxias. Estos estudios necesitarían telescopios de gran apertura, como GTC, con la adición de técnicas de óptica adaptativa. Por otra parte, algunos (muchos) AGN muestran “jets” colimados hasta grandes distancias que emergen del SMBH a velocidades relativistas. El estudio de estos objetos también se beneficiaría de imágenes de alta resolución en el óptico/IR (con el uso de técnicas coronográficas, si fuera posible). Igualmente son imprescindibles las observaciones de alta resolución espacial de AGN en radiofrecuencias, especialmente para la caracterización y el estudio del origen de los jets, o para determinar la masa central a través de medidas de máseres de agua.

2.1.2. *Espectroscopía bi-dimensional: espectroscopía multi-objeto (MOS) y espectroscopía de campo integral (IFS)*

La combinación de la imagen con la espectroscopía ha conducido al desarrollo de la Espectroscopía de Campo Integral (IFS) que, aplicada al estudio de galaxias cercanas, puede proporcionar una gran cantidad de información sobre: poblaciones estelares, formación estelar, propiedades del gas ionizado, cinemática, estructura galáctica y señales de efectos de entorno. En la próxima década, la aplicación de estas técnicas se extenderá a galaxias más lejanas a medida que los detectores ganan en resolución espacial y se desplazan hacia longitudes de onda más largas.

La Espectroscopía de Campo Integral es una técnica relativamente nueva que permite obtener espectros de fuentes extensas en función de su posición. Esta técnica ha florecido en los telescopios competitivos de gran apertura y en los últimos años se han construido muchos espectrógrafos equipados con Unidades de Campo Integral (IFU) (PPAK, SINFONI, VIMOS, GNIRS, etc.) y otros están planeados para entrar en funcionamiento en el futuro próximo (por ejemplo X-shooter, MUSE, KMOS). La demanda de estos instrumentos está creciendo rápidamente debido a la mejora en resolución espacial de los grandes telescopios existentes y en proyecto. Este rápido desarrollo desde el punto de la parte instrumental deberá acompañarse del correspondiente desarrollo en metodologías de análisis, interpretación y modelización teórica. Por ejemplo, es posible ahora por primera vez, mediante la combinación de datos de IFS y datos tradicionales de imagen de alta resolución, derivar una relación M/L en galaxias resuelta espacialmente y, en combinación con datos de cinemática, obtener la relación M/L para las distintas componentes identificadas posibilitando así un estudio de bi-dimensional de la dinámica de galaxias. En lo que respecta a la evolución química, hasta ahora, debido a la falta de información en dos dimensiones, nuestros modelos adoptan la suposición de que la distribución

de las abundancias de los distintos elementos químicos es acimutalmente simétrica y el importante asunto de la posible dispersión. La aplicación de técnicas de IFS permitirá obtener un excelente cuerpo de datos que proporcionarán distribuciones de abundancias en dos dimensiones que permitirán explorar la existencia de cambios en los patrones de distribución de abundancias químicas debidas a interacciones, fusiones o incluso acreción de estructuras satélites.

La Espectroscopía de Campo Integral IFS será sin duda la herramienta ideal para los estudios cinemáticos de galaxias. Los datos de IFS data permitirán obtener una descripción simple a la vez que completa de las propiedades de las galaxias en el caso bi-dimensional usando metodologías que se han desarrollado durante las pasadas dos décadas para cuantificar la morfología de galaxias a partir de imágenes. Pero también las opciones de multi-rendija, con un número moderado de las mismas, puede aportar información sobre las partes más separadas de objetos extensos o diferentes objetos independientes agrupados o no (objetos en grupos o cúmulos y objetos galácticos). Para ello, se requiere un campo de visión (FoV) mayor de 1 minuto de arco y la cobertura completa en el óptico con resolución espectroscópica moderada ($R=1000-5000$) es estrictamente necesaria.

Algunos de los instrumentos disponibles en territorio nacional que reúnen estas características son: OASIS/WHT ($R=1000-4000$, 33 segundos de arco de FoV y cubrimiento espectral desde ~ 4700 hasta $\sim 5400 \text{ \AA}$) and PMAS-PPAK @CAHA3.5m ($R=300-8000$, cubrimiento espectral del rango óptico completo, FoV de $\approx 74'' \times 64''$).

2.1.3. Imagen y espectroscopía infrarrojas (IR)

Obviamente el dominio IR se hace cada vez más relevante en el estudio de galaxias lejanas, a alto desplazamiento al rojo. En galaxias a $z > 2$, el rango óptico (350-700 nm) extensivamente estudiado en objetos cercanos, se traslada al IR cercano. Pero el IR cercano también proporciona importante información en galaxias cercanas sobre poblaciones estelares viejas (varios Ga), estrellas masivas evolucionadas, tales como supergigantes rojas, y propiedades del gas ionizado. La emisión en este rango resulta ser un trazador muy fiable de la masa, en los casos en los que la presencia de polvo es substancial, el rango IR es imprescindible para distinguir entre objetos dominados por formación estelar o AGN.

La distribución espectral de energía del fondo de rayos X, que se cree resulta de la superposición de los espectros de AGN no resueltos, parece indicar que la población dominante de AGN hasta desplazamiento al rojo de aproximadamente 1 está formada por AGN oscurecidos de luminosidad moderada. Si esto es así, es probable que en la época de mayor actividad de AGN, alrededor de $z \approx 2$, la mayoría de los AGN no aparezcan en muestreos ópticos. El uso del rango IR es, en este caso, imperativo.

El rango IR es también imperativo para la obtención de imágenes y espectroscopía de alta resolución espacial. Por ejemplo, el instrumento MIRADAS, actualmente en desarrollo para GTC, podrá medir dinámicamente las masas de SMBH en un buen número de AGN y permitirán investigar aspectos relacionados con la acreción de materia.

Los estudios de relevancia sobre el centro galáctico requieren el uso de la más alta resolución espacial, alcanzable en el dominio IR. Dentro de la instrumentación de estas características disponible para la comunidad astronómica española se encuentran: NACO (y su sucesor ERIS) en uno de los telescopios VLT que proporciona imagen en el IR (entre 1 y 5 μ) con óptica adaptativa; SINFONI y HAWK-I, también en los telescopios VLT, que combinan espectroscopía en el IR con técnicas de óptica adaptativa. También el uso de técnicas interferométricas se ajustan a las necesidades de estos proyectos, entre otros los instrumentos AMBER y GRAVITY en VLTI.

Entre la instrumentación disponible en telescopios ubicados en territorio nacional, CANARICAM, EMIR y

CIRCE en GCT pueden proporcionar información valiosa y única. También NOTCAM en el telescopio NOT podría realizar un seguimiento del centro galáctico si está equipado con electrónica que permita una más rápida lectura, tal como está planeado.

2.1.4. Cartografiados espectroscópicos de la Galaxia 2015-2025

El catálogo final de Gaia (que se espera para 2020) revolucionará la Astronomía Galáctica en la próxima década dada la precisión, sin precedentes, de sus datos astrométricos. Para completar estos datos se hace estrictamente necesaria la realización de grandes cartografiados tanto fotométricos como espectroscópicos en ambos hemisferios (es también una recomendación de ASTRONET), pues solo combinando toda esta información nuestra Galaxia será el laboratorio local ideal para el análisis de los procesos de formación y evolución de las galaxias en el Universo.

En 2013 la comunidad europea de Gaia ha comenzado un gran cartografiado espectroscópico en el hemisferio sur que, en combinación con Gaia, producirá la primera panorámica global consistente de la relación entre cinemática y abundancias químicas en las estrellas de nuestra Galaxia. Este cartografiado habrá de completarse con cartografiados equivalentes obtenidos desde el hemisferio norte.

Las ICTs españolas jugarán un papel fundamental en este escenario, debido a su moderna y adecuada tecnología, con instrumentos de gran campo adosados a telescopios de la clase 2-4 m, tanto en el óptico como en el infrarrojo y en modo fotometría y espectroscopía. Actualmente identificamos cuatro grandes cartografiados para el periodo 2015-2025 asociados a los observatorios del Roque de los Muchachos, Javalambre y Calar Alto que son WEAVE@WHT, JPAS@CEFCA, PANIC@CAHA.

2.1.4.1. WEAVE@WHT

WEAVE será el nuevo espectrógrafo multi-objeto a instalar en el WHT con el que se podrán obtener espectros de hasta 1000 objetos simultáneamente. Con un amplio campo de visión ($>1^\circ$ de diámetro) y una gran eficiencia y con diversas configuraciones que proporcionan resoluciones espectrales entre $R = 4000$ y $R=20000$, se trata de un instrumento ideal para la realización de cartografiados. WEAVE se considera un instrumento clave y de primera prioridad (vease ASTRONET Roadmap) y posiblemente es el instrumento idóneo para la realización de la contrapartida de GES en el hemisferio norte.

Se trata de un proyecto compartido entre España, Holanda y Reino Unido y se espera que esté listo para 2017 y que obendrá una gran fracción del tiempo de observación entre 2017 y 2022. El diseño del instrumento contempla tres modos de observación: espectroscopía multi-objeto (MOS), IFUs múltiples (mIFU) e IFU monolítica de gran campo (LIFU).

Diversas industrias españolas e institutos públicos de investigación contribuirán significativamente a la construcción de algunos sistemas de este instrumento: 1) un anillo completamente nuevo para alojar el nuevo corrector junto con todas las partes anejas, como el mecanismo que permitirá cambiar de una placa a otra ("tumbler"), el posicionador robótico de fibras ópticas, la cámara de adquisición y guiado y el instrumento rotador; 2) el alineado y la verificación de la óptica; 3) el sistema de control.

2.1.4.2. JPAS@CEFCA

J-PAS es un proyecto hispano-brasileño cuyo objetivo observacional es realizar un cartografiado del cielo completo (exceptuando el disco galáctico) en 53 bandas fotométricas del rango visible y cuyo objetivo científico fundamental es el estudio de la energía oscura en el Universo. Sin embargo dado que cualquier cartografiado galáctico de gran campo es también un cartografiado del halo Galáctico, JPAS promete ser la base de datos ideal para el análisis de las poblaciones estelares, así como la búsqueda de subestructuras

(colas de marea, etc...) para una mejor comprensión de la naturaleza y formación de nuestra Galaxia. La combinación de Gaia y JPAS generará un catálogo de millones de objetos en un espacio n-dimensional de variables, sin precedente. Los telescopios del hemisferio Norte encargados de la componente observacional de este proyecto se encuentran en el observatorio de Javalambre (Teruel) dependiente del CEFCa. El proyecto engloba a varios centros de investigación y departamentos universitarios españoles. Dentro de este contexto observacional el CEFCa y el IAA han llegado a un acuerdo para la realización de un cartografiado de la componente estelar brillante del disco galáctico (GALANTE).

2.1.4.3. PANIC@CAHA2.2m

PANIC (Panoramic Near Infrared Camera para Calar Alto) es una cámara de gran campo [FOV (31'x31')] que opera en el cercano infrarrojo (0.9 to 2.5 micras), con una resolución angular de 0.45 arcsec/pixel para ser instalada en el telescopio de 2.2m de Calar Alto. No es la primera cámara de estas características en el contexto mundial pero es la primera en España y los cartografiados diseñados para la misma permitirán realizar una ciencia altamente competitiva en aquellas regiones galácticas invisibles a Gaia. Se ha creado un consorcio coordinado por REG para definir un cartografiado en regiones seleccionadas del disco y del halo, siendo su principal objetivo científico el estudio de la formación estelar a diferentes escalas espaciales. Un ejemplo del tipo de ciencia que se puede realizar con este cartografiado es la determinación de movimientos propios de estrellas de muy baja masa y enanas marrones en cúmulos abiertos y regiones de formación estelar todavía embebidas en polvo y gas. Dado que este proyecto iría dirigido a regiones de formación estelar cercanas ($d < 300$ pc), el catálogo 2MASS proporcionaría los datos astrométricos de primera época y junto con Gaia permitiría obtener la Función Inicial de Masa (IMF) hasta una masa inferior del orden de 1 masa de Júpiter y analizar en detalle la dinámica de la disrupción y destrucción de cúmulos en la cola de muy baja masa. Por otro lado, el relevamiento del halo galáctico ayudaría a definir mejor la separación estrella-galaxia en objetos muy débiles, permitiendo la detección y caracterización de estrellas de muy baja masa y enanas marrones de Población II así como la búsqueda de colas corrientes de marea definidas por las estrellas M, método que ha demostrado tener resultados espectaculares utilizando 2MASS.

2.2. Observación desde el espacio

La observación desde el espacio es complementaria a la observación desde tierra. Las observaciones en dominios espectrales no alcanzables desde tierra resultan imprescindibles para muchos de los estudios a realizar en el campo galáctico y extragaláctico, como también lo es la alta resolución espacial alcanzable con telescopios fuera de la atmósfera terrestre. La instrumentación espacial ha permitido un avance espectacular en las últimas décadas en todos los rangos del espectro y en muchos de los principales problemas astrofísicos, por ejemplo: (1) El telescopio espacial Hubble ha permitido obtener datos de imagen y espectroscopía de alta resolución angular y el acceso a regiones espectrales no visibles (UV) o difíciles de observar desde tierra (IR cercano). El telescopio JWST, sucesor del HST, no permitirá observaciones en el UV por lo que hay mucha actividad en la comunidad UV para desarrollar otro telescopio espacial diferente del JWST y optimizado para el rango UV. Hay una participación importante española en el desarrollo del futuro telescopio espacial UV; (2) Los telescopios infrarrojos espaciales han permitido obtener imágenes y espectroscopía en el IR (cercano, medio y lejano), destacando los observatorios ISO (ESA), Spitzer (NASA), Akari (JAXA) y Herschel (ESA). Debido a la vida útil limitada de los telescopios espaciales infrarrojos, sólo Spitzer en su fase "caliente" sigue operativo y sólo en las bandas de 3.6 y 4.5 micras. El JWST permitirá realizar observaciones de muy alta calidad en el rojo, e infrarrojo cercano y medio pero no en el infrarrojo lejano. Todos los grupos europeos que participaron en la construcción de los instrumentos de Herschel se han agrupado en un único proyecto para construir el instrumento europeo, SAFARI, para el futuro telescopio espacial infrarrojo SPICA (JAXA-ESA). SAFARI permitirá observaciones 3D (imagen y espectroscopía de campo integral) en el infrarrojo lejano. Hay una participación importante española, liderada por el CAB, en el consorcio SAFARI; (3) Los observatorios de altas energías (rayos X y gamma), principalmente Chandra (NASA), XMM-Newton (ESA) e Integral (ESA) así como varias misiones japonesas han permitido un avance

sin precedentes en el conocimiento del Universo, y en particular de galaxias activas y QSOs, a energías altas. Estos observatorios están en la fase final de sus operaciones por lo que es necesario tomar decisiones pronto sobre las misiones futuras en estas energías. También en altas energías hay una contribución importante de grupos españoles al desarrollo de las futuras misiones espaciales.

2.2.1. Observatorios espaciales en funcionamiento y en fase de desarrollo

HST, Spitzer (en sólo dos de las bandas del instrumento IRAC), XMM-Newton, Chandra e Integral siguen en funcionamiento y se espera que sigan haciendo contribuciones importantes en los próximos años en el campo extragaláctico. Sin embargo, al no ser posible realizar cambios en su instrumentación, el impacto esperado ya no es tan alto como el de futuras misiones más modernas. Entre las misiones espaciales a punto de ser lanzadas al espacio se encuentran Gaia (ESA) y eROSITA (Alemania y Rusia). En desarrollo se encuentra el JWST y Euclid, una de las nuevas misiones de tamaño medio de la ESA, cuyos objetivos científicos se encuentran en el campo de la cosmología.

2.2.2. Planes de nuevas misiones espaciales

Tanto a nivel europeo como en otras agencias espaciales se están definiendo las futuras misiones espaciales de tamaño medio así como las grandes, L2 y L3, del programa “Cosmic Vision 2015-2015” de la ESA. De las diferentes propuestas, muchas de ellas tienen interés para el estudio de nuestra galaxia así como en astrofísica extragaláctica, desde rayos X a radio.

Dentro de ellas se encuentra ATHENA-X, un observatorio para la observación en rayos X enfocado al estudio del universo más caliente y energético. Dentro de los proyectos científicos que ATHENA-X podría acometer se encuentra la evolución de grupos y cúmulos de galaxias. Los conocimientos actuales sobre estos sistemas viene sobre todo del universo cercano ($z < 0.5$). Un instrumento capaz de proporcionar observaciones con alta resolución espacial y espectral y alta eficiencia en el dominio de los rayos X conduciría a grandes avances permitiendo medir las propiedades termodinámicas y el contenido en metales de los primeros cúmulos de baja masa que pensamos se habrían formado a $z \approx 2$ y seguir directamente su evolución hacia los cúmulos masivos que observamos en la actualidad. ATHENA-X contribuiría también a aportar respuestas a algunas de las preguntas que conciernen a los SMBH en los centros de galaxias: la formación y el crecimiento de los SMBH desde épocas cosmológicas tempranas, la astrofísica de la retroalimentación de AGN locales, el estudio del entorno más próximo de los SMBH, etc.

En el rango ultravioleta, EUVO (European Ultraviolet-Visible Observatory). La misión GALEX ha sido el único instrumento que ha proporcionado imágenes de gran campo en el UV y ha conducido a importantes descubrimientos en el campo de la evolución de galaxias, entre otros, los discos extensos observados alrededor de muchas galaxias espirales y que parecen existir también en galaxias de otros tipos morfológicos. Estos discos son detectables en el UV gracias a la formación estelar reciente que tienen lugar en ellos. El hecho de que estos discos existan alrededor de galaxias que se pensaba que eran objetos evolucionados y pasivos, ha cambiado nuestras visiones sobre la formación de estas estructuras, apuntando claramente a la existencia de procesos de acreción de gas no procesado bien procedente del medio intergaláctico o de interacciones galaxia-galaxia. Otros objetos descubiertos recientemente son las “galaxias guisante” (*green pea galaxies*), similares a los nódulos de formación estelar observados en galaxias compactas con líneas de emisión, pero más luminosas. El UV es también un dominio espectral adecuado para el estudio del medio interestelar galáctico y del medio intergaláctico.

La instrumentación propuesta para EUVO pretende incrementar la eficiencia de la transmisión en un factor 50-100 combinando una mayor superficie colectora (8m), un aumento en la eficiencia del detector y mejoras **en el diseño del espectrógrafo. Este tendría resoluciones entre moderadas y altas ($R \approx 20,000-100,000$) en los rangos espectrales 900-2000Å and 2000-4000Å** incluyendo configuraciones de larga rendija y capacidades de IFS a $R \approx 500-1000$.

3. CONTRIBUCIÓN ESPAÑOLA A GRANDES COLABORACIONES INTERNACIONALES

3.1. ESA - Astrophysics from Space

3.1.1. *La era de Gaia*

La *Red Española para la Explotación Científica de Gaia*, se creó en 2010 y, en la actualidad, 140 investigadores de 32 instituciones diferentes forman parte de ella. Los principales objetivos de la red son: (1) la preparación para la gran tarea que representará la explotación de la misión científica Gaia; (2) la transferencia a la comunidad científica la experiencia de los grupos que participan en la preparación de la misión Gaia; (3) la coordinación de los intereses comunes en líneas actuales y futuras de investigación; (4) el análisis de las sinergias con cartografiados actuales y futuros realizados tanto desde tierra como desde el espacio; y (5) la coordinación de la contribución española a las redes europeas de Gaia (GREAT, ITN).

3.1.2. *JWST*

El Telescopio Espacial James Webb (JWST) es el sucesor del Telescopio Espacial Hubble (HST). Con un diámetro de 6.5 metros tiene una superficie colectora unas 6 veces mayor que la del HST. Destinado, en parte, a la observación de galaxias lejanas, el JWST está diseñado para operar en el rango rojo-infrarrojo (de 0.6 a 28 μ a muy baja temperatura, lo que limitará su tiempo de vida a un período entre 5 y 10 años.

El JWST es una colaboración entre NASA, ESA y la Agencia Espacial Canadiense. JWST estará dotado de cuatro instrumentos principales: MIRI, una cámara y espectrógrafo de campo integral en el infrarrojo medio; NIRSpec, un espectrógrafo infrarrojo; NIRCam, una cámara en el IR cercano y el FGS-NIRISS que combina un sensor de guiado, imagen y espectroscopía en el IR. MIRI es el primero de estos instrumentos en completarse. En su diseño y construcción han participado equipos de distintos países europeos, entre ellos España

NIRSpec es uno de los 4 instrumentos científicos del telescopio espacial JWST. Está diseñado para operar en el rango de 0.6 a 5 micras como espectrógrafo multi-objeto y espectrógrafo de campo integral, pudiendo obtener simultáneamente espectros de 100 objetos en un campo de 9 x 9 minutos de arco. El desarrollo de este instrumento es responsabilidad de ESA y en él también participan equipos españoles.

3.2. ESO y grandes infraestructuras en desarrollo

3.2.1. *ALMA*

Los primeros datos de ALMA están comenzando a aparecer, revelando resultados espectaculares. Con ALMA, los estudios de gas molecular en galaxias están explotando con órdenes de magnitud de mejora de en sensibilidad y resolución. Esto quiere decir que, por primera vez, los estudios sobre las condiciones físicas, la dinámica y la química de las nubes moleculares extragalácticas están aproximándose al nivel de detalle disponible hasta ahora sólo para las nubes moleculares en nuestra galaxia.

Ejemplo de ello son los proyectos de investigación de dos galaxias LIRG: NGC1068 y NGC1614, liderados por astrónomos españoles que revelan cambios dramáticos en sus núcleos en temperaturas del gas y en su química en escalas de decenas de pc o menos, presentando importantes retos a los modelos actuales de impactos de AGN sobre el medio interestelar y la formación estelar de su entorno. Resulta notable la existencia de más de 15 proyectos en este campo con participación activa de la comunidad astronómica española, tres de los cuales están liderados por españoles.

En la parte más instrumental, un grupo de ingenieros español se ha encargado del desarrollo de los

amplificadores criogénicos de todos los receptores de las antenas de ALMA en la banda 7. Este trabajo se fundamenta en la experiencia adquirida por este grupo en el pasado a través del diseño y el desarrollo de amplificadores en colaboración con IRAM y la misión Herschel de ESA.

3.2.2. *El E-ELT*

El proyecto del “telescopio europeo extremadamente grande”, E-ELT, consiste en un telescopio con un espejo de 39m de diámetro constituido por 800 segmentos de 1.4m cada uno, y con un espesor de sólo 50mm. Posee un espejo secundario proporcionado, de 4.2m de diámetro. Los espejos están dotados de correspondientes actuadores que aportan capacidades de óptica adaptativa que permiten corregir los efectos de la turbulencia atmosférica. El telescopio de instrumentación científica de vanguardia en los rango óptico e infrarrojo cercano.

El E-ELT aumentará la fracción del universo que podemos resolver en estrellas en un factor 10, permitiendo obtener observaciones de estrellas individuales en galaxias fuera de nuestro Grupo Local y aplicar las técnicas desarrolladas para la derivación de sus edades y composiciones químicas en el caso de nuestra galaxia. Posibilitará la determinación de las abundancias químicas, presumiblemente extremadamente bajas, de las primeras estrellas formadas y la derivación de la función inicial de masa de las estrellas a distintas épocas cosmológicas, dilucidando así una de las preguntas fundamentales de la formación estelar: la universalidad o no de esta distribución. El E-ELT contribuirá en gran medida a la respuesta a muchas de las cuestiones abiertas en el campo de la astrofísica extragaláctica y es sin duda un instrumento de importancia estratégica para la comunidad científica española.

Equipos españoles participan en el desarrollo conceptual de HARMONI, uno de los dos instrumentos científicos seleccionados para la primera luz del E-ELT. HARMONI es un espectrógrafo de campo integral que operará en el óptico e (0.47 to 2.45 μm) con un poder de resolución R entre 4000 y 20000 capaz de proporcionar espectros simultáneos de unos 32000 spaxels en el IR (8000 en el visible) y una resolución espacial de entre 0.004 y 0.04 segundos de arco por spaxel.

3.2.3. *Square Kilometer Array, SKA*

El Square Kilometre Array (SKA) es un proyecto internacional planeado para entrar en funcionamiento al final de la presente década, con Australia o Sudáfrica como localizaciones más probables. Y consiste en un interferómetro con aproximadamente 3000 antenas de 15m cubriendo distancias de unos 3000 km que observará en el rango de frecuencias entre 0.07 y 10 GHz con una resolución espacial de entre 2 y 40 mili segundos de y que multiplicará la sensibilidad disponible en instrumentos de su categoría por un factor 50. Este instrumento aportará una información fundamental en el campo extragaláctico permitiendo la detección y selección de una enorme cantidad de objetos al alto desplazamiento al rojo. Además, la alta resolución angular del SKA, combinada con su gran sensibilidad permitirá distinguir entre AGN y formación estelar en los centros de galaxias hasta $z \approx 7$. También permitirá la determinación de la proporción de AGN de baja luminosidad presentes en los distintos tipos de galaxias y obtener la función de masa completa de los SMBH.

En galaxias normales, el SKA permitirá la realización de estudios detallados de regiones HII extragalácticas, incluyendo las regiones ultra-compactas (UCHII), en galaxias hasta 50Mpc pudiéndose obtener cartografiados detallados de la formación estelar en las mismas.

El consorcio en que está integrado SKA incluye varios países europeos, entre ellos: Reino Unido, Holanda, Italia y Alemania y Europa en su conjunto, a través de acciones financiadas dentro del VII Programa Marco de la Unión Europea. Aunque nuestro país no forma parte de este consorcio, la comunidad astronómica española ha manifestado un claro interés en este proyecto.

4. PAPEL CLAVE DE LAS ICTS ESPAÑOLAS

Aunque la participación en grandes proyectos es sin duda importante para que la Astrofísica española ocupe un lugar relevante a nivel internacional, estos grandes proyectos siempre requieren del complemento y apoyo de otros proyectos de menor envergadura, generalmente llevados a cabo por grupos pequeños constituidos por unos cuantos investigadores y, en gran medida hacen uso de las ICTS. Por otra parte, la realización de los grandes cartografiados previstos con telescopios de gran apertura (8-10m), dará lugar a un gran número de proyectos de seguimiento que son idóneos para ser llevados a cabo en telescopios más pequeños con la instrumentación adecuada.

En lo que respecta a espectroscopía, la obtención simultánea de observaciones en el mayor rango de longitudes de onda posible es imperativo para la derivación de una espectrofotometría fiable, requisito fundamental en estudios de poblaciones estelares y abundancias del gas nebuloso, por ejemplo. Esto requiere el uso de espectrógrafos de más de un brazo. **ISIS en WHT** (La Palma) y **Twin en CAHA 3.5m** son dos de los instrumentos de acceso abierto en el hemisferio norte que cumplen con estas características y su uso es crucial para los grupos españoles. En lo que respecta a imagen en el óptico, la cámara de gran campo del INT (La Palma) sigue siendo un instrumento muy requerido por la comunidad española para un gran número de proyectos. En lo que respecta al dominio infrarrojo la cámara infrarroja **MAGIC en CAHA 3.5m** y el espectrógrafo **LIRIS en WHT** son instrumentos que pueden acometer una gran variedad de proyectos. Lo mismo puede decirse de los instrumentos en desarrollo para el futuro la cámara infrarroja **PANIC en CAHA 2.2m** y el espectrógrafo multi-objeto/IFU **WEAVE en WHT** (La Palma), que ya han sido comentados más arriba,

Pero, sin duda, GTC es el telescopio que debería dominar los próximos 10 años de la astronomía española en el hemisferio norte. Hasta ahora, su uso ha estado limitado por la instrumentación disponible, y también por la gran fracción de tiempo comprometido para grandes proyectos ESO-GTC, pero el advenimiento de los instrumentos en marcha para la próxima década, harán de él un instrumento clave para los estudios extragalácticos. Dentro de los instrumentos futuros esperados para GTC el modo MOS de OSIRIS y MEGARA (MOS e IFU) en el óptico, y EMIR y MIRADAS en el infrarrojo serán de la mayor utilidad para el desarrollo de muchos de los proyectos delineados más arriba.

EMIR es una cámara de gran campo y un espectrógrafo multi-objeto de resolución intermedia en el infrarrojo. En modo MOS podrá observar hasta 50 objetos simultáneamente.

MEGARA (Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía) es una unidad de campo integral (IFU) y espectrografo multi-objeto (MOS) en el óptico ((R~6000, 11000 and 18700). En modo IFU proporcionará una resolución espacial de hasta 0."42. En modo MOS, permitirá la observación de hasta 100 fuentes simultáneamente en una región de 3.5' x 3.5'.

Finalmente, MIRADAS es un espectrógrafo echelle (R=20000) multi-objeto que operará en el infrarrojo, entre 1 y 2.5 μ .

En lo que respecta a la estructura galáctica, las ICTs españolas están jugando un papel clave en el hemisferio norte (2014-2016): 1) hay programas de largo plazo, con investigadores principales españoles, que se están llevando a cabo con WFC@INT, HERMES@MERCATOR, FIES@NOT, 2) hay contribuciones españolas al proyecto SLOAN-APOGEE; 3) CAFOS@CAHA2.2m está llevando a cabo la caracterización de los estándares espectroscópicas para los espectrómetros de Gaia.