

INFORME SOBRE EL ESTADO ACTUAL DE LA FISICA ESTELAR Y SUBESTELAR EN ESPAÑA Y SUS NECESIDADES FUTURAS (2015-2025).

RED DE INFRAESTRUCTURAS EN ASTRONOMÍA

I. Domínguez (UGR), M. Fernández (IAA), R. Garrido (IAA), A. Herrero (IAC), R. Rebolo (IAC), M.R. Zapatero Osorio (CAB)

INDICE

ESTRELLAS Y OBJETOS SUBESTELARES

ESTRELLAS MASIVAS

ESTRELLAS DE MASA BAJA E INTERMEDIA

FASES AVANZADAS DE EVOLUCIÓN: AGB, POST-AGB Y PNE

ÚLTIMAS FASES DE EVOLUCIÓN ESTELAR

OBJETOS SUBESTELARES: ENANAS MARRONES, PLANETAS AISLADOS Y EXOPLANETAS

INFRAESTRUCTURAS UTILIZADAS: TELESCOPIOS Y SATÉLITES

INFRAESTRUCTURAS UTILIZADAS: ORDENADORES.

INFRAESTRUCTURAS FUTURAS. NECESIDADES.

BORRADOR

ESTRELLAS Y OBJETOS SUBESTELARES

El estudio de la formación y evolución de las estrellas y objetos subestelares (enanas marrones y exoplanetas) constituye un campo de singular actividad en nuestro país. Las estrellas son utilizadas como trazadoras de la estructura y evolución dinámica y química de las galaxias y el Universo. A grandes distancias observamos el brillo de las regiones que iluminan y nos permiten derivar sus propiedades físicas a través del tiempo. Sus últimos estadios nos permiten trazar la expansión del Universo y penetrar en él profundamente. Más cerca de nosotros, nos revelan detalles de la estructura de la Vía Láctea y sus épocas anteriores. Las enanas marrones y los exoplanetas nos están desvelando los detalles de la formación de sistemas como nuestro propio Sistema Solar y en definitiva, la estructura de nuestro propio planeta y su papel en el Universo.

En este documento se presenta una perspectiva de la situación actual y de las necesidades futuras inmediatas de la investigación en este campo, desde las estrellas más masivas, las de masa intermedia y baja y las enanas marrones, a los objetos de masa planetaria. Evolutivamente, se contempla desde la formación de discos protoplanetarios a las fases avanzadas y los objetos compactos resultantes de la evolución estelar (agujeros negros, estrellas de neutrones, etc.), incluyendo los fenómenos explosivos que presentan al final de su vida (como supernovas y GRBs).

Debe tenerse en cuenta que este documento es una primera aproximación a dicha perspectiva, y que es necesariamente incompleto, y probablemente sesgado. Una mayor participación de la comunidad (algunos de cuyos miembros han ayudado al equipo firmante a elaborarlo, lo que agradecemos profumamente) y una más cuidada reflexión son necesarias para una correcta exposición del estado actual y las necesidades futuras.

ESTRELLAS MASIVAS

Contexto

Las estrellas masivas nacen con masas superiores a ocho veces la masa del Sol, lo que las condena a explotar como Supernovas al final de su vida, formando estrellas de neutrones y agujeros negros y produciendo Estallidos de Rayos Gamma. Su evolución es muy rápida, y durante la misma liberan gran cantidad de material procesado nuclearmente a través de fuertes vientos estelares (pueden perder hasta el 90% de su masa) emitiendo gran cantidad de radiación en forma de fotones de alta energía. Al ser muy calientes y luminosas pueden estudiarse individualmente en galaxias cercanas, en donde la física de estas estrellas puede aproximarse a la del Universo primitivo, y observarse colectivamente en regiones de intensa formación estelar a grandes distancias, incluso poco después de la reionización del Universo, que podrían haber causado. Su alta masa las predispone a formar sistemas binarios o múltiples, que pueden evolucionar a binarias de rayos X de alta masa y formar objetos compactos. La formación de las estrellas masivas sigue pautas diferentes a las de las de menor masa, y aun no se conocen bien sus mecanismos. Hay un activo debate acerca de este punto, con diversos escenarios confrontados, no necesariamente excluyentes, incluyendo la posible fusión de estrellas antes de alcanzar fases avanzadas de su evolución. Esta combinación de sistemas múltiples y fusiones podría afectar a distribución de masas inicial de las estrellas (la Función Inicial de Masas).

Las estrellas masivas constituyen el origen de fenómenos tremendamente energéticos y un agente primario de la evolución química y dinámica de las galaxias y del Universo. Sin embargo, aun hoy plantean importantes interrogantes, lo que precisamente limita nuestra capacidad para entender la evolución de las galaxias y el Universo. Curiosamente, a pesar de todos los avances de la física estelar, carecemos aun de algo tan básico como una idea clara de las distintas fases por las que pasa una estrella masiva en su evolución.

Cuestiones abiertas

Entre los principales interrogantes abiertos en nuestro entendimiento de las estrellas masivas podríamos destacar:

- El impacto: ¿ cómo eran las primeras estrellas que nacieron en el Universo? ¿ fueron responsables de la reionización del Universo? ¿ cómo cambian las propiedades de las estrellas masivas con el tiempo cósmico? ¿ cuál es su interacción con el medio que las rodea? ¿ cuál es su papel en el enriquecimiento químico del universo desde las primeras estrellas hasta la actualidad?
- Las condiciones iniciales: ¿ cuál es el mecanismo de formación de las estrellas masivas? ¿ cuál es la fracción de estrellas masivas en sistemas múltiples interactivos y cuál es su destino? ¿ cuál es su velocidad de rotación al nacer? ¿ hay un campo magnético fósil en las estrellas masivas?
- La masa de las estrellas masivas: ¿ cuál es la mayor masa que puede alcanzar una estrella? ¿ cuál es la distribución de masas (la llamada *Función Inicial de Masas*) para estrellas masivas? ¿ hay estrellas masivas formadas por la fusión de otras de menor masa? ¿ Cómo podemos conocer la masa de una estrella aislada?
- La evolución de las estrellas masivas: ¿ qué produce la contaminación temprana de las capas superiores de la atmósfera por material procesado en el interior? ¿ cómo se ordenan los diferentes tipos espectrales que observamos a lo largo de la evolución de una estrella? ¿ cuál es la relación entre la masa inicial y final de la estrella, y cómo cambia con la metalicidad? ¿ cuál es el papel de la rotación, el campo magnético y las pulsaciones?
- El viento de las estrellas masivas: ¿ cuáles son la estructura y propiedades del viento de las estrellas masivas? ¿ por qué parece fallar la teoría de los vientos estelares para algunas estrellas? ¿ cómo varía la pérdida de masa estelar cuando nos acercamos a las condiciones del Universo primitivo? ¿ cuál es la pérdida de masa en las fases de viento intensos (Wolf-Rayets y Variables Azules Luminosas)? ¿ Determinan éstas el residuo final (estrella de neutrones o agujero negro)?
- Las estrellas masivas en la Vía Láctea y otras galaxias: ¿ cuántas estrellas masivas hay en la Vía Láctea? ¿ Dónde se encuentran? ¿ cuáles son las distancias a estas estrellas en la Vía Láctea? ¿ forma la Vía Láctea cúmulos muy masivos? ¿ cuántos hay? ¿ Cómo se comparan con los cúmulos formados en otras galaxias? ¿ Qué papel desempeñan los cúmulos de estrellas masivas en el centro Galáctico? ¿ cómo influyen en la energética y dinámica del material susceptible de ser capturado por su agujero negro masivo?

Situación en España

La investigación sobre estrellas masivas en España es muy activa, con alrededor de media docena de grupos trabajando en todo el territorio y un fuerte reconocimiento internacional en el campo. La investigación sobre estrellas masivas que se realiza en España se concentra en algunos aspectos clave ligados a las preguntas formuladas arriba.

Existe una fuerte componente observacional. La comunidad española lidera algunos catálogos espectroscópicos ópticos como GOSSS y IACOB y cartografiados infrarrojos, bien con datos propios (MASGOMAS/WHT, ISAAC/VLT) o con datos de archivo (como 2MASS, que ha permitido la identificación de la serie de cúmulos en la Vía Láctea bautizados como "Alicante") y se participa activamente en otros internacionales (OWN, GES) intentando formar una extensa base de datos de alta calidad. Otros esfuerzos se concentran en la observación en galaxias cercanas, intentando cubrir un amplio rango de metalicidades y entornos usando en todo el rango de longitudes de onda.

Se cuenta con una gran experiencia en el análisis de datos utilizando modelos de atmósferas, y se trabaja activamente en el desarrollo de métodos automáticos de análisis, lo que es muy importante para aprovechar bien los cartografiados mencionados y exige bastante esfuerzo computacional, al tener que barrer un amplio espacio de parámetros.

Actualmente estos estudios se centran en el papel de la metalicidad, la rotación estelar, y la posible presencia de pulsaciones y campos magnéticos y en determinar el modo que las estrellas masivas evolucionan, especialmente mediante el estudio de cúmulos estelares masivos, sistemas binarios y fases peculiares de evolución, tanto en la Vía Láctea como en galaxias cercanas que sirvan de modelo para el Universo primitivo. Además, trabajos recientes se centran en revelar la estructura de la Vía Láctea a través de sus cúmulos masivos (aún desconocidos).

ESTRELLAS DE MASA BAJA E INTERMEDIA

Contexto

Las estrellas se forman en nubes moleculares, que son regiones con cierta densidad de gas y polvo, como resultado de la aparición de núcleos densos de materia. En nuestra Galaxia se siguen formando estrellas hoy en día. Está ampliamente aceptado el hecho de que las estrellas se forman en sistemas altamente jerarquizados que siguen la estructura fractal del medio interestelar. La estructura jerarquizada se extiende desde complejos estelares (grandes porciones de los brazos espirales de galaxias flocculentas) a través de cúmulos embebidos a estrellas individuales en esos cúmulos. La escala de los cúmulos es la mejor métrica para medir y analizar todo el intervalo espacial en la formación de sistemas estelares.

El campo magnético de la Galaxia desempeña un papel fundamental en la formación estelar. La turbulencia hidromagnética actúa de manera selectiva permitiendo el colapso gravitacional en escalas pequeñas mientras que sostiene la estructura de la nube en las grandes escalas. El tamaño y las propiedades de los granos de polvo en el medio interestelar desempeñan un papel fundamental en este proceso.

El campo magnético galáctico es transportado en el colapso gravitacional que da lugar a la formación de estrellas. En los sistemas jóvenes, precursores de sistemas planetarios como el nuestro, las estrellas jóvenes poseen unas magnetosferas muy poderosas que canalizan el flujo de acrecimiento durante la formación de la estrella. Estas magnetosferas son una fuente de radiación UV y X que desempeña un papel fundamental en la evolución de los discos protoplanetarios. La radiación UV controla la extensión de las termosferas planetarias, la interacción atmósfera planetaria-espacio y su evolución/estabilidad.

Las estrellas de baja masa tienen una vida larga ($\sim 10^{11}$ años) en comparación con las estrellas más masivas cuya vida puede ser inferior al millón de años. Es posible encontrar entre ellas algunas que se formaron hace unos 13.000 millones de años, cuando el Universo, era muy joven. Tras la explosión como supernova de las primeras estrellas, el medio interestelar se enriquece muy rápidamente en elementos pesados. La composición química de las estrellas de baja masa más antiguas de la Galaxia nos permite medir los isótopos producidos en la nucleosíntesis primordial, que tuvo lugar tras el Big Bang, así como los productos de las primeras supernovas.

Tras una etapa estable, de miles de millones de años en la secuencia principal, las estrellas de baja masa inician la combustión de elementos más pesados que el H y se transforman en gigantes rojas. Aunque la duración de esta fase es más corta (un 10% aproximadamente de la vida en la Secuencia Principal), aun pasan mucho tiempo en esta fase, y su mayor brillo, especialmente en el infrarrojo, las hace excelentes trazadoras de la estructura galáctica e indicadoras de distancias.

Cuestiones abiertas

Los mecanismos de formación estelar siguen planteando numerosas preguntas. A nivel de la estructura estelar, la misión CoRoT ha abierto nuevos interrogantes sobre la estructura interna de las estrellas. El uso de estrellas de masa baja e intermedia (hasta la fase de RGB) para trazar la estructura de la Vía Láctea y su historia pasada descansa sobre nuestro conocimiento de las propiedades de estas estrellas. Es fundamental comprender el papel del campo magnético en la formación de las estrellas y los sistemas planetarios.

Todavía quedan muchas preguntas clave por responder en estos campos. Entre ellas podemos destacar

- ¿Cuál es la influencia de la dimensión fractal de una nube en la nueva población de estrellas que se está formando en su seno?
- ¿Cómo se forman las estrellas en un cúmulo?
- ¿Cómo interactúan las magnetosferas de las estrellas jóvenes con los discos de acrecimiento?
- ¿Cómo interactúan las magnetosferas estelares con las atmósferas planetarias germinales?
- ¿cómo se producen los jets? ¿cómo afectan los jets a la evolución de los discos?
- ¿qué fracción de estrellas binarias se forman por evolución y cuántas por captura en las regiones de formación de estrellas?
- ¿cómo afecta la binaridad a la evolución magnetosférica?
- ¿Cuál es la estructura 3D de la Vía Láctea? ¿Cuál es la estructura de su barra central? ¿Ha generado la interacción de esta barra con los brazos una formación estelar especialmente intensa?
- ¿Por qué es el parsec central de la Galaxia una región de formación estelar tan prolífica?
- ¿Existe una variación acimutal de abundancias en la Vía Láctea?
- ¿En qué medida la variación de la metalicidad de entre galaxias o incluso entre zonas de nuestra Galaxia, puede afectar a las características del polvo interestelar y al acoplamiento de las nubes con los campos magnéticos galácticos? ¿cómo afecta este hecho a la función inicial de masas?

- ¿Cuál es la composición química de las estrellas más pobres en metales? En particular, ¿cuál es la razón de abundancias de los diferentes elementos químicos en estas estrellas y qué nos dicen sobre las primeras épocas de la Vía Láctea?

Situación en España

El estudio de la formación de estrellas de masa baja e intermedia se aborda en España desde distintas perspectivas. Hay grupos que estudian fases muy tempranas a través de observaciones radioastronómicas, examinando tanto los núcleos en colapso como las eyecciones de materia que acompañan al proceso de colapso gravitatorio. Estos grupos estudian la emisión infrarroja de los discos protoplanetarios y de los discos formados por restos del material alrededor de la estrella, mientras que otros grupos estudian la emisión visible y variable de las fotosferas de las estrellas pre-secuencia principal. Otros grupos a su vez estudian la interacción entre las magnetosferas y los discos de acrecimiento durante toda la evolución pre-secuencia principal; desde la formación de jets y choques de acrecimiento al efecto de la radiación estelar en la evolución del disco.

El medio interestelar y el estudio de su radiación (mayoritariamente en ondas de radio y en infrarrojo) es abordado también por diferentes grupos en nuestra comunidad.

Los grupos españoles que investigan la estructura estelar conjugan su experiencia observacional, derivada del uso de instalaciones situadas en Canarias, en Sierra Nevada o en Calar Alto y del análisis de datos, con su experiencia teórica, comparando sus resultados observacionales con modelos teóricos adaptados a la astrosismología que incluyen la noadiabaticidad, la rotación hasta segundo orden, la convección dependiente del tiempo y la interacción pulsación-atmósfera unida a todo lo anterior. Todo ello además de estudiar el papel que juegan las opacidades en las estrellas de baja masa y de estudiar exhaustivamente los coeficientes de oscurecimiento en el limbo para un amplio conjunto de parámetros estelares. Estos grupos de astrosismología están organizados en un entorno europeo: SPACEIN.

También hay varios grupos españoles que concentran su actividad en el análisis químico de estrellas de masa baja e intermedia en la secuencia principal, o en la rama de gigante roja, haciendo uso de datos del Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Los espectrógrafos de baja resolución del SDSS han observado varios cientos de miles de estrellas de tipos espectrales FGKMLT, que se han utilizado por grupos españoles para buscar estrellas pobres en metales, estudiar las diferencias entre los discos grueso y delgado de la Vía Láctea, aplicar técnicas automáticas de clasificación espectral, o estudiar la evolución química del halo de la Galaxia. Los mejores candidatos a estrellas pobres en metales son examinados en detalle utilizando los telescopios en el ORM, ESO y otros observatorios.

Hace tres años, el SDSS incorporó a su suite de instrumentos un espectrógrafo de alta resolución que opera en la banda H (1.5 -1.7 μ m). Este instrumento, capaz de observar de manera simultánea 300 estrellas en un campo de 7 grados cuadrados, es la herramienta fundamental del proyecto APOGEE (Apache Point Observatory Galaxy Evolution Experiment) que proporciona parámetros estelares y abundancias químicas para unos 15 elementos, con los que está construyendo hasta Junio de 2014 un mapa 3D de la distribución y evolución química de la Vía Láctea con más de 100.000 estrellas, y continuará en una segunda fase (APOGEE-2) hasta 2020. El análisis de los espectros de APOGEE es totalmente automático, utilizando software desarrollado por grupos españoles que participan en el experimento.

El satélite GALEX (NASA) ha proporcionado el primer mapeo (casi completo) del cielo en el UV. El análisis de los datos de GALEX para determinar las propiedades y distribución del polvo en el medio interestelar utilizando la banda NUV y comparando con los mapeos realizados en el IR (2MASS) y óptico (UCAC) está siendo realizado por un grupo español. Este análisis está permitiendo también el estudio de la población galáctica en el UV y su preparación para el análisis conjunto con los resultados de Gaia y la definición del programa central de observaciones astronómicas del WSO-UV.

FASES AVANZADAS DE EVOLUCIÓN: AGB, POST-AGB Y PNE

Contexto

Tras una etapa estable en la Secuencia Principal que varía entre varias decenas de millones y miles de millones de años en función de su masa, las estrellas de masa baja e intermedia inician la combustión de elementos más pesados que el H. Antes de acabar su evolución, pasan por la fase AGB, expulsan su envoltura y se convierten en post-AGBs y PNe. Las AGBs son las principales productoras de elementos fundamentales para la vida como el carbono, de la mitad de los elementos más pesados que el hierro (a través del proceso-s) y de elementos con implicaciones cosmológicas como el Li. Sus núcleos, de carbono y oxígeno, son los progenitores de las enanas blancas, determinando su distribución en masa y la relación entre masa inicial y masa final. Esta fase es un buen laboratorio de astrofísica nuclear, en particular, para las reacciones de producción y captura de neutrones.

Las estrellas AGB son muy brillantes, particularmente en el infrarrojo, y pueden ser estudiadas de forma individual en galaxias cercanas. En sus últimas fases, las estrellas AGB expulsan el material que dará lugar a la nebulosa planetaria cuando la estrella central, progenitora de la enana blanca, se contraiga. Las nebulosas planetarias son objetos en transición desde las últimas fases evolutivas de las estrellas de masa baja e intermedia hacia la etapa de enana blanca, en la que acaban convirtiéndose. Las nebulosas planetarias concentran gran parte de la energía emitida por su estrella central en unas pocas líneas de emisión, y pueden llegar a observarse en los cúmulos cercanos de galaxias, hasta Virgo y Coma. Ambos tipos de objetos ofrecen así una excelente oportunidad para investigar el Universo cercano.

Cuestiones abiertas

Tenemos un conocimiento general de todas estas etapas pero quedan cuestiones fundamentales por resolver. Destacamos entre ellas

- los mecanismos y ritmos de pérdida de masa que determinan, entre otras cuestiones, la duración de la fase AGB,
- la evolución desde la fase AGB a la formación de las PNe,
- los procesos físicos que determinan la mezcla de material en el interior de las AGBs y la nucleosíntesis asociada,
- la formación de polvo y moléculas – incluidas moléculas complejas, hidrocarburos y fullerenos
- la composición química detallada de las atmósferas y envolturas circunestelares
- las propiedades morfológicas y dinámicas de estas atmósferas y envolturas
- la dependencia de todo lo anterior con la metalicidad inicial, desde las primeras poblaciones a las super-ricas en metales.

- la asociación de la morfología de la nebulosa planetaria con las propiedades de la estrella progenitora
- la búsqueda de compañeras de la estrella que forma la nebulosa planetaria y cómo influye en su evolución
- la composición química de la nebulosa planetaria y su dependencia de la masa de su estrella central
- el papel de la binaridad en la morfología de la nebulosa y su evolución.

Situación en España

Diversos grupos estudian, tanto mediante observaciones como también teóricamente, las fases AGB, post-AGB y la correspondiente formación de nebulosa planetaria. Todos ellos son referentes a nivel internacional en este campo.

La emisión de estos objetos se observa en el rango del óptico, infrarrojo cercano y medio, y radio -- donde tienen su máxima emisión--, tanto con instrumentos desde Tierra como desde el espacio. Las técnicas empleadas son principalmente espectroscopía de media y alta resolución, fotometría e interferometría. Los estudios se centran fundamentalmente en la determinación de la composición química detallada de las atmósferas de estos objetos, el estudio químico y dinámico de sus envolturas circunestelares (detección de moléculas complejas, hidrocarburos, fullerenos etc) y la formación y composición química del polvo estelar que se origina en ellas. Las correspondientes simulaciones numéricas requieren una gran capacidad de cálculo y, en algunas ocasiones tanto los modelos de atmósfera como los de evolución deben realizarse en tres dimensiones.

La observación de las fases iniciales de la formación de las nebulosas planetarias y de estructuras más compactas se beneficia del uso de las antenas de 30m de IRAM y de la de Robledo de Chavela o de los interferómetros de Plateau de Bureau y VLA. Recientemente, observaciones en el infrarrojo medio en el límite de difracción del 10m GTC y VLT han abierto nuevas vías en el estudio de las regiones centrales más compactas de estos objetos. Igualmente deben destacarse las observaciones en el infrarrojo lejano con Herschel. El rango óptico ha sido fuente de información sobre la morfología, cinemática, composición química e incluso búsqueda de compañeras binarias en nebulosas planetarias para numerosos grupos. Estos estudios han incluido datos obtenidos con telescopios del ORM (NOT, WHT, INT) y CAHA. También se participa en el Working Group de ESO-Gaia survey dedicado a la identificación y análisis de estrellas AGB. Finalmente, en la última década estos estudios se han extendido al rango de los rayos X haciendo uso de los observatorios espaciales Chandra de la NASA y XMM-Newton de la ESA.

La investigación de las nebulosas planetarias ha sido objetivo prioritario de diferentes grupos de astrónomos españoles, entendiéndose esta pluralidad por la diversidad de longitudes de onda que se emplean en su estudio. Las fases iniciales de la formación de las nebulosas planetarias y la incidencia de las estructuras más compactas en su posterior desarrollo han sido temas de trabajo clásicos en observaciones en radio-frecuencias.

ÚLTIMAS FASES DE EVOLUCIÓN ESTELAR

Contexto

Al final de su evolución las estrellas forman una variedad de objetos: objetos compactos, binarias de rayos X y gamma, supernovas termonucleares y por colapso gravitatorio y GRBs. Todos ellos constituyen excelentes laboratorios de física nuclear, de partículas y de física en condiciones extremas, son claves para entender la evolución estelar y pueden producir intensas ondas gravitatorias.

El 95% de las estrellas son de masa baja e intermedia, y al final de sus vidas se convierten en enanas blancas (salvo en su extremo de menor masa, en que no llegan a encender el He), tras una fase AGB y PNe. La mayoría de las enanas blancas son de carbono y oxígeno, aunque hay enanas blancas de oxígeno y neon, que procederían de las estrellas intermedias más masivas, pero cuyo origen no se entiende completamente. También hay una extensa población de enanas blancas de He aisladas, cuya formación solo nos explicamos en sistemas binarios.

Cuando las enanas blancas forman parte de un sistema binario pueden acretar materia desde una compañera, dando lugar a novas, binarias de rayos X o supernovas de tipo Ia (SNIa), explosiones termonucleares de enanas blancas en sistemas binarios. Las SNIa son las principales productoras de Fe y tienen un papel clave en Cosmología pues debido a su alta luminosidad y la posibilidad de calibrarlas a partir de su curva de luz, constituyen los mejores indicadores de distancia extragalácticos. Las SNIa han trazado la historia de la expansión del Universo, mostrando la aceleración actual (Nobel de Física 2011). Este descubrimiento sorprendente se basa en las características conocidas de este tipo de objetos, cuya comprensión resulta pues fundamental para caracterizarla.

El otro 5% de estrellas, que corresponde a las estrellas masivas, explota tras el colapso gravitatorio del núcleo (CCSNe), emitiendo GRBs, formando estrellas de neutrones y agujeros negros, y expulsando al medio interestelar material enriquecido con los elementos químicos producidos por las reacciones nucleares ocurridas en su interior a lo largo de toda su evolución, y en la misma explosión. A partir de este material se forman nuevas estrellas y planetas, y en definitiva, la vida. La energía, la radiación y la materia expulsada por las CCSNe son claves para la evolución de las galaxias, los cúmulos de galaxias y el Universo. Se cree que estos objetos precedieron la formación de las galaxias, marcando la evolución del Universo primitivo.

También los remanentes de estrellas masivas pueden formar parte de un sistema binario y acretar masa de una compañera. En este caso, la alta intensidad de sus campos gravitatorios causa la emisión de radiación a alta energía, en rayos X y en ocasiones en rayos gamma, al caer el material acretado. En las binarias X transitorias se encuentran los más firmes candidatos a agujero negro y, por tanto, la posibilidad de caracterizarlos. Estos sistemas son excelentes laboratorios de física fundamental.

Uno de los grandes retos de la física fundamental y la astrofísica es la detección de las ondas gravitatorias. Esperamos que las fuentes más potentes de ondas gravitatorias sean eventos violentos, como las fusiones de agujeros negros y de estrellas de neutrones. Detectarlas nos llevará a entender la física de estos objetos, contrastar la teoría de la relatividad general y nos abrirá sin duda nuevos horizontes. Simultáneamente es importante planificar y detectar la contrapartida electromagnética.

Cuestiones abiertas

Aunque se ha avanzado mucho en este campo gracias a las simulaciones numéricas y a las observaciones, quedan por resolver cuestiones fundamentales. Citamos, por ejemplo,

- ¿ cuál es el origen de las distintas poblaciones de enanas blancas?
- ¿ cuál es la distribución de masas de las enanas blancas, y su relación masa inicial - masa final? ¿ y las de las estrellas de neutrones y agujeros negros estelares?
- ¿ cuál es la masa máxima de una estrella de neutrones (y mínima para formar un agujero negro estelar)? ¿ cuál es la ecuación de estado de las estrellas de neutrones?
- ¿ cuál es origen de las SNIa? la identificación de los progenitores aun espera una confirmación observacional
- ¿ cuál es el mecanismo de explosión de las supernovas termonucleares? ¿ depende de la metalicidad? ¿ Qué SNIa pueden utilizarse como patrones de distancia?
- ¿ cuál es la relación masa inicial-masa final en las progenitoras de CCSNe? ¿ cómo influyen en ella la metalicidad y la pérdida de masa durante las fases anteriores? ¿ cuánto material se libera y cuánto queda atrapado en el objeto compacto?
- ¿ qué fracción de los distintos elementos químicos es liberado al medio por cada progenitor? ¿ cómo varían esas fracciones en función de las propiedades de los progenitores?
- ¿ cuál es el mecanismo de explosión de las estrellas masivas tras el colapso del núcleo?
- ¿ cómo se produce la acreción sobre los objetos compactos en sistemas binarios? En particular, ¿ cómo se transfiere el momento angular?
- ¿ cuál es el origen de los GRBs? ¿ Cómo varían sus propiedades con el tiempo cósmico?
- ¿ cuál es el papel de la rotación y los campos magnéticos en todos los escenarios?
- ¿ Cómo se origina la radiación gamma en las binarias de rayos gamma?
- ¿ cómo se produce la fusión de objetos compactos? ¿ Cómo detectamos ondas gravitatorias? ¿ Y axiones, WIMPs, y otras partículas exóticas?
- ¿ cuál es la composición química de los discos planetarios?

Todas las fases explosivas mencionadas y la nucleosíntesis asociada, dependen del estudio experimental y teórico de las reacciones nucleares relevantes y los resultados son la base para entender la evolución química de las galaxias y el Universo.

La rotación y pérdida de masa del progenitor son fundamentales para entender las explosiones y su conexión con los GRBs, que se cree que se producen al formarse chorros relativistas durante el colapso del núcleo. Las simulaciones necesarias para entender estas fases requieren los ordenadores más potentes. Probablemente aún no tengamos una buena muestra de todos los posibles finales de una estrella masiva, como puede ser la desestabilización por pares (*pair instability supernovae*) que podría explicar la SN 2007bi, o explosiones que desconocemos.

Situación en España

Hay grupos españoles trabajando en las curvas de luz y los espectros de las CCSNe utilizando los telescopios del ORM. En un plano más teórico, otros grupos son referentes en las simulaciones hidrodinámicas relativistas de este tipo de objetos y en la estructura de las estrellas de neutrones. Estos grupos se apoyan en los ordenadores más potentes, con los que se trata de describir entre otros problemas la evolución de los campos

magnéticos en estos objetos compactos, en cuyo centro se busca evidencia de los quarks. El estudio de los enigmáticos GRBs y su origen se realiza mediante simulaciones numéricas multidimensionales magnetohidrodinámicas y observaciones a través de su seguimiento mediante telescopios robóticos en todas las longitudes de onda.

Los grupos españoles son líderes reconocidos en el campo de las binarias de rayos X, tanto de alta como de baja masa, y en el estudio de las binarias de rayos gamma. Algunos grupos han sido pioneros en la caracterización de las binarias de rayos X a través de observaciones y de simulaciones numéricas, y hay una fuerte interacción entre los grupos estelares de binarias de rayos X y los grupos que participan en telescopios como MAGIC, donde España tiene una presencia muy importante, haciendo un amplio uso de datos en todo el espectro electromagnético.

Otros grupos estudian la fase de enana blanca mediante simulaciones numéricas detalladas incorporando todos los procesos físicos relevantes. En base a estos modelos se estiman, por ejemplo, la edad del disco de la Galaxia y/o propiedades de candidatos a materia oscura, como los axiones. Estos grupos realizan también simulaciones numéricas multidimensionales de la fusión de objetos compactos (enanas blancas o estrellas de neutrones).

En el campo de las novae hay grupos españoles líderes a nivel internacional en simulaciones de la acreción, explosión y nucleosíntesis. Recientemente, han realizado simulaciones numéricas en 3D para estudiar la mezcla del material en las capas externas, y contrastan sus predicciones teóricas con observaciones de novae.

Los grupos españoles trabajan en todas las fases de las SNIa: progenitores, explosiones, curvas de luz, espectros, remanentes y aplicaciones cosmológicas. Se intenta detectar la compañera de la enana blanca tras la explosión. Se realizan modelos en 3D de la explosión y se estudia mediante simulaciones numéricas la influencia de los progenitores en las propiedades observadas, una cuestión clave para aumentar la precisión en la estimación de las distancias extragalácticas y poder desvelar la naturaleza de la energía oscura.

OBJETOS SUBESTELARES: ENANAS MARRONES, PLANETAS AISLADOS Y EXOPLANETAS

Contexto

Los objetos subestelares tienen una masa inferior a la mínima necesaria para la fusión nuclear del hidrógeno en su interior, esto es $M < 0.072 M_{\text{sol}}$ para una abundancia química solar. La masa de la frontera subestelar varía inversamente con la metalicidad. Los objetos subestelares incluyen a las enanas marrones con masas en el intervalo $0.072\text{-}0.012 M_{\text{sol}}$, y a los objetos de masa planetaria ($M < 0.012 M_{\text{sol}}$) que se encuentren flotando libremente (planetas aislados) o en órbita alrededor de una estrella o enana marrón, en cuyo caso es costumbre denominarlos exoplanetas.

(a) Enanas marrones y objetos aislados de masa planetaria (planetas aislados).

Debido a la carencia de reacciones nucleares de relevancia, no brillan como las estrellas, sus propiedades físicas varían notablemente con la edad, y para edades típicas del Sistema Solar son más parecidos a los planetas gigantes gaseosos (como Júpiter) que a

las estrellas. Su existencia, predicha teóricamente desde la década de 1960, fue confirmada mediante observaciones en longitudes de onda del visible e infrarrojo cercano en 1995, año en el que también se anunció el primer exoplaneta gigante en órbita alrededor de una estrella de tipo solar.

A pesar de que a día de hoy se conocen centenares de enanas marrones y cuerpos de masa planetaria aislados, los mecanismos de formación por los que se originan no están descritos ni desde el punto de vista observacional ni desde el teórico. Algunos observables, como son la fracción de sistemas binarios, la razón de masas entre las enanas marrones binarias, la presencia de discos y envolturas alrededor de los cuerpos subestelares, y el censo de la población en cúmulos estelares y asociaciones de estrellas jóvenes (función de masas) son fundamentales para proporcionar evidencias que apoyen o descarten distintos mecanismos y teorías para la formación subestelar. La caracterización de las atmósferas subestelares mediante síntesis espectral permite ahondar en las propiedades físico-químicas de gases neutros con condiciones de presión y temperatura a caballo entre los planetas del Sistema Solar y las estrellas de baja masa.

(b) Exoplanetas

El descubrimiento de los primeros planetas alrededor de estrellas similares al Sol en la década de 1990 inició una nueva era en los estudios planetarios. En apenas veinte años de investigación se han detectado más de 900 exoplanetas. La diferencia de brillo o alto contraste entre las estrellas y sus exoplanetas (superior a 10^6 en el visible e infrarrojo cercano) a las edades típicas del Sistema Solar y el tamaño de las órbitas de menos de ~50 UA imponen serias dificultades para la detección directa de los exoplanetas. En consecuencia, la mayoría de los descubrimientos proceden de técnicas indirectas espectroscópicas y fotométricas: medidas de velocidad radial y detección de tránsitos exoplanetarios. Consisten en detectar la huella que el planeta imprime en la luz de su estrella. Los descubrimientos exoplanetarios a día de hoy revelan una enorme riqueza de sistemas planetarios con propiedades distintas a las del Sistema Solar. La caracterización de las atmósferas planetarias ha comenzado con el estudio espectrofotométrico de la luz estelar en su paso a través de la atmósfera planetaria. Se espera así determinar la composición química y estado termodinámico de la atmósfera de los exoplanetas, lo que permitirá la búsqueda de signos de actividad biológica en planetas extrasolares.

Cuestiones abiertas

Desde el descubrimiento de las enanas marrones y los exoplanetas (aislados o en torno a una estrella) hay cuestiones abiertas de gran importancia químico-física. Muchas de ellas corresponden todavía a los conceptos más básicos:

- los mecanismos de formación de las enanas marrones, los exoplanetas y los sistemas planetarios extrasolares
- la fracción de sistemas dobles y múltiples la multiplicidad y la función de distribución de masas (críticos para comprender los mecanismos de formación)
- las distintas fases de evolución de todos estos sistemas
- las propiedades físicas de las atmósferas subestelares con temperaturas en el intervalo de los 2500 K a los pocos centenares de grados.
- cómo influyen las propiedades de la estrella en la formación y evolución de sus exoplanetas
- cómo influye la formación de un planeta o un sistema planetario en las propiedades de su estrella

- el papel de las estrellas y de su actividad magnética en la estabilidad y evolución de las atmósferas planetarias

Entre los objetivos científicos más perseguidos por las comunidades nacionales e internacionales y, a la vez costosos en términos de exigencias tecnológicas y económicas, se encuentran

- la detección de exoplanetas rocosos en la zona de habitabilidad de sus estrellas (órbitas en las que los planetas pueden mantener agua en estado líquido), y
- la caracterización de las atmósferas exoplanetarias en un rango amplio del espectro electromagnético y para un elevado número de exoplanetas.
- la búsqueda de trazadores biológicos en atmósferas exoplanetarias

Situación en España

Hay un amplio número de grupos trabajando en España en enanas marrones y planetas extrasolares.

Los investigadores en los distintos centros e institutos españoles trabajan y colaboran con equipos internacionales en prácticamente todas las áreas de investigación de las enanas marrones y planetas aislados, con contribuciones relevantes en algunas líneas, como es la determinación de órbitas de sistemas binarios y la búsqueda, detección y caracterización de enanas marrones y planetas aislados y fríos en regiones de formación estelar.

Los científicos en centros españoles trabajan en las dos líneas experimentales más potentes en el campo de los exoplanetas: la detección directa e indirecta, y la caracterización de las atmósferas exoplanetarias, con el fin de responder desde el punto de vista observacional a las cuestiones científicas que a día de hoy motivan proyectos futuros de gran envergadura para telescopios terrestres y espaciales. Las cuestiones se centran en la diversidad de sistemas planetarios, distribución de planetas en función de la masa y metalicidad estelar y en función del tamaño y periodo orbital, propiedades físico-químicas de los planetas, origen y evolución de los sistemas planetarios, y dinámica de sistemas planetarios múltiples (con dos o más planetas). Cabe destacar que uno de los hitos del campo es la búsqueda, detección y caracterización de un planeta rocoso en la zona de habitabilidad de una estrella.

INFRAESTRUCTURAS UTILIZADAS: TELESCOPIOS Y SATÉLITES

La astrofísica estelar y subestelar en España tiene una fuerte componente observacional, que sin embargo no es exclusiva. La mayoría de grupos tiene amplia experiencia en observaciones y se cubre la totalidad del espectro electromagnético, desde los rayos gamma a radio. Prácticamente en todos los campos se precisan telescopios de gran tamaño (8-10 m) para las observaciones espectroscópicas más difíciles, y telescopios de tamaño mediano (2-4 m) para observaciones fotométricas más profundas y estudios multiobjeto a mayor resolución, sin limitarse a estas técnicas. No obstante, existe un notable uso de telescopios de tamaño pequeño (1-2m) especialmente por su instrumentación de muy alta resolución o su uso fotométrico.

Los observatorios más utilizados son los que están en suelo español (ORM, OT, Calar Alto) y los del ESO. Entre ellos destacan los telescopios del VLT, el WHT y NOT. A un nivel similar de uso debe mencionarse el HST. Aunque los investigadores españoles acceden también a otros observatorios y telescopios (Keck, Gemini, AAO, etc.) es claro

que la Astrofísica estelar en España se ha beneficiado grandemente de la presencia de observatorios en nuestro suelo y en los últimos años, de la entrada en ESO, tanto a nivel observacional y tecnológico como incluso teórico. Prácticamente cualquier telescopio ha sido utilizado, así como los satélites más importantes (Spitzer, Herschel, CoRoT, HST, XMM-Newton, Chandra, etc.). GTC es ya ampliamente utilizado, si bien aún carece de algunas de las capacidades instrumentales más utilizadas por la comunidad en este campo. No obstante, por ejemplo, buena parte de las observaciones que han permitido a los grupos españoles avanzar en la caracterización de las atmósferas de exoplanetas se está realizando con el GTC empleando OSIRIS tanto con los filtros estrechos como con espectroscopía de baja resolución espectral y los estudios extragalácticos se benefician también ampliamente de su capacidad colectora.

La parte central del espectro (UV, óptico e infrarrojo cercano) es la zona más observada. El rango infrarrojo cercano y medio es fundamental para el estudio de las estrellas y regiones frías u oscurecidas y el trazado de la estructura de la Vía Láctea. Las enanas marrones y exoplanetas se benefician tanto del infrarrojo como de la parte más roja del visible, mientras que la fotometría y la espectroscopía en longitudes de onda visibles y UV nos permiten caracterizar las estrellas, bien en cúmulos, asociaciones y sistemas múltiples, o como objetos aislados, y las nebulosas ionizadas; así como estudiar la actividad magnética.

La espectroscopía óptica es ampliamente utilizada, con resolución media-alta ($R \sim 10000 - 80000$) en la mayoría de los casos, excepto en estudios extragalácticos o de objetos muy débiles, en donde la resolución puede bajar hasta $R \sim 1000$. En el caso de la asteroseismología, cabe destacar el papel jugado por la fotometría, y en especial el del satélite CoRoT (junto con Kepler, particularmente para los exoplanetas). La fotometría es también muy utilizada para el estudio de las poblaciones estelares, sobre todo más allá de la Vía Láctea.

La espectroscopía infrarroja de resolución intermedia ($R \sim 2500-10000$) también es ampliamente utilizada en conjunción con los cartografiados infrarrojos (2MASS, UKIDSS, GLIMPSE...) para la exploración de las regiones oscurecidas de la Vía Láctea. Una buena parte del trabajo sobre cúmulos emplea técnicas fotométricas, que son también muy utilizadas en el estudio de sistemas binarios. Como se ha descrito, SDSS y APOGEE juegan un importante papel en las investigaciones de la estructura de la Vía Láctea. En el caso de los objetos subestelares, las bases de datos públicas proporcionadas por telescopios terrestres y espaciales que operaron en el infrarrojo, como 2MASS, Spitzer y WISE, son fundamentales para comprender y caracterizar en gran medida la población subestelar en los alrededores del Sistema Solar. Para ello, los científicos españoles forman parte de amplias colaboraciones internacionales que ya están obteniendo datos, como "VISTA Hemisphere Survey" (VHS) cuyo objetivo es rastrear unos 20.000 grados cuadrados (aproximadamente la mitad) del cielo empleando el telescopio infrarrojo VISTA.

Los radiotelescopios son imprescindibles para el estudio de las fases más tempranas de la formación de una estrella o una enana marrón, y en general cualquier objeto en formación alrededor del cual se forma un disco o presenta una envoltura. Conforme el objeto evoluciona se va reduciendo la longitud de onda más corta a la que podemos hacer su estudio. Así, para la observación de discos protoplanetarios y de discos debrís se utiliza instrumentación a bordo de satélites (Herschel y Spitzer) e instrumentación infrarroja en tierra (CAHA, ORM); mientras que el estudio de las fotosferas se puede realizar desde tierra (ORM, CAHA, OSN Observatorio del Teide).

Los telescopios y satélites de rayos gamma y rayos X (MAGIC, XMM-Newton, Chandra) son de gran importancia en el estudio de las binarias masivas de rayos X y de rayos gamma (estas observaciones son luego complementadas por observaciones de seguimiento, normalmente con fotometría y espectroscopía óptica) y el estudio de objetos subestelares en su fase más temprana. Para las GRBs, resulta de gran importancia el observatorio robótico BOOTES.

La instrumentación empleada en el estudio de sistemas subestelares y binarias incluye en algunos casos la capacidad de una gran resolución espacial con modernas técnicas de óptica adaptativa y "lucky imaging" (necesarias para la detección de compañeros subestelares en órbita alrededor de estrellas, objetos binarios, y para el análisis de sus órbitas). Esta capacidad está disponible en telescopios de 2 m a 10 m en observatorios terrestres y espaciales, como los de las islas Canarias (Teide y Roque de los Muchachos), Calar Alto (Almería), los observatorios de la ESO en Chile (La Silla, Paranal, VISTA y ALMA), y los telescopios espaciales HST, Spitzer, XMM-Newton y Herschel.

La detección indirecta de los exoplanetas requiere intensos esfuerzos en medidas de velocidad radial, astrométricas y fotométricas. Hacen falta datos de excelente precisión (del orden del m s^{-1} en velocidad radial, y las milimagnitudes en fotometría), lo que exige instrumentación de nueva generación (como HARPS-N en el telescopio TNG del Observatorio Roque de los Muchachos) y, en algunas situaciones, telescopios de gran área colectora (superiores a los 3 m). Para la caracterización en el visible de las atmósferas de los exoplanetas gigantes y gaseosos, los investigadores emplean el Gran Telescopio Canarias, capaz de proporcionar curvas de luz con una precisión inferior a una milimagnitud y participan en el seguimiento y confirmación de candidatos a exoplanetas descubiertos mediante tránsitos fotométricos con los satélites Corot y Kepler, y los candidatos hallados por velocidad radial en exploraciones realizadas desde tierra por equipos internacionales.

Desde mediados de 2014 Gaia llevará a cabo el censo más completo, incluyendo mil millones de estrellas de nuestra Galaxia y de otras galaxias del Grupo Local. La precisión de Gaia en la determinación de posiciones no tendrá precedente y permitirá calcular distancias y flujos absolutos y con ellos el conjunto más fiable de parámetros estelares de muestras estadísticamente significativas de estrellas. Esto revolucionará la astrofísica estelar y el estudio de las poblaciones estelares en nuestra Galaxia y más allá. Gaia también descubrirá gran cantidad de planetas por medio de tránsitos. Los telescopios con capacidad para realizar un seguimiento de los datos de Gaia, especialmente espectroscópicos, tanto con las infraestructuras actuales como con los instrumentos en desarrollo jugarán un papel clave en la astrofísica de los próximos años. Es importante, sin embargo, que se mantengan a la vanguardia de la instrumentación en cada momento.

INFRAESTRUCTURAS UTILIZADAS: ORDENADORES.

Los ordenadores más potentes son necesarios para las detalladas simulaciones numéricas: desde las simulaciones de atmósferas y evolución estelar que incluyen extensas redes de reacciones nucleares, fenómenos de mezcla, detallados modelos atómicos o procesos alejados del equilibrio, hasta las sofisticadas simulaciones hidrodinámicas mutidimensionales de alta resolución para las SNIa o CCSNe (relativistas) y las simulaciones magnetohidrodinámicas para los GRBs. En comparación con la tradicional actividad de observación en el campo de la formación estelar, claramente consolidada, el desarrollo de modelos teóricos y numéricos ha ganado terreno en la última década.

La interpretación de las observaciones de estrellas incluye en muchos trabajos su análisis mediante modelos numéricos de atmósferas estelares. Hay varios grupos en España dedicados al desarrollo de estos modelos numéricos, si bien en algunos casos su trabajo en los últimos años está más centrado en las aplicaciones (es decir, el análisis de espectros estelares), incluyendo la exploración de métodos automáticos de análisis. El cálculo de estos modelos exige el uso de potentes ordenadores, en especial cuando se realizan cálculos en 2D o 3D. En muchas ocasiones, aunque no se llega a requerir las mayores capacidades actuales (gracias en parte al uso de técnicas desarrolladas cuando los ordenadores eran menos potentes), lo que si se requiere es el uso de gran número de procesadores de alto rendimiento. En el campo de las estrellas masivas, el uso de los modelos realiza una labor aglutinante entre los grupos españoles. Una clara preocupación de cara al futuro es que la formación de investigadores en el desarrollo de modelos se adecua mal a las presentes directrices para el desarrollo de tesis doctorales y carreras investigadoras.

Estos cálculos incluyen no solo los ordenadores de la RES como el Mare Nostrum o sus nodos más locales, sino también clusters de ordenadores conseguidos por los grupos, y los sistemas de cálculo distribuido tipo Condor. Los investigadores españoles también acceden a facilidades compartidas dentro del proyecto europeo PRACE.

INFRAESTRUCTURAS FUTURAS. NECESIDADES.

Por la naturaleza de las líneas de investigación descritas más arriba, los grupos que trabajan en estrellas requerirán en los próximos años de espectrógrafos multiobjeto de alta eficiencia y resolución intermedia-alta en grandes telescopios (tanto en el óptico como en el infrarrojo). Esto será necesario tanto para el estudio de estrellas masivas en entornos de baja metalicidad (con miras a extrapolar los resultados al Universo primitivo), como para el estudio de la estructura y evolución de la Vía Láctea, especialmente sus partes internas, el centro de la galaxia y el halo, así como en muchos otros campos. Estas necesidades deberán ser cubiertas por EMIR, MEGARA y MIRADAS en el GTC (cubriendo el hemisferio norte) y por FLAMES, KMOS y MUSE en el VLT (cubriendo el hemisferio Sur). De todos ellos, solo FLAMES lleva tiempo operativo, y KMOS ha sido recientemente instalado. En el GTC disponemos de OSIRIS, excelente instrumento para el estudio de objetos relativamente débiles a baja resolución, aunque sería muy conveniente reemplazar su detector, poco sensible en el azul.

La explotación de los datos de CoRoT y Kepler continuará siendo un punto fuerte en el estudio de la estructura estelar, pero deberá ser reforzado con esfuerzos alternativos que permitan optimizarla, tanto en tierra (p.ej., CARMENES, WEAVE) como en el espacio (PLATO).

Los investigadores españoles se encuentran estratégicamente posicionados para la explotación científica de los datos que se obtendrán con los proyectos futuros de inminente entrada en funcionamiento, como la misión espacial Gaia (lanzado con éxito a finales de 2013), cuyo objetivo científico es la compilación precisa en tres dimensiones de un catálogo de aproximadamente mil millones de fuentes de la Galaxia. Gaia contribuirá de manera decisiva a clarificar las propiedades de las estrellas en nuestra galaxia al poder determinar sus distancias con precisión sin precedentes.

Además de los referidos más arriba, para el seguimiento de Gaia serán necesarios espectrógrafos multiobjeto con un campo grande como p.ej., WEAVE en el WHT. Este

aspecto es clave, ya que Gaia cubrirá todo el cielo y los grandes telescopios están mal condicionados para grandes cartografiados. Igualmente, este espectrógrafo permitirá el seguimiento de numerosas estrellas y exoplanetas, haciendo posible la detección de nuevos sistemas estelares y planetarios y el estudio detallado de cúmulos y asociaciones estelares. Un instrumento como WEAVE permitirá además un seguimiento inicial de gran número de objetos de interés que puedan detectarse con el LSST. Este tipo de estudios se beneficiarán también de otras alternativas como CARMENES y PANIC en CAHA y PAU en el ORM.

El estudio detallado de la composición química de estrellas débiles (como las del halo, las que alojan planetas a distancias relativamente grandes o las que se encuentran en galaxias cercanas), la determinación precisa de velocidades radiales en estrellas individuales o sistemas binarios, o el estudio de pulsaciones y fenómenos explosivos exigirá también espectrografos de alta resolución en telescopios de la clase 8-10m, como HORS en el GTC, ESPRESSO en el VLT o CARMENES, que serán instalados a lo largo de los próximos tres años en los telescopios GTC (ORM), VLT (Paranal, Chile) y 3,5 m de Calar Alto (Almería), respectivamente. ESPRESSO tendrá la capacidad de detectar súperterras en órbitas habitables alrededor de estrellas de tipo solar, y CARMENES hará lo propio en estrellas de tipo espectral M. HORS y su versión ultrestable, HORUS, son una adaptación de un espectrógrafo anterior (UES) para el Gran Telescopio Canarias, y proporcionará datos con precisiones adecuadas para detectar exoplanetas.

Los trabajos sobre cúmulos muy masivos (en donde podemos encontrar las estrellas más masivas), regiones oscurecidas, sistemas subestelares y estrellas en otras galaxias se verá muy favorecido por el telescopio espacial JWST (NASA, ESA, y Agencia Espacial Canadiense, lanzamiento previsto para 2018) y su instrumentación infrarroja (en uno de cuyos instrumentos, MIRI, participan investigadores españoles). Dadas las condiciones excepcionales de la Antártida para el infrarrojo, se participa en la instalación y operación del telescopio IRAIT en el Domo C (Base Concordia), este telescopio es un proyecto piloto que servirá para caracterizar y verificar la calidad de las condiciones astronómicas en el Domo C, y servirá como base a la futura generación de telescopios e instrumentos en la Antártida. Se realizará, con la NIR/MIR cámara AMICA, un *survey* de las estrellas AGB en las Nubes de Magallanes.

Algunos de estos objetos exigen como paso adicional una alta resolución espectral, incluso en este rango infrarrojo. Aunque es posible lograrla hoy en día para la Vía Láctea, y el desarrollo de FRIDA combinado con una instalación de óptica adaptativa (preferentemente guiada por una estrella láser) permitiría su uso en el GTC, es necesario al menos un telescopio de la clase E-ELT para acceder a otras galaxias, por ejemplo con un instrumento como HARMONI, instrumento de primera luz para el E-ELT, en el que participan investigadores españoles. Un instrumento como éste permitirá obtener parámetros fundamentales de objetos estelares intrínsecamente débiles, así como la obtención de medidas espectro-fotométricas ultraprecisas en forma de series temporales susceptibles de ser utilizadas como precisos test de modelos numéricos teóricos, y la caracterización de sistemas binarios con objetos subestelares en cúmulos estelares cercanos de diversas edades y en regiones de formación estelar reciente.

Para ello sería muy deseable el desarrollo de una óptica adaptativa para el visible que pudiera combinarse con los espectrógrafos multiobjeto en el óptico. Este salto sería de gran interés tecnológico, y permitiría además el estudio de zonas de intensa formación estelar, donde la gran densidad de estrellas impide hoy en día acceder de modo eficiente.

Esta colección de instrumentos debe necesariamente completarse con un espectrógrafo de alta resolución en los telescopios de clase 4-40m para poder estudiar estrellas y sistemas estelares débiles con suficiente detalle.

En el submilimétrico y radio, tanto ALMA como el EVLA permitirán tanto estudios de continuo (distribución de energía) como espectroscópicos que proporcionarán información valiosa sobre los objetos subestelares y regiones frías en nuestra Galaxia.

A fin de seguir avanzando en el conocimiento del Universo de Altas Energías y aspectos de la física fundamental y de partículas, será necesario extender la capacidad actual de los telescopios de rayos gamma actuales. El proyecto CTA, un esfuerzo a nivel planetario donde España participa desde su origen de manera muy significativa, es clave para este avance. Existe la posibilidad, además, que el observatorio CTA-Norte (complementario al CTA-Sur) sea instalado en Tenerife, lo que además de muy importante para numerosos grupos españoles (no solo los directamente involucrados, sino también por ejemplo los que trabajan en binarias de rayos X, por limitarnos a la parte estelar) redundaría en un claro beneficio para la economía local y nacional y en el futuro del Observatorio del Teide.

El UV es una región espectral clave para las estrellas calientes, ya que emiten fuertemente a esas longitudes de onda, el estudio de la formación y evolución de los sistemas planetarios y la interacción atmósfera-estrella, así como la modelización de numerosos fenómenos en las estrellas. Actualmente el HST cubre estas necesidades, pero está llegando al fin de su ciclo de vida. La red europea de astronomía ultravioleta (NUVA), coordinada desde España, canaliza los esfuerzos de la comunidad europea por mantener un acceso al UV. Entre estos esfuerzos destaca el WSO-UV, clave para poder avanzar en el estudio de las estrellas a baja metalicidad en el halo de la Vía Láctea o galaxias cercanas (ya que al ser sus rasgos espectrales débiles debido a las bajas abundancias, requieren mayores espejos o más eficientes instrumentos que los disponibles en el HST). Las estrellas más débiles, como las enanas blancas o las estrellas centrales de nebulosa planetaria y las subenanas calientes, intrínsecamente débiles, requerirán también esta alta eficiencia en el UV.

España está estratégicamente situada para tener acceso al rango UV en la época de "oscuridad" post-HST. La estrecha colaboración con la agencia espacial de Rusia, ROSCOSMOS, ha permitido que se embarque un instrumento español para imagen y espectroscopia sin rendija, ISIS, y que se implemente un esquema compartido para las operaciones de la misión entre Madrid y Moscú. El WSO-UV será la única instalación científica en el mundo que proporcionará acceso al rango UV en la época post-HST. ISIS está diseñado para ser un instrumento de primera línea para la observación de la interacción estrella-planeta en exoplanetas detectados por tránsito, el análisis de la interacción magnetosfera disco en todo el rango (de estrella de tipo solar hasta enana marrón), el estudio de las poblaciones jóvenes y de las propiedades de las estrellas masivas en otras galaxias, jets y nebulosas de fuentes astronómicas, la interacción entre galaxias, las lentes gravitacionales o el papel de los halos galácticos en la formación estelar. La colaboración hispano-rusa garantiza un mínimo de un mes de observación al año a los científicos españoles. Además, uno de los dos "observatorios terrestres" (centros de operaciones) del WSO-UV estará en el campus de la Universidad Complutense de Madrid.

Grupos españoles participan en el desarrollo de la misión espacial EUCLID que proporcionará una exploración de más de 15000 grados cuadrados con una sensibilidad sin precedentes en el infrarrojo cercano, que facilitarán un censo de las enanas marrones

más frías, hoy denominadas enanas de tipo Y. Varios grupos españoles participan también en la propuesta de la misión espacial Plato, entre cuyos objetivos figura la detección de planetas tipo terrestre mediante tránsitos. La misión espacial CHEOPS (seleccionada por ESA para 2017) permitirá caracterizar los tamaños y las masas de los exoplanetas conocidos con una exquisita precisión y cuenta con la participación de científicos españoles.

Estos esfuerzos en el espacio requerirán de su contrapartida en Tierra para su seguimiento, en la forma de los espectrógrafos ópticos e infrarrojos descritos más arriba.

Diversos grupos españoles están involucrados en el desarrollo del satélite LISA Pathfinder, e-LISA y el telescopio Einstein, y junto con todos los grupos teóricos que trabajan en objetos compactos (enanas blancas, estrellas de neutrones, agujeros negros y fusiones) calculan teóricamente la emisión de estas ondas y la posibilidad de detectarlas con los diversos instrumentos que se encuentran en fase de diseño y/o construcción.

Una interesante iniciativa es CUNA: un laboratorio de astrofísica nuclear en el LSC (Canfranc) con el fin de determinar ritmos de reacciones nucleares a energías relevantes en la síntesis de elementos pesados en el interior de las estrellas AGB.

La capacidad de multiplexado de los instrumentos actuales y su precisión (y por ende, la naturaleza de los problemas físicos tratados) exige el desarrollo de grandes redes de modelos y métodos automáticos de análisis. Todo ello no es posible sin ordenadores de grandes prestaciones. Para los casos más complejos se requiere un ordenador tipo Mare Nostrum o CESGA, y para los casos moderadamente complejos es preciso contar con un ordenador tipo el nodo de La Palma del Mare Nostrum. Pero para aprovechar los desarrollos derivados de una mayor capacidad de observación, será necesario disponer de infraestructuras informáticas aun más potentes. La calidad de las observaciones actuales y las previstas hacen necesario introducir procesos físicos realistas en los modelos. Campos magnéticos, rotación, pulsaciones, hidrodinámica, inestabilidades, una geometría realista, datos y modelos atómicos precisos y la dependencia tempral son cuestiones que es necesario incorporar de manera consistente en los modelos, pero cuya interrelación complica las ecuaciones y los cálculos, al punto de no poder llevarse a cabo en los actuales ordenadores

Acrónimos en orden alfabético (hay que completarlo):

2MASS = "Two Micron All-Sky Survey"

ALMA = "Atacama Large Millimeter/submillimeter Array"

AMICA = "Antarctic Multiband Infrared Camera"

CAB = Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

CARMENES = "Calar Alto high resolution search for M dwarfs with exo-earths with a near-infrared Echelle spectrograph"

CHEOPS = "Characterizing Exoplanet Satellite"

CIRCE = "Canarias InfraRed Camera Experiment"

CSIC = Consejo Superior de Investigaciones científicas

CUNA = "Canfranc Underground Laboratory for Nuclear Astrophysics"

E-ELT = "European Extremely Large Telescope"

EChO = "Exoplanet Characterization Observatory"

EMIR = "Espectrógrafo Multiobjeto InfraRrojo"

ESA = Agencia Espacial Europea

ESO = Observatorio Europeo Austral

ESPRESSO = "Echelle spectrograph for rocky exoplanet and stable spectroscopic observations"

EUCLID = Misión espacial de la ESA para obtener el mapa de la geometría de la energía oscura.

GPI = Gemini Planet Imager

GTC = Gran Telescopio de Canarias

HARMONI =

HARPS-N = "High accuracy radial velocity planet searcher"

HIRES = "High Resolution Spectroscopy"

HORUS = "High Optical Resolution Ultra-stable Spectrograph"

HST= "Hubble Space Telescope"

IAA = Instituto de Astrofísica de Andalucía

IAC = Instituto de Astrofísica de Canarias

ICE = Institut de ciències de l'espai

INTA = Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial

IRAIT = "International Robotic **Antarctic** Infrared Telescope"

JWST = "James Webb Space Telescope"

MEGARA = "Multi-Espectrógrafo en GTC de Alta Resolución para Astronomía"

MIRADAS = "Mid InFRARED Astronomical Spectrograph"

MIRI = "Mid Infrared Instrument"

PRACE = "Partnership for Advanced Computing in Europe"

UAM = Universidad Autónoma de Madrid

UB = Universidad de Barcelona

UCM = Universidad Complutense de Madrid

UES = "Utrecht Echelle Spectrograph"

UPC = Universidad Politécnica de Cartagena

UPV = Universidad del País Vasco

USC = Universidad de Santiago de Compostela

VISTA = "Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy"

WISE = "Wide-field Infrared Survey Explorer"