

Editorial

El número del boletín que tenéis entre manos marca un hito, pues celebramos su X aniversario. Hace diez años ya (¡diez!) que se publicó por primera vez el “Boletín informativo de la Sociedad Española de Astronomía”. Como reza el tópic, mucho ha llovido desde entonces, y muchas cosas han cambiado.

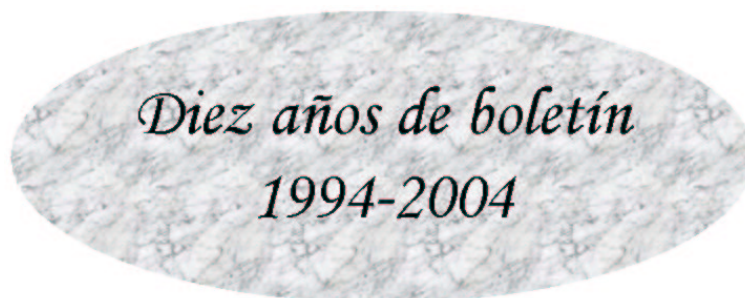
A partir de sus modestos (aunque ambiciosos) inicios, la SEA se ha consolidado como sociedad científica y la Astronomía española ha madurado a pasos de gigante. Hoy en día los temas que preocupan a los miembros de la SEA son de un orden de magnitud completamente distinto a los de hace diez años (véase por ejemplo el artículo de Emilio Alfaro titulado *Una Astronomía emergente*) así como los medios de observación disponibles o en construcción (véase la contribución habitual sobre el GTC). También han evolucionado los temas que nos ocupan, y un buen ejemplo de ello son los dos artículos de revisión dedicados a la Astrobiología incluidos en este número. Este neologismo hace diez años probablemente no resultaba familiar a muchos de nosotros, y hoy en día ya forma parte de nuestro vocabulario habitual.

Pero los nuevos tiempos también traen nuevos problemas. La publicación de textos científicos ha crecido exponencialmente y el precio de las publicaciones especializadas probablemente ha crecido a un ritmo aún mayor. Al mismo tiempo, las nuevas tecnologías de la información nos proporcionan mecanismos mucho más baratos y eficaces para la diseminación del conocimiento. Estos dos factores están obligando a la comunidad científica a replantearse los mecanismos habituales de publicación, abriendo la posibilidad de un cambio en el paradigma actual de la publicación en papel. La Comisión de Información de la SEA y los editores de este boletín quisiéramos iniciar este debate en el seno de nuestra sociedad, y para ello hemos incluido un artículo dedicado a la publicación de revistas electrónicas en España y en particular a la iniciativa REVICIEN. Os animamos a leerlo y abrir el debate.

Combinando historia y actualidad, este número incluye también un artículo y diversas fotografías sobre el tránsito de Venus que tuvo lugar el 8 de junio. Hemos tenido la suerte de poder asistir a un evento que tardará más de un siglo en repetirse y en esta ocasión los astrónomos hemos hecho un notable esfuerzo por compartirlo con el resto de la sociedad, con gran éxito como podréis ver. Finalmente, el boletín incluye también el apartado habitual dedicado a reseñas de tesis doctorales.

Para concluir, podéis ver en la página siguiente, como curiosidad histórica, una reproducción de la portada del primer número del boletín que tal vez os permitirá haceros una mejor idea del cambio que estos diez años han supuesto para la SEA. Los editores, por nuestra parte, nos sentimos orgullosos de haber aportado nuestro granito de arena en este proceso.

Los Editores



DIEZ AÑOS DE BOLETÍN

SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMIA
Comisión de Información
Boletín Informativo/Número 1

SEA-Boletín/Número 1

Editores: B. Montesinos, X. Barcons
31 de Mayo, 1994

BOLETIN INFORMATIVO**Contenidos**

- Presentación
- Informes de las Comisiones
- II Asamblea Ordinaria de la SEA
- Anuncios de Congresos
- Propuestas de observación para ISO
- Solicitudes de adhesión de nuevos miembros
- Fechas límite para solicitud de tiempos de observación

1 Presentación

Este es el primer número del Boletín Informativo de la SEA. Cualquier comienzo es difícil y este no es una excepción, de modo que te pedimos benevolencia ante los fallos que puedas encontrar y te animamos a que, con toda libertad, envíes tus opiniones e ideas sobre qué debe y no debe ser incluido en el Boletín para que lo tengamos en cuenta en próximos números. Desde ahora mismo queda abierto el buzón de sugerencias en la siguiente dirección electrónica de la Comisión de Información de la SEA: seac1@astro.unican.es. Agradecemos de antemano tu colaboración para que esta Sociedad que empieza a funcionar constituya un cauce eficiente y fluido de comunicación y cooperación entre los astrónomos españoles.

Hemos incluido aquí aquellos puntos sobre los que queremos llamar tu atención con la mayor urgencia posible. Dos apartados importantes son la información sobre la II Asamblea de la SEA, que celebraremos en Alicante el próximo mes de Septiembre, y las instrucciones para que puedas acceder a la base de datos de la Sociedad Española de Astronomía donde se está almacenando y actualizando todo aquello que es útil tanto para nuestro trabajo como astrónomos como para el funcionamiento de la SEA en sí misma. Incluimos también informes de algunas Comisiones, anuncios de Congresos y Escuelas internacionales que se celebrarán en España en los próximos meses, e información sobre el procedimiento para la petición de tiempo en el observatorio ISO y las fechas límite para la petición de tiempo en otros observatorios. Por favor, envía por

Página 1 del primer Boletín de la SEA, publicado en mayo de 1994. Si tenéis un minuto, id a la página web de la SEA -o al propio número en papel si aún lo tenéis guardado- y leed alguno de sus contenidos, en particular los que se refieren a “modernidades” de comunicación como [gopher](#) y [mosaic](#) o donde se explica paso por paso lo que es un [ftp](#) anónimo

REVICIEN: vertebrando las publicaciones científicas españolas

Manuel de León¹ mdeleon@imaff.cfmac.csic.es

¹ Manuel de León es Profesor de Investigación del CSIC, Vicepresidente Primero de la Real Sociedad Matemática Española, Presidente del Comité Español de Matemáticas y Presidente del International Congress of Mathematicians ICM2006-Madrid.

Los orígenes

En 2002 comenzamos a preparar un curso a celebrar en el marco de los Cursos de Verano de El Escorial, fruto de nuestra preocupación por el futuro de las publicaciones científicas en el campo de las Matemáticas. Este curso estaba co-dirigido con José Luis Puerta Cózar, quién sufría esa preocupación en el ámbito de la Medicina. Aunque parezcan ámbitos dispares, debe decirse que Matemáticas y Medicina son áreas en las que la publicación electrónica está muy desarrollada. El nexo de unión fue Manuel González Villa, a la postre Secretario del curso Ciencia en el siglo XXI: El futuro de las publicaciones electrónicas/ El futuro electrónico de las publicaciones, celebrado en septiembre de 2003

Los objetivos del curso eran hacer una radiografía de la situación actual, con unas revistas en manos de editoriales internacionales cada vez más potentes y con precios abusivos, con una incertidumbre sobre el futuro de los soportes electrónicos, con unos científicos que pierden absolutamente el control de su trabajo, con un sistema editorial, en fin, que cada vez dificulta más el acceso a la literatura científica a los países en vías de desarrollo, cuando paradójicamente, la comunicación electrónica debería hacerlo mucho más fácil.

También se quería hacer una revisión de los aspectos legales sobre la propiedad del trabajo científico. ¿Tiene el conocimiento dueño o debería ser una propiedad común a la humanidad y por lo tanto de acceso completamente libre?

Uno de los aspectos que se trataron fue el de la visibilidad internacional de la ciencia española. Hacía unos meses que Juan Aréchaga, Editor Jefe del *International Journal of Developmental Biology*, había publicado un artículo en *El País* señalando un hecho importante: los científicos españoles ya sabemos publicar (y con cierto éxito) en las revistas internacionales, pero, ¿hemos conseguido que los científicos internacionales más importantes publiquen con asiduidad en las revistas que se editan en España? ¿No sería este hecho una buena medida de la calidad de la ciencia española? ¿Y no sería importante contar con una “industria nacional” de publicaciones científicas hechas desde España para el mundo?

Descripción de REVICIEN

Una de las invitadas al curso fue Elena Sanz Pérez de Guzmán, Directora de Ciencia Digital, una empresa dedicada al mundo de la publicación electrónica. El mensaje que quisimos transmitir no cayó en terreno estéril. Poco después



Fig. 1.: Imagen de Manuel de León en el curso del Escorial

de celebrado el curso, Elena Sanz se puso en contacto con nosotros para ofrecer su empresa y crear una Plataforma de Revistas Científicas Españolas (REVICIEN) que “compitiera” con las grandes plataformas internacionales, ¿un David español contra un Goliat multinacional? No era esa la idea, si no el poder contar con una herramienta independiente de las grandes empresas editoriales y con carácter español. La Plataforma, ya en marcha, pretende, entre otros objetivos:

- Conseguir una mayor visibilidad a las revistas científicas españolas que reúnan unos apropiados estándares de calidad.
- Ofrecer el contenido de las mismas: índices incluyendo un resumen, o bien, digitalizarlas y ofrecer los textos completos, bien con acceso libre (quizás con un *moving wall*) o mediante pago, según decidan los editores de cada una.
- Búsquedas por diferentes campos.
- Servicios de alerta electrónica.
- Ofrecer a los editores un servicio de noticias de prensa.
- Todo ello, con las infinitas posibilidades de enlaces internos y externos de la plataforma.

REVICIEN se financia en esta primera etapa de puesta en marcha con una Acción Especial del extinto Ministerio de Ciencia y Tecnología, y en el futuro, aparte de las subvenciones que se puedan conseguir, serán fundamentalmente las aportaciones de las propias revistas las que financiarán la plataforma. Un aspecto importante es la modestia del presupuesto, demostrando una vez más que la voluntad y las ganas de servicio a la comunidad son más poderosas que el mero impulso económico.

El futuro

REVICIEN está ya en marcha, con una treintena de revistas, y esperando que otras muchas se sumen al proyecto. Es una acción de vertebración de la ciencia española; los científicos

españoles hemos partido en la carrera de la investigación con retraso y con grandes handicaps, pero también sabemos hacer propuestas novedosas. Si el prometido aumento de la financiación de la ciencia española se convierte en una realidad, REVICIEN estará ahí ya preparada para alcanzar cotas más importantes con el apoyo institucional apropiado.

Referencias complementarias

- J. Aréchaga: La importancia de publicar en España, El País, miércoles 17 de abril de 2002.
 - M. González-Villa: Curso y Manifiesto: El futuro de las Publicaciones Electrónicas, La Gaceta de la RSME, Vol. 6.3 (2003), 533-542.
 - E. Sanz Pérez de Guzmán: Nace REVICIEN, una nueva plataforma on line para las revistas científicas españolas, La Gaceta de la RSME, Vol. 7.2 (2004), 313-316.
 - Página web: <http://www.rsme.es/pe/portada.html>
-

Una Astronomía emergente

Emilio J. Alfaro¹ emilio@iaa.es

¹IAA-CSIC, Coordinador Ejecutivo del SOC, JENAM2004)

No hace mucho que hemos sido convocados a las urnas para elegir los representantes a un parlamento europeo que engloba a 25 países. Sorprendentemente la abstención ha sido muy alta en media, y marcadamente elevada en aquellos territorios de reciente incorporación. No obstante, la mayoría de los ciudadanos de estos países opinan que la pertenencia a la UE es algo bueno para sus bolsillos aunque no tengan el menor interés en los aspectos políticos de la incorporación. No sé si os pasa a ustedes, pero yo noto un paralelismo notable entre esta situación y la que estamos viviendo en la astronomía europea.

El antiguo Mercado Común fue el elemento aglutinador de la nueva Europa: mejoremos nuestra economía con un mínimo coste de independencia. Al igual, el Observatorio Europeo Austral (ESO) ha sido y es el eje de una astronomía europea común: hagamos juntos los telescopios e instrumentos que nunca podríamos fabricar de forma aislada. Todos los países del viejo continente queremos participar en ESO, pero una vez solucionados los aspectos técnicos y económicos volvemos a trabajar con presupuestos localistas.

Es cierto que el proceso creativo es un vicio solitario, pero la estructura cultural, social, económica y educativa donde el parto tiene lugar, no es solo el escenario del drama sino la misma urdidumbre del hecho científico. Entonces, ¿tiene sentido hablar de una astronomía europea como una macroestructura singular, o, como dicen algunos, la astronomía europea es, simplemente, lo que hacen los astrónomos europeos? No tengo respuesta a esta pregunta, pero si creo que tenemos los mimbres necesarios para aproximarnos a esta cuestión y, como decía el poeta, hacer camino al andar.

El próximo 13 de septiembre comienza en Granada la JENAM2004, la reunión conjunta de la Sociedad Europea de Astronomía (EAS) y la Sociedad Española de Astronomía (SEA). Hasta la fecha hay unos 500 astrónomos pre-registrados. Su número no es muy alto si lo comparamos con el número total de astrónomos europeos o, si me apuráis, con la masiva asistencia que acompaña a las reuniones de la Sociedad Americana de Astronomía (AAS), pero creo que es suficiente e incluso adecuado para establecer nuevas e interesantes conexiones. No os voy a relatar las múltiples cualidades de este producto sin par; básteme señalaros la dirección donde podéis encontrar los detalles organizativos y científicos del evento (<http://www.iaa.es/jenam2004>).

Alguien resumió la ciencia del siglo XIX como el éxito de la formulación lineal de la Física, mientras que el siglo XX se ha encargado de demostrar su no linealidad. Los procesos simbióticos y emergentes dominan el nuevo paradigma científico, la Biología parece echarle la pata a la otrora poderosa Física, e incluso la vitalista e iconoclasta selección natural es hoy, para muchos, el dogma de una decadente iglesia. ¿Se necesita un motor para poner en marcha la Astronomía Europea? Quizás no, quizás sólo baste que

creemos las conexiones necesarias entre el número adecuado de elementos para que ésta emerja de forma natural. La JENAM2004 puede ser un buen intercambiador. A ver si venimos, nos conectamos y emergemos.

Granada a 30 de Junio de 2004






<http://www.iaa.es/jenam2004/>

The many scales in the Universe

- Roads to cosmology
- The life of galaxies
- Your favourite stars and their environments
- The Sun and planetary systems
- Real and virtual instruments
- Teaching and communicating astronomy

GRANADA

Joint European and National Astronomical Meeting
 13-17 September, 2004





CONTRIBUCIONES

El Gran Telescopio Canarias. Seis segmentos ya en La Palma y las Plataformas *Nasmyth* montadas

J. Miguel Rodríguez Espinosa espinosa@ll.iac.es

Resumen

Los últimos seis meses han visto crecer el GTC rápidamente. Parece como si hubiera dado el estirón de la adolescencia. Aparte de la montura mecánica que ha llegado hasta las Plataformas Nasmyth, también se ha recibido y probado en el ORM la Cámara de Verificación, las Cajas de Adquisición y Guiado, el primer conjunto de segmentos del primario, y varios armarios y elementos de Control. Los instrumentos científicos también avanzan y ya empiezan a verse piezas del cargador de máscaras de OSIRIS en los talleres del IAC, dónde además se ha instalado ELMER para su integración y pruebas. Este ritmo va a continuar ya que en los próximos meses se recibirá un nuevo lote de segmentos, el secundario y el terciario. Todo espero que antes del próximo boletín.

Como en otras ocasiones lo que sigue es un repaso a los diferentes subsistemas del GTC de modo que quede una imagen clara del estado del proyecto.

Cúpula

Ya se han empezado a realizar las reparaciones de los defectos con que quedó la cúpula después de cerrado el contrato. Estos trabajos de reparación se han postergado para permitir que la contrata del telescopio pudiese operar la compuerta de observación, para introducir la piezas grandes de la estructura mecánica. En la actualidad se están haciendo los preparativos para el arreglo final que tendrá lugar a lo largo del verano. Estos preparativos son complicados ya que involucran trabajos mecánicos de envergadura en el exterior de la cúpula. Hace unos meses se detectó el fallo de algunos eslabones de las cadenas que transmiten las cargas de la compuerta principal. Esto da idea de los esfuerzos a los que puede estar sometida esa cadena debido al mal estado de los mecanismos de la cúpula. Todos estos problemas esperamos que queden solucionados con los trabajos de reparación que se están llevando a cabo.

Telescopio

La montura mecánica del telescopio es lo que ha mostrado mayor cambio en los últimos meses. En efecto, la montura ha crecido rápido y en el momento de escribir esto se pueden ver las Plataformas *Nasmyth* (Figuras 1 y 2) ya colocadas. Recientemente se han hecho pruebas de rotación del telescopio para ver el comportamiento con el peso de la estructura ya montada, y se ha comprobado que la rotación sigue estando en sus valores nominales. El telescopio puede seguir moviéndose con la mano, si bien ahora se nota la mayor inercia debido a las 140Tm ya montadas. Aparte de lo



Fig. 1.: La plataforma *Nasmyth* B durante su montaje

instalado en el interior de la cúpula, todas las piezas restantes del telescopio están en La Palma. La celda del espejo primario se está montando en el exterior del edificio, al resultar más fácil de medir y trabajar sobre ella sin limitaciones de espacio y altura (Figura 3). Una vez montada se introducirá entera en el interior de la cúpula para su colocación preliminar apoyada en una estructura provisional. El paso siguiente será el montaje del anillo de Elevación, que se introducirá en el interior de la cúpula por trozos. Una vez instalado el anillo de elevación, la celda del primario se sujeta de este anillo. El próximo punto clave en el montaje será el alineado de los muñones de elevación, que son quienes definen el eje de elevación, y por tanto son críticos para el apuntado y seguimiento de telescopio. El montaje del telescopio hasta ahora se está realizando con una metrología muy cuidada en cada paso. Así seguirá siendo hasta la terminación de la montura del telescopio, que se espera esté lista antes de fin de año.

Óptica

El primer conjunto de seis segmentos del espejo primario está ya en La Palma. Esto ha sido después de haberse completado su pulido, y haber pasado con éxito las pruebas de aceptación. La superficie óptica de los segmentos ha quedado en especificaciones, con algún segmento teniendo valores por debajo de 20 nanómetros. Algún segmento sin embargo ha quedado marginal debido a problemas con la máquina de

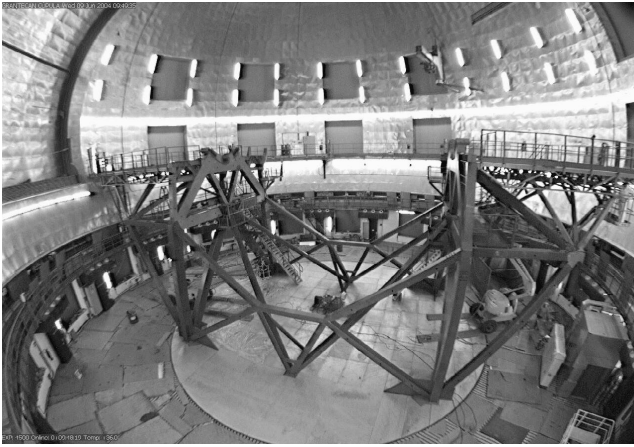


Fig. 2.: Aspecto del interior de la cúpula mostrando el estado del montaje de la estructura del GTC con las plataformas *Nasmyth* a ambos lados

pulido iónico. En todo caso los valores están dentro de tolerancias y podemos decir que tenemos un primer conjunto de segmentos de muy buena calidad. En palabras de Jerry Nelson, director científico durante la construcción de los telescopios Keck, los primeros segmentos del GTC son ciertamente mejores en calidad óptica que los del Keck. La figura 4 muestra este primer conjunto de segmentos montados en su configuración de prueba en asociación, en la fábrica de SAGEM, cerca de París. La figura 5 muestra un interferograma del conjunto de segmentos. Una foto complicada de hacer, por cierto, ya que incluso las mínimas vibraciones ambientales impedirían la producción de franjas en una superficie óptica tan grande. Aún así pueden verse franjas que recorren casi todo el largo de la asociación de segmentos, lo que muestra la calidad óptica de éstos.

El siguiente conjunto de seis segmentos está asimismo siendo terminado. Se espera que esté listo a principios de julio, y en La Palma hacia finales del mismo mes, con lo que si se consigue esto el ritmo de pulido estaría en un conjunto de seis segmentos cada tres meses. Si esto es así no habría problema en llegar a Día Uno con los 36 segmentos en la fecha estipulada. Por el contrario, lo que está pasando es que la acumulación de segmentos en La Palma, más otros sistemas como las cajas de Adquisición y Guiado, subceldas del primario, etc, están produciendo un problema logístico de espacio hasta tanto no se puedan instalar en su localización definitiva en el telescopio.

Los espejos secundario y terciario están asimismo muy avanzados. El secundario está a falta de dos ciclos térmicos antes de sus fases finales de pulido. Esperamos tener el secundario en La Palma en los próximos meses. El espejo terciario ya está también casi finalizado. Se han hecho interferogramas de alta resolución y se espera realizar la revisión de aceptación en las próximas semanas con lo que su envío, primero a Bélgica donde se le instalará su montura, y enseguida a La Palma, será inminente después de esto.

La empresa NTE (Barcelona), responsable de los mecanismos del secundario, está realizando un gran esfuerzo para sintonizar adecuadamente los servos del secundario, de

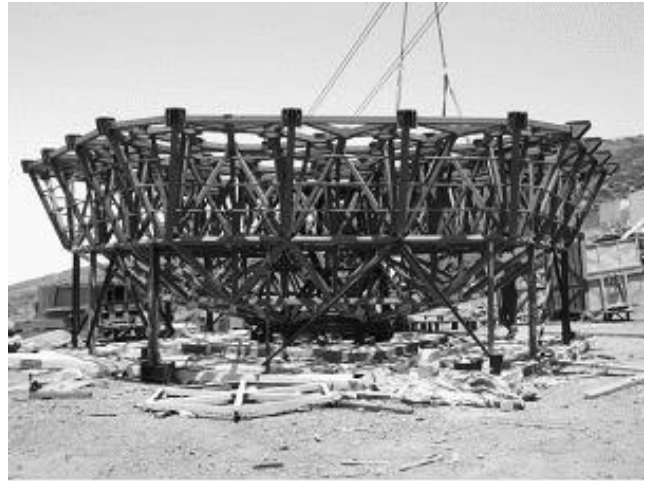


Fig. 3.: La celda que soportará al espejo primario durante su montaje en el exterior del edificio. Nótese la complicada estructura de esta celda, necesaria para mantener la rigidez estipulada frente a deformaciones gravitatorias.

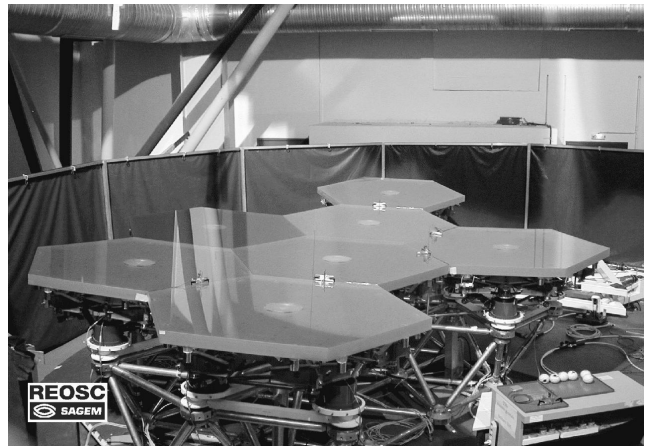


Fig. 4.: Siete segmentos (el primer conjunto de seis más el segmento maestro) en su posición de prueba en asociación. Foto cortesía de SAGEM.

tal manera que se cumplan las especificaciones. Especialmente los requisitos de basculación (*chopping*) a 5 Hz con amplitud de 15" y 80% de ciclo libre están resultando complicados de alcanzar. Se espera no obstante que este proceso converja en breve, con lo que pronto tendremos el espejo secundario y sus mecanismos en La Palma. Inmediatamente después se instalará el sistema de control y se podrá empezar a hacer pruebas para entender bien este importante elemento del GTC. Importante porque de él depende el buen alineado de la óptica, así como las prestaciones de guiado rápido y basculación para el infrarrojo.

Por último, las cajas de Adquisición y Guiado, así como la Cámara de Verificación también han llegado ya al observatorio, habiéndose probado a su llegada. Todo ha funcionado de acuerdo con lo esperado. Se han probado también las interfases del sistema de control del GTC con estos sistemas, habiendo sido las pruebas satisfactorias. Ahora se está a la espera de integrarles el sistema de control defini-

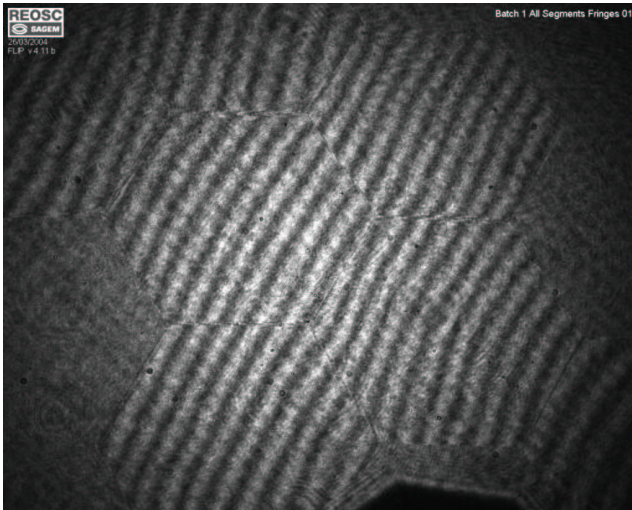


Fig. 5.: Interferograma de los 7 segmentos en la configuración de asociación. Nótese como pueden verse franjas a todo lo largo del montaje, lo que habla de la calidad óptica de los segmentos. (Fotografía cortesía de SAGEM)

tivo que permitirá probar la funcionalidad completa de las cajas de Adquisición y Guiado así como de la Cámara de Verificación. No recuerdo haber mencionado anteriormente el hecho de que con la Cámara de Verificación y la Caja de Adquisición y Guiado se podrán tener 3 sensores de frente de onda actuando en el GTC, con lo cual para las etapas iniciales de puesta a punto del GTC, tendremos un equipamiento que permitirá separar diversos tipos de aberraciones del primario y secundario, facilitando las labores de puesta a punto.

Control

Mientras escribimos esta nota acaba de distribuirse la séptima entrega de código de Control. Cada entrega contiene más funcionalidad que la anterior manteniendo esencialmente la misma arquitectura.

El control de alto nivel, que es el más cercano a los usuarios está relativamente avanzado, si bien algunos paquetes faltan todavía. Con la contratación el año pasado de los primeros astrónomos de soporte, éstos están ayudando bastante a probar algunos de los programas que forman parte de la OPMS (*Observation Products Management Service*). La OPMS se encarga de todo lo que tiene que ver con la preparación de propuestas, simuladores de los diversos instrumentos, gestión de la base de datos de los bloques de observación, etc. Igualmente, la Máquina de Observación (OE) está muy avanzada y se está revisando su diseño final por paquetes bien definidos. El primero que se está viendo por ejemplo es el módulo de apuntado, que utiliza las librerías de apuntado de Pat Wallace (*Rutherford Applied Laboratory*), si bien tiene una importante parte desarrollada por la Oficina de Proyecto. Lo mismo se va a hacer con los demás módulos de control de alto nivel que se irán examinando a lo largo de este año de modo que estén listos cuando se vayan necesitando en el telescopio. Por ejemplo, gran parte de la funcionalidad

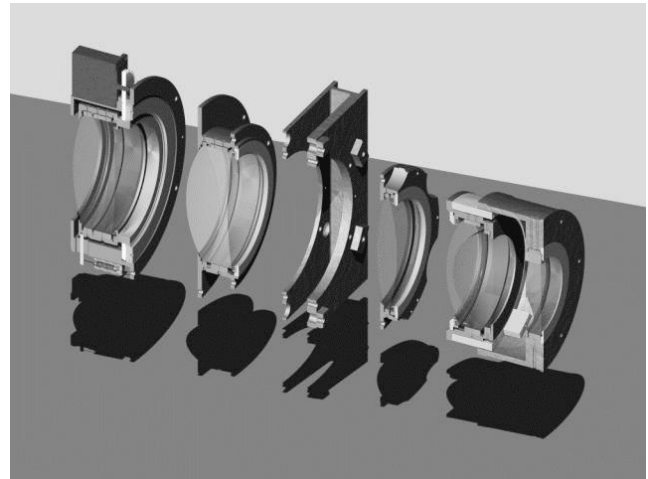


Fig. 6.: Esquema del barrilete de lentes de la cámara de OSIRIS. En la actualidad está siendo acabado en México.

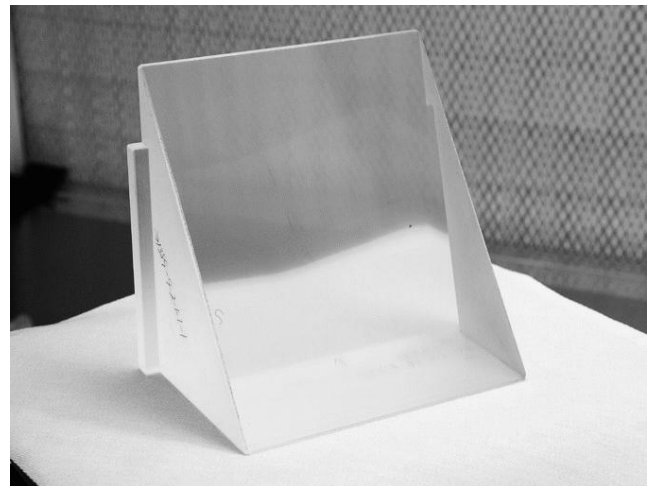


Fig. 7.: Prisma escalonado de los de OSIRIS. Algunos de estos prismas han llegado con defectos superficiales, por lo que han sido devueltos y se está a la espera de recibir otros de mayor calidad óptica.

de apuntado se va a utilizar con el refractor que se colocará en la montura a principios del año 2005. Con este refractor se pretende llegar a hacer un modelo de apuntado del telescopio antes de poner ninguna óptica, de modo que cuando se ponga la óptica los problemas puramente mecánicos del apuntado estén prácticamente resueltos.

Al igual que el resto de los subsistemas del GTC el control también está avanzando notablemente y mucho más se ha de ver en los próximos meses.

Instrumentación Científica

Los instrumentos científicos de primera luz han experimentado un gran avance en su proceso de integración. Tal es el caso de CanariCam y de ELMER. OSIRIS también avanza, estando ya en taller el cambiador de máscaras, una de las piezas más complicadas de OSIRIS.

OSIRIS prosigue su proceso de acabado de los diversos elementos mecánicos y ópticos para su integración en los talleres del IAC. En la actualidad se están terminando los barriletes de la cámara (Figura 6), en CIDESI, México, y otras lentes están siendo recubiertas. Los elementos dispersivos (Figura 7) se han devuelto a su proveedor al haberse recibido en muy mal estado, denotando falta de control de calidad. En cuanto a la mecánica se están fabricando las bridas de anclaje al rotador *Nasmyth*, y se está terminando la estructura principal. La estructura de soporte del colimador ha dado problemas y ha tenido que volverse a fabricar.

Los detectores nominales de OSIRIS, los del consorcio de *Lincoln Lab*, todavía no están listos, si bien algunos partícipes de este consorcio ya han recibido sus detectores. Es posible que el retraso sea debido al tratamiento especial de los detectores de OSIRIS, que están optimizados en el rojo, si bien con un recubrimiento que resulta asimismo en una excelente respuesta en el azul.

Ya se ha terminado la parte del control de OSIRIS que tiene que ver con la preparación de máscaras y tratamiento de los datos de ciencia. El grupo científico de OSIRIS continúa preparando concienzudamente su programa científico.

Telescopio

ELMER, es quizás el instrumento que más ha cambiado desde la última edición de este Boletín. ELMER (Figura 8) está ahora en una esquina del taller mecánico del IAC, en un espacio acondicionado *ad hoc*, en el que se ha tratado de conseguir un ambiente lo más limpio posible dentro de lo que significa estar en el interior de un taller mecánico. Recientemente se ha integrado una parte de la óptica, a saber, el colimador, los espejos de doblado y la cámara, habiéndose podido alinear estos componentes y medir la posición de foco que ha resultado estar donde debía de acuerdo con el diseño. También se han hecho pruebas de calidad de imagen, que apuntan a que la calidad de imagen es muy buena, aunque los resultados están todavía pendientes de reducción. La integración de la óptica se ha hecho en un tiempo de récord de una semana, y se ha contado con la inestimable ayuda de Conchi Cárdenas, Miguel Andrés Sánchez Carrasco y Rosa González Delgado, del Instituto de Astrofísica de Andalucía (Figura 9), que han participado con entusiasmo y gran eficacia durante las pruebas.

El punto débil de ELMER está en el control que continúa retrasándose debido a la gran carga de trabajo del grupo de control de GTC que tienen todavía que implementar el control en las cajas de Adquisición y Guiado, antes de llevar a cabo el de ELMER.

CanariCam también se está integrando a buen ritmo en el Departamento de Astronomía de la Universidad de Florida. Como puede verse en las fotos (Fig 10) el criostato empieza a poblarse de elementos. Está previsto un primer enfriado en los próximos días. De hecho, Víctor Sánchez Béjar, uno de nuestros astrónomos de soporte, acaba de salir para Florida para empezar a familiarizarse con CanariCam, asistiendo a las pruebas de alineado de la óptica y enfriado. Únicamente

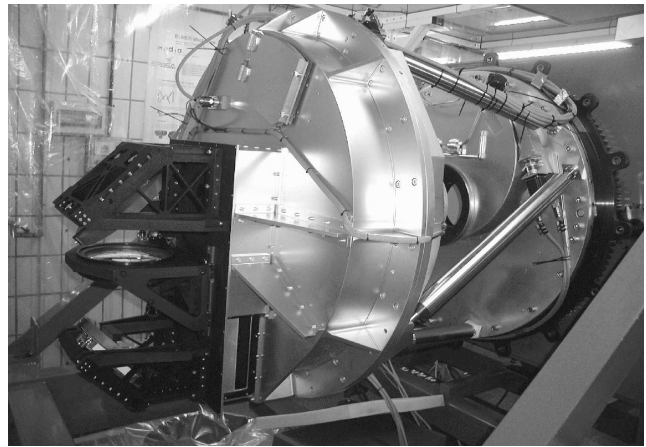


Fig. 8.: ELMER en el taller del IAC, donde se ha instalado para su integración y pruebas

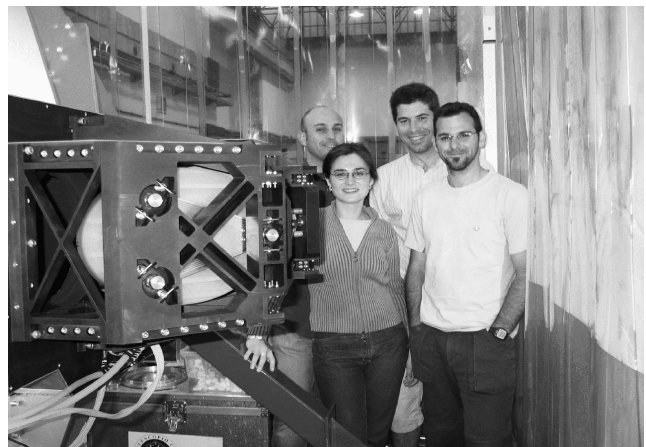


Fig. 9.: Montaje de los espejos de doblado de ELMER en el taller del IAC. Dichos espejos pueden verse en su montura (periscopio) a la izquierda de la foto.

faltan algunos componentes de la polarimetría, que estarán listos en los próximos meses. En todo caso CanariCam se espera que esté listo a finales de este año o principios de 2005, no esperándose dificultades en lo que queda de integración y pruebas.

EMIR continúa su etapa de diseño avanzado, estando algunos elementos listos para salir a concurso de adjudicación. Ese es el caso de la óptica, del robot de configuración de rendijas, del criostato, etc. El equipo de EMIR está llevando a cabo un proceso de pruebas con prototipos de elementos que por su tamaño, y por la necesidad de enfriarlos a temperaturas criogénicas, podrían presentar problemas. Tal es el caso de las monturas de las grandes lentes. Estas monturas, generalmente hechas de aluminio, al enfriarse se contraen en diferente medida a como lo hacen las lentes que se sujetan, con lo que si están muy apretadas pueden romper la lente, y no están suficientemente apretadas pueden dejar la lente demasiado floja, pudiendo ésta moverse. También se avanza en la caracterización de los detectores científicos de EMIR (Figura 11). De hecho un detector científico se ha devuelto al fabricante por no cumplir con los requisitos anunciados por

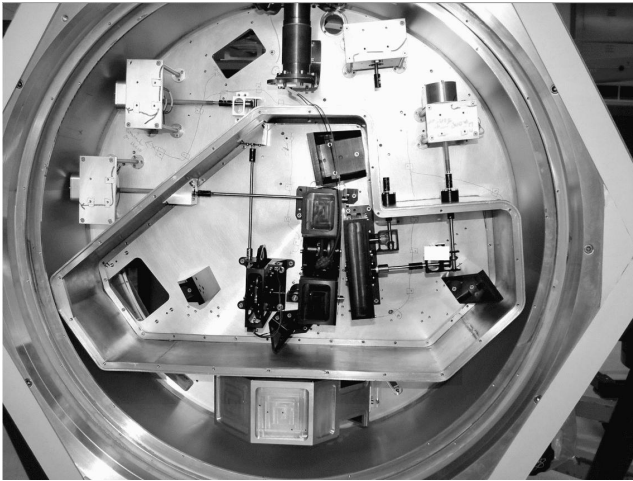


Fig. 10.: CANARICAM en proceso de integración en la Universidad de Florida. Puede verse el criostato y la base óptica de éste con varios de los elementos ya instalados (Foto cortesía de Chris Packham, U. De Florida)

él. Ahora se está probando un segundo detector. Este nuevo detector muestra algún problema de cosmética. Lo más preocupante sin embargo es una pérdida de carga cada vez que se pone a cero el detector. Este fenómeno se ha observado en otros detectores similares, y hasta ahora se ha solventado eliminando la primera lectura. El problema es que para EMIR, a veces esta primera lectura no se podrá eliminar ya que en el GTC EMIR puede saturarse en un segundo con estrellas de magnitud 15.

Astrónomos de Soporte

Luis Corral Escobedo y Victor Sánchez Béjar han estado con nosotros desde septiembre de 2003, participando activamente en algunas pruebas de paquetes de software, tales como la OPMS en lo relativo al software de preparación de propuestas de observación. Asimismo están llevando a cabo una importante labor completando procedimientos de pruebas de puesta a punto del GTC y sus instrumentos, como parte del plan de integración y pruebas que se está confeccionando en estos meses. El próximo septiembre se espera aumentar el número de astrónomos de soporte, para poder atender el aumento de tareas que se esperan conforme avanza la integración del telescopio y nos preparamos para las pruebas de puesta a punto.

Ciencia con el GTC

El segundo congreso sobre Ciencia con el GTC se celebró los días 16 a 18 de febrero en el Castillo de Chapultepec, uno de los parajes más emblemáticos de la Ciudad de México. La concurrencia fue alta, si bien menor que la registrada en Granada, sin duda debido a la lejanía y por tanto mayor costo del viaje. Un nuevo aspecto de este congreso fue la realización de talleres de trabajo sobre temas específicos, en particular sobre instrumentación, así como sobre temas

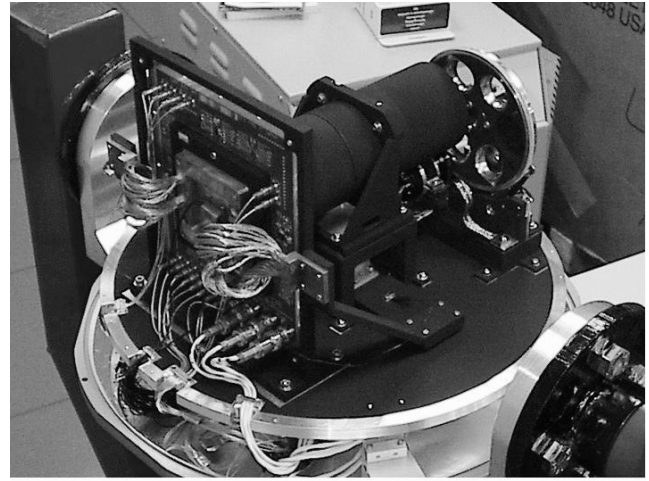


Fig. 11.: Criostato de pruebas del detector de EMIR, en los laboratorios del IAC

científicos, con la idea de establecer colaboraciones para la explotación científica del GTC.

El tránsito de Venus: astronomía en la calle

Javier Armentia javarm@pamplonetario.org
 Jaime Zamorano jaz@astrax.fis.ucm.es
 Eduard Masana emasana@am.ub.es

Introducción

La última vez que Venus había pasado por delante del disco solar, en 1882, en más de veinte países cientos de observadores habían colaborado para realizar observaciones y mediciones precisas de los momentos del tránsito. A finales del XIX se conseguía así culminar un proyecto iniciado dos siglos antes, tras la idea de Edmond Halley de utilizar observaciones de estos fenómenos astronómicos desde diferentes puntos de la Tierra para poder triangular Venus y el Sol, y obtener la paralaje solar, la distancia a nuestra estrella que es la unidad astronómica sobre la que se establecen todas las escalas de distancia en el Universo. Ciento veintidós años después, el 8 de junio de 2004, la nueva oportunidad de contemplar este fenómeno astronómico ha supuesto que centenares de miles de personas hayan participado en una verdadera fiesta de la astronomía. Y, esta vez, gracias a las redes de telecomunicación, a los instrumentos astronómicos más eficientes y sobre todo más populares, las costosas y complejas expediciones ultramarinas se han sustituido por multitud de puestos de observación repartidos por medio planeta, en proyectos internacionales donde la astronomía ha sido objeto de participación ciudadana. Gracias a los medios de comunicación, millones de personas han podido saber del asunto en tiempo real y muchos, por vez primera, han sido testigos emocionados de algo tan extraño para la gente de la calle como que, por cosa de la mecánica celeste, el planeta Venus intente de vez en cuando eclipsar al Sol.

Dos años antes del tránsito, diversas instituciones astronómicas europeas decidieron lanzar un proyecto internacional de medición del tránsito, aun a sabiendas que los métodos de determinación de distancias absolutas no requieren ya esperar a que Venus se interponga delante del Sol. Era una oportunidad para popularizar la ciencia, aprovechando además el tirón que tienen los fenómenos astronómicos que resultan observables a simple vista. En muchos países se fueron organizando redes de observación y difusión del tránsito de Venus y, en España, centros de divulgación, universidades, institutos y observatorios, además de muchos centros educativos y casi todas las agrupaciones de aficionados a la astronomía, fueron programando y coordinando actividades. En este informe, parcial, recogemos algunos de los datos de un día para la astronomía que ha marcado un antes y un después: mediante el servicio en Internet que coordinaba el proyecto de medición europeo en nuestro país, www.venus04.org, más de cincuenta actividades diferentes se estaban realizando a la vez, incluyendo varias decenas de retransmisiones de las imágenes. A lo largo de las seis horas del tránsito, sólo en esta web se fueron registrando más de 40.000 visitas. Si unimos las webs participantes,

cerca del millón de impactos sólo en España son una buena muestra del interés que la iniciativa despertó.

Algunos de los centros en los que se realizaron observaciones, a partir de las informaciones que han remitido a la lista de correos de noticias de la SEA son los siguientes (sin orden especial): Universidad de País Vasco (Escuela de Ingenieros de Bilbao); Universidad de Jaén, área de conocimiento de Astronomía y Astrofísica (Escuela Politécnica Superior); Facultad de Ciencias de la Universidad de Cantabria, con el Instituto de Física de Cantabria, y la Agrupación Astronómica Cántabra; Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (ROA); Observatorio de Calar Alto (CAHA), con la Asociación astronómica y cultural de Almería Orion; CMU Chamínade (Madrid); Institut d'Estudis Espacials de Catalunya; Centro de Astrobiología; Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna; Observatorio de la Agrupación Astronómica de Sabadell; Aula d'Astronomia de la Universitat de Valencia (Facultad de Matemáticas y del Departamento de Astronomía y Astrofísica); Universidad de Alicante; Parque de las Ciencias de Granada; Universidad Europea de Madrid (UEM); Dept. d'Astronomia i Meteorologia, Univ. de Barcelona; Asociación Astronómica Orión de Almería; Agrupación Astronómica de Málaga SIRIO y Centro Principia de Málaga; Sociedad Malagueña de Astronomía; Grupo Sirio de Sabinánigo, Agrupación Astronómica de Huesca; Sociedad Astronómica Asturiana Omega de Gijón; Mallorca Planetarium y Observatorio Astronómico de Mallorca; Grupo SAROS-Expediciones científicas; Agrupación Astronómica Isla de la Palma; Museo de las Ciencias de Castilla-La Mancha de Cuenca; Animaciencia de Albacete; Museo de la Ciencia de Valladolid, Sociedad Astronómica Syrma y Grupo Universitario de Astronomía (Valladolid); Asociación Leonesa de Astronomía; Agrupació d'Astronomia d'Alella; Astrotienda.com; Ikastola Aranzadi de Bergara; Miramón Kutxaespazio de San Sebastián; Agrupación Astronómica Vizcaína - Bizkaiko Astronomi Elkarte e I.E.S. J.M. Barandiaran de Leioa; Casa de las Ciencias de La Coruña (Museos Científicos Coruñeses); Casa de las Ciencias de Logroño; Asociación de Astrónomos Aficionados de la Facultad de Físicas de la UCM ASAAF - Observatorio UCM: Astrofísica de la Universidad Complutense de Madrid; Facultad de Ciencias, UNED en Madrid; Planetario de Madrid y Agrupación Astronómica de Madrid; Revista Astronomía; AstroMurcia, I.E.S. Aljada de Puente Tocinos (Murcia) y Agrupación Astronómica de la Región de Murcia; Planetario de Pamplona y Agrupación Navarra de Astronomía - Nafarroako Astronomia Elkarte; l'Hemisfèric y el Museo de las Ciencias Príncipe Felipe, Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia; Agrupación Astronómica de la Safor (Gandía, Valencia).

Es difícil hacer una estimación global de cuánta gente asistió a las diferentes actividades programadas, pero rondarán las 10 000 personas las que directamente pudieron observar el tránsito. El acceso a Internet multiplicaría en un factor 20–30 esa participación. Desde el *European Southern Observatory*, coordinadores del proyecto internacional de medición de la UA VT-2004 comentaban que la web internacional ha estado recibiendo 1.200 visitas por segundo,

transmitiéndose un total de 1 Terabyte de datos.

¿Qué actividades se realizaron?

La iniciativa fue seguida por numerosas instituciones y desde muy diversos lugares, como hemos visto. A lo largo de las semanas previas hubo ya actividades interesantes, aparte de que día a día crecía la información presente en Internet anunciando de ellas, y sobre todo informando del evento –posiblemente este tránsito ha sido el experimento de divulgación astronómica más amplio nunca realizado, con decenas de páginas donde se recogían tanto los aspectos de mecánica celeste como la historia, las técnicas de observación o muchos otros temas relacionados–. Programas de planetario específicos (como en La Coruña o Pamplona), sesiones en directo de planetarios como el de Madrid, Valladolid, Cuenca, Granada, Valencia o Castellón. Cursos de iniciación a la observación de tránsitos (como los organizados por la Agrupación Astronómica Palmera), seminarios en numerosas universidades, agrupaciones o planetarios, y conferencias por parte de expertos permitieron además ir dando a conocer al público, en directo, qué iba a suceder en el cielo.

El mismo día del tránsito las actividades se multiplicaron: observaciones públicas y retransmisiones por Internet, y actos multitudinarios que en algunas ciudades atrajeron a más de 1.000 personas (como en Pamplona). Casi en tiempo real, todas las radios del país se interesaban por las diferentes actividades: a lo largo de la mañana la Astronomía fue uno de los temas más mentados en ellas. Posteriormente, los informativos televisivos y los servicios de noticias fueron multiplicando la información sobre el tránsito y las actividades que se habían realizado.

Algunas de las observaciones fueron principalmente actos públicos y populares. Pero además, muchos de los puestos de observación disponían de instrumentación adecuada para realizar mediciones precisas y obtener imágenes de gran resolución. En muchos lugares, el público podía, a la vez, comprobar cómo ellos podían ver lo mismo que los profesionales e incluso colaborar en directo con ellos. En algunos observatorios históricos, como el de la Universidad de Valencia, o el ROA, se emplearon instrumentos antiguos, recreando las antiguas observaciones de los tránsitos en los siglos XVIII y XIX. Comprensiblemente, el número de observadores que se animaron a realizar las mediciones para el proyecto VT-2004 fue menor, pero aún así, como se puede ver en www.vt-2004.org el número de mediciones fue suficiente para determinar (de nuevo) la unidad astronómica con gran precisión.

Obviamente, el principal factor de incertidumbre fue si las nubes iban a dejar hacer las observaciones. Afortunadamente resultó un día, en general, despejado en nuestro país. En muchas zonas, sin embargo, la mañana amaneció nublada y se perdió la oportunidad de observar los momentos de ingreso de Venus en el disco solar. La posibilidad que muchos actos incorporaron de transmitir imágenes a través de Internet de otros sitios permitió en estos casos paliar el problema de las nubes. En los informes recibidos no se ha comentado en ningún caso que todo hubiera de suspenderse,

menos que el público convocado quedara insatisfecho.

A este respecto, resulta quizá pertinente hacer notar que, mirado sin más, lo único que se veía sobre el disco solar era un pequeño “lunar” oscuro. Es decir, una manchita sin mayor interés. Objetivamente hablando, eso que se veía no tiene mayor capacidad de impacto. Sin embargo, en muchos informes se ha recogido la gran excitación del público al ver esa imagen, especialmente cuando la silueta de Venus se acercaba al limbo. Hay que entender que la gente que estaba viendo esa imagen un tanto insulsa entendía de qué se trataba. Era, por lo tanto, una emoción más intelectual. La capacidad de este tipo de fenómenos celestes para hacer pensar al público en términos científicos es algo muy poderoso, que debería ser tenido en cuenta en futuras iniciativas de divulgación y popularización de esta ciencia.

Nota:

VT-2004 ha sido promovido por el Observatorio Europeo Austral - *European Southern Observatory* (ESO) y la Asociación Europea para la Enseñanza de la Astronomía - *European Association for Astronomy Education* (EAAE), junto con el Instituto de Mecánica Celeste y Cálculo de Efemérides - *Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Éphémérides* (IMCCE) y el Observatorio de París- *Observatoire de Paris* en Francia, y también con el Instituto Astronómico de la Academia de Ciencias de la República Checa - *Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic*. VT-2004 está patrocinado por la Comisión Europea en el marco de la Semana de la Ciencia Europea 2004.

En nuestro país, la iniciativa ha sido acogida por centros e instituciones muy diferentes. Este nodo español está soportado desde el Planetario de Pamplona, con la colaboración de la Asociación de Planetarios Españoles (APLE), la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía (APEA) y el certámen Física+Matemáticas en Acción (una actividad promovida por la Real Sociedad Española de Física y la Real Sociedad Matemática Española), que se celebrará en Septiembre en el Parque de las Ciencias de Granada. Agradecemos la colaboración de la Sociedad Española de Astronomía (SEA) en las labores de difusión y coordinación de las actividades.

Enlaces con informes de las observaciones:

www.venus04.org

Web del Planetario de Pamplona que coordinaba las actividades de muchos otros sitios en todo el país.

<http://www.ajax.ehu.es/astrologia/venus.html>

Grupo de ciencias de la Universidad del País Vasco.

<http://www.roa.es/transito.html>

Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (ROA).

<http://www.iaa.csic.es/transito/>
IAA en Granada.

<http://www.caha.es/VT04/vt04.htm>
Observatorio de Calar Alto (CAHA).

<http://www.ieec.fcr.es/transit/>
Institut d'Estudis Espacials de Catalunya.

<http://vt-2004.solarphysics.kva.se>
Telescopio Solar Sueco, Canarias.

http://www.iac.es/da/telescopio/venus04/galeria_imagenes.html
Departamento de Astrofísica
Universidad de La Laguna.

<http://venus.am.ub.es/>
Departament d'Astronomia i Meteorologia
Universitat de Barcelona.

<http://www.ucm.es/info/Astrof/venus04>
Departamento de Astrofísica y CC. de la Atmósfera
Universidad Complutense de Madrid.



Imagen del tercer contacto tomada desde la terraza del *Departament d'Astronomia i Meteorologia* de la Universidad de Barcelona. Cámara CCD PixCel 236 (<http://venus.am.ub.es>).

ARTÍCULOS DE REVISIÓN

Extremofilia Astrobiológica:

El caso del río Tinto

Ricardo Amils^{1,2} ramils@cbm.uam.es
 Felipe Gómez² gomezgf@inta.es
 Elena González-Toril² etoril@cbm.uam.es
 Angeles Aguilera² aaguilera@cbm.uam.es
 Nuria Rodríguez² nrodriguez@cbm.uam.es
 David Fernández Remolar² fernandezed@inta.es

1 Centro de Biología Molecular (CSIC-UAM)

2 Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)

Extremofilia

El descubrimiento de organismos extremófilos, es decir de seres vivos capaces de desarrollarse en condiciones consideradas prohibitivas para la vida, como puede ser la elevada temperatura de un autoclave o en un geiser, las bajas temperaturas de los hielos polares, la fuerza iónica de una solución saturada de sal, la radiación en un circuito de refrigeración de una central nuclear ó la acidez producida por el vinagre, entre otras muchas, ha supuesto una auténtica revolución en el campo de la biología (Gross, 1996), con importantes repercusiones no sólo en los aspectos fundamentales de la misma, sino por sus implicaciones astrobiológicas (Morrison, 2001) y biotecnológicas (Rothschild and Mancinelli, 2001).

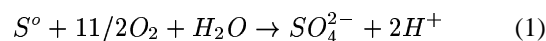
Las primeras observaciones sobre la extremofilia se realizaron hace más de un siglo y se debieron a la constatación de que en las condiciones de conservación de pescado en salazón se desarrollaban microorganismos a los que se dio el nombre de halófilos, literalmente amantes de la sal, responsables de la llamada enfermedad roja del bacalao. El interés por estos microorganismos decreció una vez se resolvió el problema económico del deterioro del pescado conservado en salmuera al sustituirse la sal de origen marino por la extraída de minas. El "boom" de la extremofilia se inició en los años setenta debido a los estudios de T. Brock y sus colaboradores, los cuales demostraron la existencia de microorganismos capaces de desarrollarse a las elevadas temperaturas de distintas estructuras volcánicas del parque nacional de Yellowstone (Brock, 1995). El interés por los extremófilos se complementó convenientemente con la introducción de las nuevas ideas filogenéticas de C. Woese, basadas en la comparación de secuencias de los ácidos nucleicos ribosomales (rRNAs) (Woese y Fox, 1977). Esta complementación facilitó que Woese diera el nombre de arqueobacterias (hoy denominadas arqueas) al "cluster" de microorganismos hipertermófilos, halófilos y metanogénicos filogenéticamente tan distintos de las bacterias o de las eucariotas, como lo son estos dos grupos entre sí. Esta denominación implicaba un estatus de antigüedad evolutiva, noción que posteriormente ha sido corregida al demostrarse que las arqueas son evolutivamente más próximas a las eucariotas, a

pesar de sus propiedades fenotípicas fundamentalmente procarionóticas (tamaño, forma, metabolismo, ecología) (Woese, 1993).

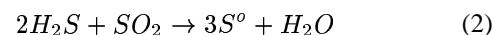
Extremofilia acidófila

Dentro de la extremofilia los microorganismos quimiolitótrofos acidófilos, en otras palabras, los organismos capaces de desarrollarse en condiciones extremas de acidez (pH < 2) y de obtener energía a partir de compuestos minerales reducidos, ocupan un lugar singular (Ehrlich, 2001; 2002). Esta singularidad proviene de su peculiar sistema de obtención de energía, independiente de la radiación, lo que les sitúa como candidatos interesantes en los primeros balbuceos de vida sobre el planeta (Gómez and Amils, 2002), y de su ecología, ya que como veremos las condiciones extremas de acidez en las que se desarrollan no se deben a constricciones geofísicas, como en la mayoría de los hábitats extremos conocidos (volcanes, hielos polares, lagunas hipersalinas, radiación, etc.), sino que son precisamente consecuencia de su metabolismo.

Los ambientes ácidos, normalmente asociados a elevadas concentraciones de metales, tienen dos orígenes principales (Johnson, 1998). Uno asociado al metabolismo del azufre elemental:

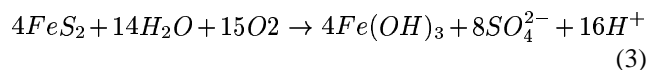


producto de la reacción de condensación de gases volcánicos:



En estos ambientes ácidos ricos en azufre, comúnmente conocidos con el nombre de solfataras, se producen importantes gradientes de temperatura, lo cual facilita su colonización por una gran variedad de microorganismos con distintas temperaturas de crecimiento.

El otro suele encontrarse asociado a actividades mineras. La minería de los metales y del carbón facilita la exposición de sulfuros metálicos al agua y a la acción de los microorganismos quimiolitótrofos capaces de obtener energía oxidándolos. La oxidación de la pirita, el sulfuro metálico más común en la superficie del planeta, es de especial interés en este contexto. El proceso ocurre en distintas etapas, pudiéndose formular la reacción global con la siguiente ecuación:



Estos ambientes varían mucho en sus propiedades físico-químicas y por lo tanto en su ecología microbiana. Los ambientes ácidos asociados a actividades mineras son relativamente recientes desde un punto de vista geológico y evolutivo. Algunas actividades mineras, como las de Río Tinto (Figura 1), tienen una larga historia ya que existen indicios de su explotación por mineros calcólicos, hace cinco mil años (Avery, 1974; Leblanc et al., 2000). La reciente caracterización microbiológica de este hábitat ha mostrado un complejo ecosistema en funcionamiento mucho antes de la actividad minera de la zona.



Fig. 1.: Vista de la zona de Berrocal, parte intermedia del curso del Río Tinto (crédito J.M^a Sánchez y J.L. de Lope)

Quimiolitotrofia acidófila

Los mecanismos por los cuales los microorganismos pueden obtener energía oxidando sulfuros metálicos, un proceso de interés en biominería, ha sido muy controvertido durante muchos años (Ehrlich, 2001). Dos mecanismos básicos, conocidos con el nombre de ataque directo e indirecto (Figura 2), han sido considerados y ampliamente debatidos con el fin de explicar la mayoría de las observaciones obtenidas en distintos procesos de biolixiviación (Silverman y Ehrlich, 1964). Mediante el ataque directo los microorganismos solubilizan sulfuros minerales adheriéndose a su superficie, facilitando de esta manera la transferencia electrónica desde el sustrato mineral al aceptor de electrones correspondiente (respiración). En el ataque indirecto los microorganismos son responsables de la oxidación del hierro reducido de la solución, manteniendo de esta manera una elevada concentración del agente oxidante, el ión férrico, en la misma. El ión férrico es responsable de la oxidación de la mayoría de los sulfuros metálicos y de cualquier compuesto susceptible puestos a la solución.

La reciente demostración de que el ión férrico de la pared celular y de los exopolisacáridos de los microorganismos lixividores es el único responsable de la transferencia electrónica desde los sustratos minerales a la cadena transportadora de electrones, ha clarificado este dilema de indudable interés tecnológico y ambiental (Gehrke et al., 1995). Teniendo en cuenta este hecho se ha propuesto, ya que el ión férrico es el responsable único de la oxidación de sulfuros metálicos tanto en el mecanismo directo como en el indirecto, que no tiene sentido mantener la diferencia entre

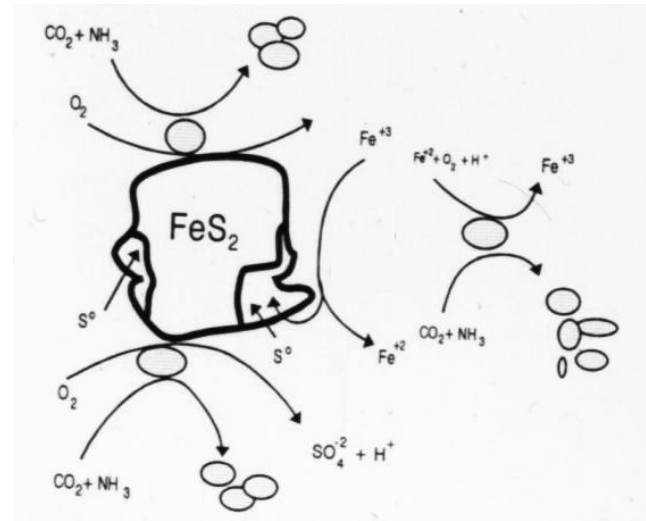
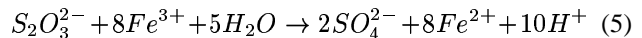
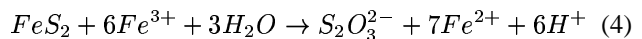
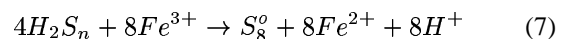
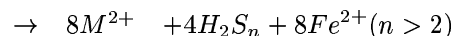
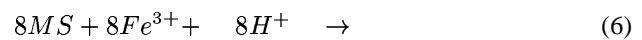


Fig. 2.: Esquema del metabolismo quimiolitotrófico de microorganismos capaces de crecer a partir de sulfuros metálicos como por ejemplo la pirita.

ambos mecanismos (Sand et al., 1995). Las diferencias observadas en la biolixiviación de distintos sulfuros metálicos parecen depender fundamentalmente del mecanismo de ataque químico, el cual depende a su vez de la estructura cristalina de los sustratos minerales. Sólo tres sulfuros, la pirita, la molibdenita y la tungstenita son susceptibles de oxidación en la naturaleza por el ión férrico, mediante el mecanismo denominado del tiosulfato:



obteniéndose sulfato como producto principal (Sand et al., 2001). Obsérvese que esta oxidación que produce ácido sulfúrico sólo requiere de la actividad oxidante del hierro. En cambio la mayoría de los sulfuros (e.g. esfalerita, calcopirita, galena, etc.) son susceptibles de un ataque mediado tanto por protones como por ión férrico. En este caso el mecanismo de oxidación se denomina del polisulfuro (Sand et al., 2001), un intermediario en la reacción:

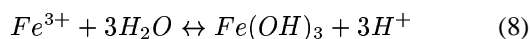


En este caso el azufre elemental puede ser oxidado por bacterias oxidadoras de azufre produciendo ácido sulfúrico de acuerdo a la reacción 1. La mayoría de los especialistas en biohidrometalurgia están de acuerdo hoy en día con estos mecanismos básicos, que permiten explicar la mayoría de las observaciones acumuladas durante más de treinta años de biominería y que conceden al hierro un papel crítico y central en la biooxidación de sulfuros metálicos y en la quimiolitotrofia acidófila (Ehrlich, 2001; Hansford y Vargas, 2001).

El Río Tinto, un modelo de interés astrobiológico

El Río Tinto (Faja Pirítica Ibérica) es un inusual ecosistema debido a su pH ácido (valor medio de 2.3), tamaño (100 km), elevada concentración de metales pesados (Fe, Cu, Zn, Cr, As, etc.) y un inesperado nivel de diversidad microbiana, fundamentalmente eucariótica (López-Archilla et al., 1993). El Río Tinto (Figura 1) nace en medio de la Faja Pirítica Ibérica, en Peña del Hierro, y desemboca en el océano Atlántico en Huelva. El río da nombre a un importante distrito minero, el cual ha estado en operación desde hace cinco mil años (Avery, 1974).

La Faja Pirítica Ibérica es una entidad geológica de origen hidrotermal de 250 km de largo y una anchura que oscila entre 25 y 70 km, conocida por ser uno de los mayores, sino el mayor, depósito de sulfuros metálicos del mundo (Boulter, 1996; Leistel et al., 1998). Una importante característica del Río Tinto es su pH ácido, constante a lo largo de su cauce (Fernández-Remolar et al., 2003). Esta propiedad se debe al carácter tampón del ión férrico en solución:



Cuando el río se diluye en invierno a causa de la lluvia (clima mediterráneo) o de sus tributarios, la hidrólisis del ión férrico genera los protones necesarios para mantener la acidez del medio. La elevada temperatura del verano es responsable de la evaporación del agua, pero el pH del río no varía a causa del consumo de protones en la redisolución de los precipitados de hidróxidos de hierro. El pH del sistema se mantiene en un valor constante mientras haya suficiente ión férrico en solución y precipitados de hidróxido de hierro. La situación es diferente en la zona de influencia intermareal. En las marismas del Tinto, el pH cambia drásticamente dos veces al día dependiendo de la dirección de la marea. Algunas variables importantes del sistema son el potencial redox que fluctúa entre +280mM y +610mM, y la concentración de oxígeno que varía desde valores de saturación atmosférica a condiciones completamente anóxicas. Estas variables son dependientes de las condiciones climáticas y del metabolismo microbiano asociado al sistema (González-Toril et al., 2003).

Ecología microbiana del Río Tinto

La utilización de técnicas de ecología molecular, fundamentalmente la resolución de la amplificación de los genes correspondientes al 16-18S rRNA por electroforesis en gradiente desnaturante (DGGE) y su secuenciación y/o la hibridación con sondas específicas fluorescentes con distinta especificidad (FISH), complementadas con las técnicas convencionales de aislamiento y caracterización fenotípica de microorganismos, ha permitido identificar los elementos más representativos del sistema, los cuales se pueden agrupar de acuerdo a su papel ecológico.

Los quimiolitotótrofos procarióticos y los protistas fotosintéticos son los productores primarios del ecosistema.

En relación a los quimiolitótrofos oxidadores de hierro, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum* spp. y *Ferroplasma* spp., han sido aislados e identificados en distintas estaciones de muestreo a lo largo del río. Su cuantificación por hibridación utilizando sondas específicas han permitido demostrar que *At. ferrooxidans* y *Leptospirillum* spp. son los elementos mayoritarios del sistema (González-Toril et al., 2003). A diferencia de otros sistemas acidófilos recientemente caracterizados, e.g., *Iron Mountain*, en California (Edwards et al., 2000), el número de arqueas correspondientes al género *Ferroplasma* detectadas en Río Tinto es baja, y se encuentran confinadas mayoritariamente en la parte alta del río, cerca de su origen.

De los procariotas oxidadores de azufre sólo *At. ferrooxidans* (capaz de oxidar hierro y compuestos reducidos de azufre) se encuentra en importantes números en el Río Tinto (López-Archilla et al., 2001; González-Toril et al., 2002; González-Toril et al., 2003). Experimentos de hibridación con marcadores específicos han mostrado la presencia de importantes concentraciones de esta bacteria en zonas anóxicas del río, probablemente relacionadas con su capacidad de respirar anaerobiamente compuestos reducidos de azufre utilizando ión férrico como aceptor de electrones. En el laboratorio se ha podido sustanciar la capacidad de *L. ferrooxidans* de oxidar anaerobiamente ión ferroso (García y Amils, comunicación personal). Estas observaciones sugieren la operación del ciclo del hierro en condiciones tanto aerobias como anaerobias.

Un importante número de bacterias heterotróficas han sido aisladas a partir de distintos cultivos de enriquecimiento. Algunos de estos aislados han sido identificados como miembros del género *Acidiphilium* (López-Archilla et al., 2001; González-Toril et al., 2003). Estas bacterias se encuentran frecuentemente asociadas a microorganismos quimiolitótrofos. Todas las especies conocidas de *Acidiphilium* son respiradoras anaerobias facultativas, capaces de oxidar compuestos reducidos de carbono utilizando ión férrico como aceptor de electrones. Algunas especies de *Acidiphilium* son capaces de reducir hierro en presencia de importantes concentraciones de oxígeno (Bridge y Johnson, 2000). La utilización de sondas específicas para este género ha mostrado la presencia de importantes poblaciones de esta bacteria en el ecosistema del Tinto, subrayando la importancia del ciclo del hierro en el mismo (González-Toril et al., 2003). También se han detectado por técnicas moleculares la presencia de bacterias Gram positivas reductoras del hierro relacionadas con los géneros *Ferrimicrobium* y *Acidimicrobium*. Estas bacterias estrictamente anaerobias se encuentran en bajas concentraciones en la columna de agua (González-Toril et al., 2003).

Experimentos de hibridación han demostrado la existencia de procariotas reductoras de sulfato en el Tinto. Estos importantes elementos del ciclo del azufre (Johnson, 1999) aún no han podido ser aislados de la parte más extrema del ecosistema, aunque si se han podido aislar e identificar en las zonas de inundación oceánica de las marismas donde el pH fluctúa dos veces al día, generando importantes precipitados negruzcos debidos a la formación de sulfuros de hierro

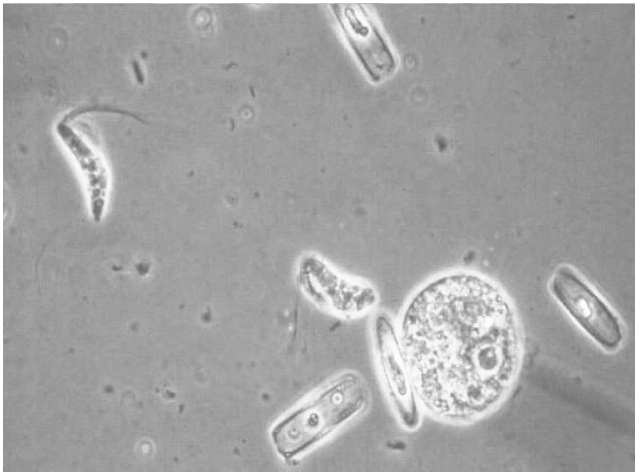


Fig. 3.: Microorganismos eucarióticos acidófilos del Río Tinto. Microscopía óptica, aumento 40×.

y de otros metales presentes en el sistema (González-Toril et al., 2002).

Los protistas fotosintéticos (algas) son responsables de una parte importante (65%) de la biomasa del ecosistema del Tinto (Figura 3). Miembros de los grupos Bacillariophyceae (Diatomeas), Euglenozoa (Euglena), Chlorophyta (Chlamydomonas, Chlorella, Klebsormidium y Zignema), y Rhodophyta (Galdieria) han sido identificadas y algunas de ellas aisladas y caracterizadas (López-Archilla et al., 2001). El uso de técnicas de ecología molecular, fundamentalmente análisis de secuencias amplificadas de 18S rRNA, han permitido identificar algas estrechamente relacionadas con las caracterizadas fenotípicamente, lo que permite subrayar el elevado nivel de diversidad eucariótica en las condiciones extremas del Río Tinto (Amaral-Zettler et al., 2002; Aguilera y Amils, 2004).

Asociados a las biopelículas que se desarrollan en la superficie de las rocas existe un importante diversidad de hongos acidófilos, incluyendo levaduras y hongos filamentosos (López-Archilla et al., 1995; López-Archilla et al., 2001). Un alto porcentaje de aislados de hyphomycetes han sido obtenidos a partir de su crecimiento en las condiciones extremas del Río Tinto, por lo que se consideran elementos del sistema y no formas externas de resistencia. Algunos aislados de levaduras se pueden encontrar en otros ambientes acuáticos menos extremos, pero los hongos negros (Demateaceos) parecen ser específicos de ambientes ácidos extremos, ya que por lo general no se aíslan en aguas frescas a pH neutro. El análisis de secuencias obtenidas por clonación evidencian la presencia de posibles géneros noveles (Amaral-Zettler et al., 2002).

De entre los eucariotas los protistas heterótrofos constituyen el grupo más importante de consumidores del ecosistema. Distintos flagelados, ciliados (phylum Ciliophora), amebas de la clase Lobosea (phylum Rhizopoda) y representantes de la clase Heliozoa (phylum Actinopoda) han sido observados (Figura 3), generalmente asociados a biopelículas (López-Archilla et al., 2001). El análisis molecular de secuencias a permitido detectar la presencia de otros pro-

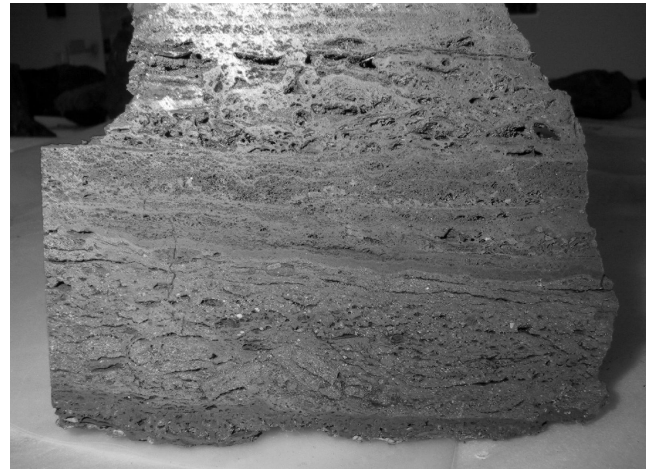


Fig. 4.: Bioformación de hierro en la que se aprecia la estructura laminar de los depósitos de minerales en la superficie de la biopelículas.

tistas heterótrofos no identificadas por métodos fenotípicos (Amaral-Zettler et al., 2002; Aguilera y Amils, 2004).

Bioformaciones de hierro

La mayor parte de la biomasa del sistema se encuentra tapizando el fondo del río o la superficie de las rocas formando densas biopelículas, constituidas fundamentalmente por hongos y algas filamentosas. La superficie de estas biopelículas está recubierta por precipitados minerales, fundamentalmente de hierro, generando estromatolitos (Figura 4), los cuales crecen estacionalmente siguiendo el régimen climático del sistema. Estas bioformaciones de hierro han resultado fundamentales para demostrar que el Río Tinto no es el producto de la contaminación minera (Geen et al., 1997; Davis et al., 2000; Elbaz-Poulichet et al., 2001).

La existencia de distintas formaciones de hierro ocupando distintas elevaciones por encima del actual cauce del río (Alto de la Mesa, Nerva, Zarandas), con una antigüedad de por lo menos dos órdenes de magnitud mayor que la actividad minera más antigua conocida en la zona, y con una estructura similar a las que se están formando en la actualidad en el río, es un argumento importante a favor del origen natural del sistema del Tinto (Fernández-Remolar et al., 2003).

El modelo del Tinto

Aunque la presencia de bacterias oxidadoras de azufre (*At. ferrooxidans*) y sulfato reductoras sugieren la operación de un efectivo ciclo del azufre en el Río Tinto, la identificación de procariontas oxidadoras (*Leptospirillum* spp., *At. ferrooxidans*, *Ferroplasma* spp.) y reductoras de hierro (*Acidiphilium* spp., *At. ferrooxidans*, *Ferrimicrobium* sp. y *Acidimicrobium* sp.), capaces de metabolizar no sólo en condiciones aerobias sino también en condiciones anaerobias, subraya la existencia de un ciclo del hierro operativo (Figura 5) en las

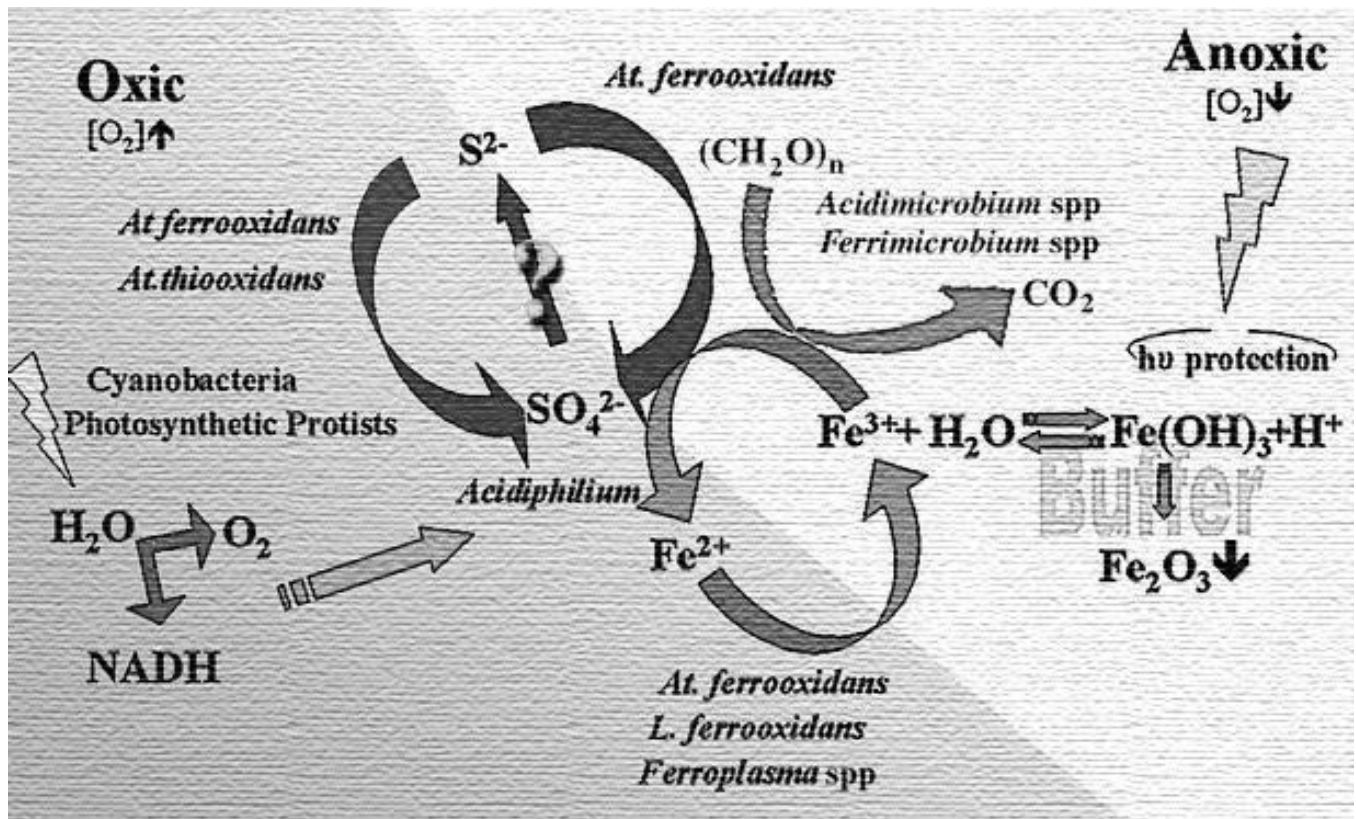


Fig. 5.: Modelo de los ciclos de azufre y del hierro responsables de las características extremas del Río Tinto.

distintas condiciones del ecosistema (González-Toril et al., 2002; González-Toril et al., 2003).

Considerando las características geomicrobiológicas del ecosistema del Tinto postulamos que el mismo está fundamentalmente bajo el control del hierro. El hierro es el producto principal de la biolixiviación de la pirita y de la calcopirita, ambas presentes en importantes concentraciones en la Faja Pirítica Ibérica. La actividad de los procariontes oxidadores de hierro es responsable de las importantes concentraciones de ión férrico, sulfato y protones presentes en la columna de agua del río (reacciones 4, 5, 6 y 7). A su vez el ión férrico es un oxidante enérgico, especialmente en medio ácido, capaz de oxidar distintos sulfuros metálicos, facilitando la solubilización de distintos cationes metálicos. La presencia de estos iones en el medio facilitan la formación de distintos minerales (jarosita, goetita, hematites, magnetita) considerados de interés como posibles biomarcadores de actividad quimiolitotrófica en misiones astrobiológicas (Fernández-Remolar et al., 2003; Fernández-Remolar et al., 2004a).

El hierro tiene distintas propiedades de indudable interés ecológico y astrobiológico (Gómez et al, 2004a). El hierro no es sólo una fuente de energía para los microorganismos, sino que puede ser utilizado como aceptor de electrones en la respiración anaerobia, es capaz de controlar el pH del ecosistema y proteger de la dañina radiación ultravioleta a los microorganismos del ecosistema. Esta última propiedad es de indudable interés para un planeta como Marte que carece de una capa protectora de ozono, o el Arcaico terrestre en

el que la ausencia de oxígeno impediría la existencia de este elemento protector de la radiación ultravioleta (Gómez et al., 2004b).

Este escenario parece razonable para los procariontes quimiolitótrofos que se encuentran en el Tinto. Sin embargo, teniendo en cuenta la importante diversidad eucariótica del sistema, mucho mayor que la procarionte, y que una parte importante de la producción primaria del Río Tinto proviene de la actividad metabólica de protistas fotosintéticos, ¿cual es la ventaja para los eucariotes el desarrollarse en un ambiente extremo de pH y elevada concentración de metales pesados tóxicos? Una posible respuesta está relacionada con las propiedades del hierro en un mundo con un pH neutro.

Aunque el hierro es extremadamente importante para la vida (Ehrlich, 2002), es un factor limitante para el crecimiento a pH neutro (Price, 1968; Archibald, 1983; Martín, 1990; Boyd et al., 2000). La mayoría de los organismos han desarrollado sistemas muy elaborados para atrapar hierro en cualquier lugar donde lo encuentren (Reid et al., 1993; Braun y Killmann, 1999). ¿A que se debe este comportamiento, si el hierro es uno de los elementos más abundantes en nuestro planeta y en el universo? En una atmósfera oxidante y a un pH neutro el hierro soluble se oxida rápidamente, produciendo compuestos insolubles que se incorporan en los sedimentos anaerobios en donde los microorganismos sulfato reductores pueden transformarlos en pirita, un mineral como hemos visto poco reactivo. El reciclado geológico de estos sedimentos y la microbiología asociada al ciclo del hierro son los únicos mecanismos para

reintroducir este elemento crítico en la biosfera. Una posible ventaja para los eucariotas que se desarrollan en las condiciones extremas del Tinto es una ilimitada fuente de hierro suministrada por los quimiolitótrofos oxidadores de los sulfuros metálicos de la Faja Pirítica Ibérica (Gómez et al., 2004; Amils et al., 2004).

¿Este escenario de limitación del hierro ha sido una constante a lo largo de la historia de la vida sobre la Tierra? Diversos autores sostienen que los océanos del Arcaico disponían de importantes concentraciones de hierro, varios órdenes de magnitud superior al que se encuentra en los océanos actuales (Holland, 1973; Anbar y Knoll, 2002). En estas condiciones es razonable postular la posible existencia de microorganismos capaces de oxidar hierro en condiciones anaerobias. Esta actividad debió promover el desarrollo de microorganismos reductores de hierro, responsables de mantener operativo un ciclo del hierro en el Arcaico. Algunos investigadores consideramos que la respiración anaerobia utilizando hierro férrico como aceptor de electrones corresponde a un sistema primitivo de transducción de energía (Gómez y Amils, 2002). En este contexto es importante tener en cuenta la ventaja que pudo suponer el disponer de un completo ciclo biológico del hierro en vez de depender de impredecibles reacciones abióticas de oxidación ó reducción del mismo. Una posible ventaja de un sistema quimiolitótrofo basado en el ciclo del hierro es su independencia de la radiación de la estrella, una dependencia no deseable en la época de aparición de la vida en nuestro planeta (época de importantes impactos meteoríticos generadores de largos inviernos solares). La generación de importantes formaciones de hierro bandeado (BIFs) en el Arcaico (Cloud, 1973; de Ronde et al., 1984) apoyan la existencia de concentraciones de hierro en los océanos capaces de mantener un pH ácido (océano ácido) facilitando el metabolismo de los quimiolitótrofos oxidadores de hierro (Gómez et al., 2004; Amils et al., 2004). Más aún, un mundo Arcaico del hierro basado en la operatividad de un ciclo del hierro no requiere de importantes concentraciones de hierro soluble ya que los microorganismos quimiolitótrofos son capaces de metabolizar minerales insolubles de hierro, al igual que los microorganismos reductores de hierro.

Importancia astrobiológica del modelo del Tinto

Utilizando sondas de hibridación podemos asignar más del 80% de la diversidad procariótica del Río Tinto a sistemas convenientemente caracterizados fenotípicamente y genotípicamente, la mayoría relacionados con el ciclo del hierro (González-Toril et al., 2003). Estas actividades generan bioformaciones de hierro que con el tiempo se fosilizan originando estromatolitos de hierro. Estas bioformaciones muestran una composición mineral y un patrón de bandas que reflejan la geomicrobiología del sistema y el récord climático, de manera similar a los BIFs del Arcaico (Fernández-Remolar et al., 2003).

En relación al oxígeno, cuya concentración debió ser

muy baja en el periodo Arcaico, sabemos que los microorganismos aislados del ecosistema del Tinto pueden operar no sólo en las condiciones aerobias que dominan en la superficie del río, sino también en las condiciones anaerobias que predominan en distintos lugares del río (Peña del Hierro, Berrocal). El Río Tinto es un excelente modelo para obtener información de cómo un mundo de hierro opera no sólo en ausencia de oxígeno (Arcaico) sino en concentraciones crecientes de oxígeno (Proterozoico y Fanerozoico). Probablemente las zonas más interesantes del ecosistema del Tinto corresponden a las zonas de fluctuación en la interfase entre las condiciones óxicas y anóxicas (Malki, 2003).

En relación al pH ácido, una de las características más singulares del sistema del Tinto, es una consecuencia directa de las propiedades físico-químicas del hierro férrico, el principal producto metabólico de la oxidación de la pirita. Si el hierro ferroso en forma soluble y/o insoluble (mineral) y las bacterias oxidadoras de hierro están presentes en el mismo sistema, se producirá hierro férrico independientemente de la concentración de oxígeno. El hierro férrico precipita oxihidróxidos de hierro liberando protones de acuerdo a la ecuación 8, manteniendo constante el pH en la columna de agua mientras haya suficiente ión férrico en solución. Estos oxihidróxidos evolucionan posteriormente para generar distintos óxidos de hierro (goetita, hematites, magnetita). La composición de estas bioformaciones de hierro depende fundamentalmente de las condiciones ambientales y del tiempo (Fernández-Remolar et al., 2003). La geomicrobiología del Tinto es capaz de proveer suficiente hierro en solución para mantener constante el pH a lo largo de su cauce a pesar de las diluciones producidas por los distintos tributarios y las inundaciones consecuencia del régimen climático mediterráneo.

A pesar de que la historia del hierro en la biosfera es aún una pregunta abierta, nos gustaría proponer que el ecosistema del Tinto, así como otros ambientes ácidos ricos en hierro, son reliquias de un mundo de hierro Arcaico. Obviamente las condiciones de operación actual del Tinto son diferentes de las existentes en el Arcaico, pero las propiedades de los microorganismos identificados y caracterizados hasta este momento permiten extrapolar su capacidad operativa en las condiciones del Arcaico. Es importante subrayar que estamos hablando de un sistema actual, operativo, el cual se puede observar y con el que se puede interactuar. Preguntas convenientemente formuladas deberán facilitar una conveniente caracterización del sistema lo que permitirá clarificar su origen y el papel de los distintos componentes del hábitat en distintos escenarios evolutivos.

Con el fin de completar el estudio global del ecosistema del Tinto existen diversos proyectos de investigación astrobiológica en desarrollo: el estudio sistemático de los sedimentos anaerobios del sistema, la exploración del lago ácido de Peña del Hierro con un submarino capaz de medir las constantes vitales del sistema y tomar muestras para su posterior análisis geoquímico y microbiológico (Fernández-Remolar et al., 2004a), la exploración del subsuelo de la Faja Pirítica Ibérica mediante un proyecto de perforación (MARTE) en colaboración con la NASA y con el fin de conocer las

posibles actividades microbiológicas operativas en la zona de contacto agua-mineral así como probar que la tecnología para perforar en Marte está disponible para una futura misión al planeta rojo (Fernández-Remolar et al., 2004b) Este es el año de Marte, varias sondas exploratorias, una europea y varias norteamericanas se han dado cita en el planeta rojo. Los datos aportados por el rover *Opportunity* a partir de la exploración de una zona de hematitas (óxidos de hierro) de Meridiani Planum nos muestran un planeta con un pasado con importantes cantidades de agua ácida capaz de formar jarositas (Kerr, 2004a; Kerr, 2004c), un mineral frecuente en las aguas ácidas de las minas de sulfuros metálicos, como por ejemplo Río Tinto. La reciente detección de pequeñas concentraciones de metano en la atmósfera marciana, un gas con una vida media corta, es otro posible indicio de vida (Kerr, 2004b). Estos datos no prueban por supuesto la existencia de vida en Marte, pero abren interesantes expectativas sobre sus posibilidades. En la exploración astrobiológica de Marte, el sistema del Tinto es considerado un interesante análogo terrestre, debido a su peculiar geomicrobiología. Los próximos años serán sin dudas apasionantes para la astrobiología. Los datos generados por las distintas misiones actualmente en curso o próximas a desarrollarse permitirán adentrarnos en uno de los enigmas fundamentales de la humanidad: ¿estamos solos en el Universo? o la vida es común, un imperativo cósmico producto de la evolución del Universo. En la búsqueda de respuesta a esta pregunta el modelo del Tinto, un pequeño enclave de nuestro país, tiene algo que decir.

Referencias

- Aguilera, A., Amils, R. 2004, en: Mars: the Search for Life, Proceedings of the III European Workshop on Exo-Astrobiology, ESA, 163-164
- Amaral-Zettler, L.A., Gómez, F., Zettler, E., Keenan, B.G., Amils, R., Sogin, M.L. 2002, Nature, 417, 137
- Amils, R., González-Toril, E., Fernández-Remolar, D., Gómez, F., Rodríguez, N., Durán, C. 2002, Rev/Views in Environmental Science and Biotechnology, 1, 299-309
- Amils, R., González-Toril, E., Gómez, F., Fernández-Remolar, D., Rodríguez, N., Malki, M., Aguilera, A., Amaral-Zettler, L.A. 2004, en: Origins, J. Seckbach (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, en prensa
- Anbar, A.D., Knoll, A.H. 2002, Science, 297, 1137-1142
- Archibald, F. 1983, FEMS Microbiology Letters, 19, 29
- Avery, D. 1974, Not on Queen Victoria's Birthday, Collins, London
- Boulter, C.A. 1996, Journal of the Geological Society of London, 153, 181-184
- Boyd, W. P. et al. 2000, Nature, 407, 695-702
- Braun, V., Killmann, H. 1999, Trends in Biochemical Sciences, 24, 104-109
- Bridge, T.A.M., Johnson, D.B. 2000, Geomicrobiology Journal, 17, 193-206
- Brock, T.D. 1995, Annual Reviews in Microbiology, 49, 1-28
- Cloud, P. 1973, Economic Geology, 68, 1135-1143
- Davis Jr., R.A., Welty, A.T., Borrego, J., Morales, J.A., Pendon, J.G., Ryan, J.G. 2000, Environmental Geology, 39, 1107-1116
- de Ronde, C.E., De Wit, M.J., Spooner, E.T.C. 1984, South Africa. Geol. Soc. Am. Bull., 106, 86-104
- Edwards, K.J., Bond, P.I., Gihrin, T.M., Banfield, J.F. 2000, Science, 287, 1796-1798
- Ehrlich, H.L. 2001, Hydrometallurgy, 59, 127-134
- Ehrlich, H.L. 2002, Geomicrobiology, fourth edition, Marcel Dekker, Inc., New York
- Elbaz-Poulichet, F., Braungardt, C., Achterberg, E., Morley, N., Cossa, D., Beckers, J.M., Nomérange, P., Cruzado, A., Leblanc, M. 2001, Continental Shelf Research, 21, 1961-1973
- Fernández-Remolar, D., Rodríguez, N., Gómez, F., Amils, R. 2003, Journal of Geophysical Research, 108(E7), 5080, doi:10.1029/2002JE001918
- Fernández-Remolar, D., Gómez-Elvira, Gómez, F., Sebastián, E., Martín, J., Menfredi, J.A., Torres, J., González-Kesler, C., Amils, R. 2004a, Planetary and Space Science, 52, 239-248
- Fernández-Remolar, D. and the MARTE Scientific Team 2004b, en: Mars: the Search for Life, Proceedings of the III European Workshop on Exo-Astrobiology, ESA, p. 237-238
- Gehrke, T., Hallmann, R., Sand, W. 1995, en: Biohydrometallurgical Processing, T. Vargas, C.A. Jerez., K.V. Wiertz, and H. Toledo (eds.), vol 1, Universidad de Chile, Santiago, p. 1-11
- Geen, A. van, Adkins, J.F., Boyle, E.A., Nelson, C.H., Palanques, A. 1997, Geology, 25, 291-294
- Gómez, F., Amils, R. 2002, in: The Evolving Sun and its Influence on Planetary Environments, B. Montesinos, A. Giménez and E.F. Guinan (eds.), The Astronomical Society of the Pacific Conference Series, San Francisco, vol. 269, p. 339-352
- Gómez F., Fernández-Remolar, D. González-Toril E., Amils R. 2004a, en: Scientists on Gaia, L. Margulis, J. Miller, P. Boston, S. Schneider and E. Crist (eds.), MIT Press, Boston, in press

- Gómez, F., Grau, A., Vázquez, L., Amils, R. 2004b, en: Mars: the Search for Life, Proceedings of the III European Workshop on Exo-Astrobiology, ESA, pp 21-25
 - González-Toril, E., Gómez, F., Rodríguez, N., Fernández-Remolar, D., Zuluaga, J., Marín, I., Amils, R. 2002, Hydrometallurgy, 71, 301-309
 - González-Toril, E., Llobet-Brossa, E., Casamayor, E.O., Amann, R., Amils, R. 2003, Applied and Environmental Microbiology, 69, 4853-4865
 - Gross, M. 1996, Exzentriker des Lebens, Spektrum Akademischer Verlag
 - Hansford, G.S., Vargas, T. 2001, Hydrometallurgy, 59, 135-145
 - Holland, H.D. 1973, Economic Geology, 68, 1169-1172
 - Johnson, D.B. 1998, FEMS Microbiological Ecology, 27, 307-317
 - Johnson, D.B. 1999, en: Biohydrometallurgy and the Environment toward the Mining of the 21st century, vol A, R. Amils and A. Ballester (eds.), Elsevier, Amsterdam, p. 645-656
 - Kerr, R.A. 2004a, Science, 303, 1450
 - Kerr, R.A. 2004b, Science, 303, 1953
 - Kerr, R.A. 2004c, Science, 304, 940
 - Leblanc, M., Morales, J.A., Borrego, J., Elbaz-Poulichet, F. 2000, Economy Geology, 95, 655-662
 - Leistel, J.M., Marcoux, E., Thiéblemont, D., Quesada, C., Sánchez, A., Almodóvar, G.R., Pascual, E., Sáez, R. 1998, Mineralium Deposita, 33, 2-30
 - López-Archilla, A.I., Marín, I., Amils, R. 1993, Geomicrobiology Journal, 11, 223-233
 - López-Archilla, A.I., Marín, I., González, A., Amils, R. 1995, en: Fungal identification techniques, L. Rosen, V. Rubio, M.T. Dawson, and J. Frisvard (eds.), European Commission, Luxembourg, p. 202-211
 - López-Archilla, A.I., Marín, I., Amils, R. 2001, Microbial Ecology, 41, 20-35
 - Malki, M. 2003, Tesis doctoral, U. Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias
 - Martin, J.H. 1990, Paleoceanography, 5, 1-13
 - Morrison, D. 2001, Astrobiology, 1, 3-14
 - Price, C.A. 1968, Annual Review of Plant Physiology, 19, 239-248
 - Reid, R.T., Live, D.H., Faulkner, D.J., Buttler, A. 1993, Nature, 366, 455-458
 - Rothschild, L.J., Mancinelli, R.L. 2001, Nature 409, 1092-1101
 - Sand, W., Gehrke, T., Hallmann, R., Schippers, A. 1995, Applied Microbiology and Biotechnology, 43, 961-966
 - Sand, W., Gehrke, T., Jozsa, P.G., Schippers, A. 2001, Hydrometallurgy, 59, 159-175
 - Silverman, M.P., Ehrlich, H.L. 1964, Advances in Applied Microbiology, 6, 153-206
 - Woese, C.R., Fox, G.E. 1977, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 77, 5088-5090
 - Woese, C.R. 1993, en: The biochemistry of Archaea (Archaeobacteria), M. Kates et al. (eds.), Elsevier, Amsterdam, p. vii-xxix
-

Atmospheric biomarkers on terrestrial exoplanets

F. Selsis¹ selsis@obs.u-bordeaux1.fr

¹ Centro de Astrobiología (INTA-CSIC), Ctra. de Ajalvir, km. 4, 28850, Torrejón de Ardoz, Madrid, Spain

Abstract

During the next decade, the first space-borne instruments able to detect and characterize extrasolar terrestrial planets will be launched. The most ambitious goal of these space telescopes, whether they will observe the visible and near infrared reflection spectrum of the planets or their thermal proper emission, will be to search for spectral signatures indicating some biological activity. In this paper, we review and discuss the concept of extrasolar “biosignature” or “biomarker” and investigate the possible strategies for the seek for inhabited worlds.

Introduction

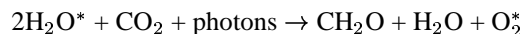
The existence of other planetary systems, already discussed by ancient Greek philosophers, has been proved only very recently, first around pulsars (Wolszczan & Frail 1992), then around solar type stars (Mayor & Queloz 1995). In the latter case, the planets discovered are giant planets (of the order of Jupiter’s mass) and likely to be gaseous, which proved to be the case for HD 209458 b (Charbonneau et al. 2000). Up to June 2004, 122 planets with masses above 0.1 Jupiter mass have been detected around 107 main sequence stars¹. As the detection of a planet requires observations made over a time comparable to its period, most of them have a short period. The radial velocity method has recently been used successfully to reveal outer planets at the same orbital distance as Jupiter or Saturn.

Though some of these planets orbit in the ‘habitable zone’ of their parent star, living species are not expected on such giant planets. If it were the case, the life forms would be so different from what we know that their remote identification would be extremely unlikely. It should however been noted that all giant planets in our Solar System have telluric or icy satellites, so habitable satellites could orbit around some of these giant exoplanets (Williams et al. 1997). The search for small terrestrial type planets raises considerable scientific and philosophical interest. However, it is technically much more difficult: such planets do not sufficiently perturb the trajectory of their parent star to produce an indirect detectable feature and their brightness, 10^6 to 10^{10} times lower than the stellar one, is diluted within the diffraction pattern of the star. Among the projects aiming at the detection of terrestrial planets, the first ones to come will search for planetary transits, observing continuously for months or years some dense fields of stars. These space

missions are COROT (CNES, Rouan et al., 1998), Kepler (NASA, Borucki et al., 1997). These missions will give us statistics on the abundance of terrestrial planets, their size, period and orbital distance.

The first projects for the direct detection of terrestrial planets are not expected before 2014 and are Darwin (ESA, Léger et al., 1996, Volonte et al., 2000) and TPF (NASA, Beichman et al., 1999). Hereafter we will refer to these missions with the common name ‘Darwin/TPF’ to underline the strong will of both space agencies to achieve a joint project. Although other designs are currently under study, the original concept is based on ‘nulling interferometry’. This method, combining the light from several mirrors, allows one to dim the light from the central star and to increase the contrast between the star and possible planets (Bracewell 1978; Ollivier 1999).

As soon as photons coming from the planet can be distinguished from those coming from the star, a spectral analysis is feasible within the available signal-to-noise ratio and sensitivity. The physical and chemical properties of the planets and their atmosphere can be studied. The recent detections of the upper atmosphere of a ‘hot Jupiter’ (HD 209458 b) in absorption during a transit are the first spectral information gained on the atmosphere of an exoplanet (Charbonneau et al. 2002; Vidal-Madjar et al. 2004). As life on Earth has strongly modified the planet (atmosphere, ocean, surface), can we use this fact to distinguish spectroscopically the presence of a similar ecosystem on another planet? In the particular case of Earth, O₂ is fully produced by the biosphere, less than 1 ppm coming from abiotic processes (Walker 1977). Plants and cyanobacteria are responsible for this production by using the solar photons to extract hydrogen from water and using it to produce organic molecules from CO₂. This metabolism, called oxygenic photosynthesis, can be summarized as follows:



(* shows that O atoms in O₂ originate from water)

Owen (1980) suggested to search for O₂ as a tracer of life. In a famous paper, Sagan et al. (1993) analyzed a spectrum of the Earth taken by the Galileo probe, searching for signatures of life. They concluded that the large amount of O₂ and the simultaneous presence of CH₄ traces are suggestive of biology. Moreover, the detection of a widespread red-absorbing pigment with no likely mineral origin supports the hypothesis of biophotosynthesis. Recently Arnold et al. (2002) and Woolf et al. (2002) independently recorded spectra of the Earthshine on the moon (the light reflected by the Earth, then by the Moon back to the Earth) and observed the signatures of oxygen, ozone and the specific albedo of the vegetation. Instead of searching directly for O₂, Angel et al. (1986) suggested considering O₃ and its signature in the mid-infrared (9.6 μm) which produces a strong feature in the Earth’s emission. In this wavelength range (the mid-infrared), the brightness contrast star/planet is 1000 times more favorable than in the visible. Léger et al., (1993) have investigated the feature of O₃ as a tracer of O₂ in planetary atmospheres and the use of O₃ as a tracer of oxygen-rich at-

¹see *the extrasolar planet encyclopedia*, by J. Schneider at <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>

mospheres sustained by life. This concept is at the root of Darwin, as proposed to ESA by Léger et al. (1996), and of TPF (Terrestrial Planet Finder, Beichman et al., 1999). In the present chapter, we will merely explore the “astrobiological” possibilities of an instrument based on the original Darwin concept, able to produce a low resolution spectrum ($\lambda/\Delta\lambda \sim 25$) of the mid-infrared thermal emission of a terrestrial exoplanet ($\sim 5\text{-}20 \mu\text{m}$). We will consider mainly the possible biosignatures within this spectral range. However, an alternative instrument, a coronagraph working in the visible range, is under study by NASA (TPF-C). The reader can find a complementary study of biosignatures in the visible range in a paper by DesMarais et al. (2002).

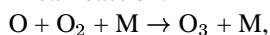
Ozone as a biosignature

In order to validate the astrobiological strategy of a Darwin / TPF-I² mission, it is necessary to estimate the risk of false positive and false negative occurrence. A false positive case results from the detection of an abiotic feature that is wrongly attributed to some biological activity. On the other hand, a false negative case occurs when an inhabited planet does not present any of the searched-for features, whether because the dominant metabolisms do not produce the expected biosignature or because the biosignature is undetectable or masked by some other processes. We present here the results from various studies allowing us to test the efficiency of O₃ to trace O₂-producing ecosystems.

O₃ as a tracer of O₂-rich atmospheres

Is ozone a good tracer of oxygen-rich atmospheres? The answer depends obviously on the wavelength range considered. The range giving the best contrast between the stellar and the planetary emission is the mid-infrared, around 10 microns, where the thermal emission of the terrestrial planets peaks. In this spectroscopic window, O₂ itself does not have vibrational transitions while O₃ exhibits a strong band centered at 9.6 μm . This band (and also H₂O bands) produces a strong feature in the Earth's infrared emission that makes our planet, distinguishable from any other in the Solar System (see Fig 1).

Ozone is produced in the atmosphere by a unique chemical reaction:



where M is any compound. This reaction is not very efficient as it requires at the same time a high enough pressure (because of the third body), and oxygen atoms that are produced at the upper altitudes, where photolysis of O₂ by UV can occur.

On the contrary, ozone can be efficiently destroyed by a large number of reactions, dominated, in the Earth's atmosphere, by catalytic cycles involving trace species such as hydrogenous compounds (H, OH, HO₂), nitrogen oxides (NO_x) and chlorine compounds (ClO_x). These species

have various origins and their amount depends on the nature and the intensity of the bio-productivity, the thermal profile of the atmosphere, human pollution, and many other parameters. Without these compounds, an atmosphere made of N₂ and O₂ would contain 10 times more O₃. As the amount of O₃ in an O₂-rich atmosphere strongly depends on the abundance of such trace compounds with various origins and complex behaviors, it is difficult to 'extrapolate' the chemistry of our present atmosphere to any other planet sustaining an oxygen-producing ecosystem. However, for a given atmospheric composition, the amount of O₃ is weakly sensitive to the total amount of O₂. O₃ has been described as a 'logarithmic tracer' of O₂ because of this behaviour: 10 times less O₂ results in 2 times less O₃ (Léger et al., 1993). Moreover, for a given composition of the atmosphere, the amount of O₃ is very sensitive to the incoming stellar radiation. O₃ production depends on the availability of oxygen atoms and therefore on the photolysis of O₂ by the UV radiation. However, more UV radiation also enhances ozone destruction, directly by photolysis, but mostly indirectly due to the increased photochemical production of highly reactive radicals. For atmospheric compositions similar to the Earth's, numerical simulations show a quantity of O₃ increasing with the UV flux (Selsis, 2000). This property could play a very important role for the surface habitability by providing an ozone shield to the lethal UV radiations 'tuned' to the intensity of the incoming radiation.

The detectability of the O₃ feature, or its depth in the infrared spectrum, depends on two main parameters: the atmospheric profiles of the ozone abundance and temperature. The ability to detect O₃ with a Darwin/TPF instrument, with a low resolution (only 1 or 2 bins for the O₃ band) and a signal-to-noise ratio of about 5, requires a signature as deep on the Earth. The complex coupling between radiation, photochemistry and temperature prevents us from generalizing the processes occurring in Earth's atmosphere and requires detailed modelling. By using a numerical code that simulates the photochemistry of a wide range of planetary atmospheres, We have simulated a replica of our planet orbiting a F-type star (more massive and hotter than the Sun) and a K-type star (smaller and cooler than the Sun). The orbital distance was chosen in order to give the planet the Earth's effective temperature (by receiving the same energetic flux): 1.8 and 0.5 AU respectively for the F- and the K-type star. Scaling the energetic flux allows us to consider habitable planets irradiated by a non-solar spectrum: the contribution of the UV range (150-400 nm, the most important for the photochemistry) is higher for the F-type star and lower for the K-type star (this is no longer true in the EUV range, below 150 nm, where low-mass stars like K-type stars are very active). The results obtained are described in details in (Selsis, 2000) but let us summarize them. The planet orbiting the K star has an O₃ layer thinner than the Earth's one but still exhibits a deep O₃ absorption: indeed, the low UV flux at lower altitudes than on Earth which results in a less efficient warming (because of the higher heat capacity of the dense atmospheric levels). Therefore, the ozone layer is much colder than the surface and this temperature contrast produces a strong feature in the thermal emission. The process is

²TPF-I refers to the IR interferometer version of TPF, while TPF-C refers to the coronagraphic telescope

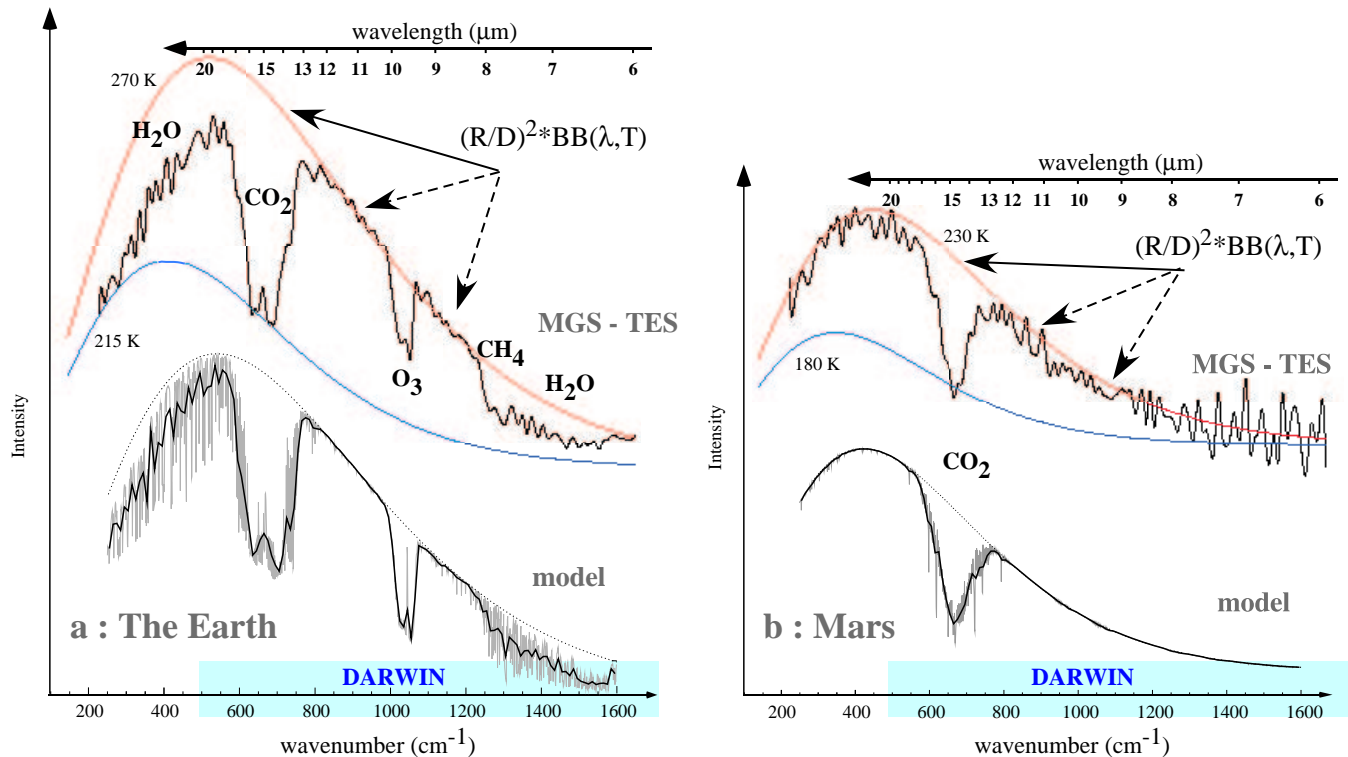


Fig. 1.: Thermal emission of the Earth and Mars. The infrared spectra of the Earth (a) and Mars (b) were measured by the instrument TES of Mars Global Surveyor, and are compared to the synthetic spectra obtained with a numerical model: PHOEBE. The envelope of each spectrum is given by $(R/D)^2 \times BB(\lambda, T)$ where D is the distance to the planetary system, R the radius of the planet and BB is the Planck function.

reversed in the case of a F-type host star. Here, the ozone layer is denser and warmer than the terrestrial one, exhibiting temperatures close to the surface temperature. Thus, the resulting low temperature contrast produces only a weak and barely detectable feature in the infrared spectrum. This comparison shows that the observable conditions for the search for life with the O₃ criterion may be better in the case of G (solar) and K-type stars than in the case of F-type stars. This result is at least promising since G and K-type stars are much more numerous than F-type stars, the latter being rare (4 closer than 10 *pc*) and affected by a short lifetime (less than 1 *Gyr*).

Playing as we did with only one parameter, the stellar spectrum, is a way to identify fundamental mechanisms in the formation of the O₃ signature but certainly not to predict the general atmospheric and spectral properties of exo-Earths. In order to understand the sensitivity to other parameters, new simulations should be performed by changing variables such as gravity, pressure and the background composition of the atmosphere, biogenic emission of tropospheric gases such as CH₄ or N₂O, and orbital distance.

The case of very-low mass stars (M and cold K) still requires studies. Their habitable zone, where one can expect surface temperatures compatible with liquid water, is indeed very close to the star. If planets do form in their circumstellar zone, they should be tidally locked, always presenting the same hemisphere to their parent star. Because of this,

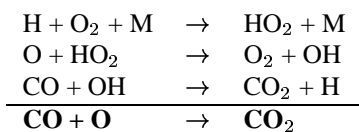
the thermal inertia of the atmosphere has to be high enough to prevent the gases from collapsing by condensation on the night side (Joshi et al. 1997). A CO₂ partial pressure of more than 1 bar is thus required. We will discuss the further consequences of this high CO₂ pressure on the IR and visible biosignatures in the next sections (see Fig. 3)

Abiotic production of O₂/O₃ and false positive detections

The fact that, on the Earth, oxygen and indirectly ozone are by-products of the biological activity does not mean that life is the only process able to enrich an atmosphere with these compounds. The question of the abiotic synthesis of biomarkers is crucial though very few studies have been yet dedicated to it (Kasting 1995; Léger et al. 1999; Rosenqvist & Chassefiere 1995; Selsis et al. 2002). To qualitatively associate oxygen and life without investigating further possible abiotic sources is an error that has already been committed in the past. In the 50's, though no precise data about the composition of the Martian atmosphere was available, it was already understood that the red colour of the Martian surface was due to oxidation. Some scientists inferred from this hypothesis (true) that oxygen was the main component of the atmosphere (wrong: there is only 0.1%) and that this oxygen should have a biological origin (Spencer Jones, 1958). The presence of O₂ was interpreted as a 'confirmation' of the presence of vegetation, already suggested by some seasonal colour variations of the planet (now understood as seasonal

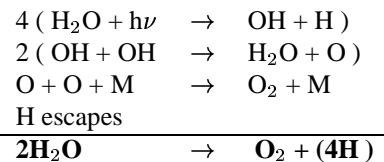
dust storms). However, the 0.1% of O₂ (for a surface of 6 mbar), as well as O₃ (abundance of about 10⁻⁸), has an abiotic origin: photochemistry.

The Martian atmosphere is the perfect 'laboratory' to learn about the photochemical synthesis of O₂ and O₃. Indeed, if an abiotic production of O₂ does exist on Earth, it is totally masked by the biological release. The main constituent of the Martian atmosphere is carbon dioxide (CO₂ : 95,3 % - N₂ : 2.7 % - Ar : 1.6% - O₂ : 0.13 % - CO : 0.08 % - H₂O : ~ 0.01 %, O₃ : ~ 10⁻⁶ %). CO₂ is photolyzed by UV radiation at wavelength below 227 nm, producing one carbon monoxide, CO and one atom of oxygen, O. The reaction between two oxygen atoms to form O₂ is much more efficient than the CO+O recombination into CO₂ (the reaction is 10⁵-10⁷ times faster at temperature prevailing in the Martian atmosphere: 145-270 K). This simple fact seems to be in contradiction with the stability of a CO₂ atmosphere and it took a long time to understand why CO and O₂ are not major compounds on Mars. Indeed, their accumulation should only be limited by the O₂ photolysis that destroys O₂ and 'steals' part of the photons able to photolyse CO₂. Some photochemical simulations have shown (Nair et al., 1994; Selsis et al., 2002) that, in a Martian atmosphere purely made of CO₂, O₂ would reach a level of 3% (in the absence of other chemical loss of O₂ such as surface oxidation). If O₂ is a minor component of the Martian atmosphere, it is due to the presence of another atmospheric compounds playing a critical role in the photochemistry: water vapor. H₂O is only a trace gas on Mars: if condensed, the whole content of water vapor in the atmosphere would represent a 3 mm layer of water on the surface. But despite its low abundance, H₂O strongly influences the photochemistry, and above all, the level of O₂ and O₃. Indeed, H₂O, like CO₂ and O₂, is photodissociated by the solar UV radiation. H₂O photolysis produces hydrogen atoms, and hydrogenated compounds, that catalyse the recombination of CO into CO₂. The following catalytic cycle is the main recombination route for CO₂ in the Martian atmosphere:

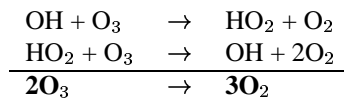
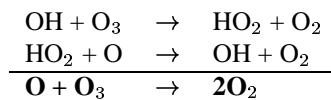
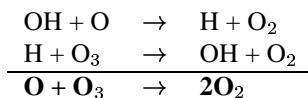


The small amount of water vapor in the atmosphere of Mars is then enough to prevent the accumulation of O₂. Moreover, the photolysis of H₂O produces, directly or indirectly, some oxidants much more reactive than O₂: OH, HO₂ and H₂O₂. The oxidation of the surface, and hence the loss of oxygen, is therefore much higher in their presence.

H₂O photolysis enhances the consumption of O₂ but it can also result in its production and accumulation when it is associated with a significant loss of hydrogen to space. Indeed, a fraction of the hydrogen atoms released by H₂O photolysis in the upper atmosphere have enough kinetic energy to exceed the escape velocity, inducing an 'oxidation' of the atmospheric content. One can summarize this process as follows:



On Mars, the escape of H can contribute to the observed level of O₂ (Nair et al. 1994), though it is not yet demonstrated due to uncertainties in the photochemical modelling (Selsis 2000). The hydrogenous radicals produced from H₂O photolysis also very efficiently destroy ozone. Again, catalytic cycles are involved in the destruction process and the small abundances of the by-products of water vapor photodissociation can strongly affect the ozone content.



The cycles above are responsible for the diurnal variation of O₃ in the upper stratosphere and mesosphere of the Earth and are the main pathways for the destruction of O₃ on Mars. This explains why the abundances of water and ozone are anti-correlated on Mars, the maximum of ozone being above the poles in winter where the atmosphere is the driest.

Mars is not a unique place in the solar system where oxygen is produced abiotically: some icy satellites of Jupiter (Europa, Ganymede) and of Saturn (Rhea, Dione) exhibit a tenuous atmosphere (~ 10⁻¹⁰ bar) quasi exclusively made of O₂ and O₃ (Hall et al., 1995; Noll et al., 1996 and 1997). The associated column densities (density integrated over the altitude) are very low. Nevertheless it reveals an abiotic continuous synthesis of these two molecules from the dissociation of water (ice) by UV and, mostly, charged particles trapped in giant planet magnetospheres. The hydrogen released from water escapes from the low gravity field of the satellites, and a gas enriched in oxygen remains, partly in the atmosphere and partly in bubbles within the ice, mainly made of O₂ and O₃ (Johnson & Jesser 1997).

In the case of Venus, one could expect to find atmospheric oxygen. Indeed, this dry planet is believed to have been water-rich at the beginning of its history, and the hydrogen escape generally suggested to explain the disappearance of water (Kasting 1988) should have led to considerable amounts of residual oxygen. The loss of the hydrogen content of a 100 m layer of water would result in 8 bar of pure O₂. However, molecular oxygen has not yet been observed on Venus, and its abundance in the middle atmosphere is lower than 10⁻⁶. The 'missing oxygen' was probably consumed through the oxidation of the surface and volcanic emissions. This illustrates the fact that, to result in an O₂ build-up

on a geologically active planet, the rate of O₂ production has to exceed the oxidation rates. From this viewpoint, Venus is very different from Mars: the latter is a small planet that cooled rapidly, which surface is mostly inert, fully oxidized and consuming the atmospheric oxidants only at a very slow rate.

The study of the photochemistry in the planetary atmospheres of the Solar System reveals some mechanisms for the synthesis of O₂ and O₃. The production rates and the amounts of these abiotically synthesized molecules are very low: the column densities of O₂ and O₃ on Mars are respectively 6×10^{-5} and 5×10^{-4} times those of the Earth, this ratio being 10^{-10} in the case of the icy satellites. Nevertheless, in some different environments such processes could a priori lead to higher levels (as we saw in the hypothetical case of a dry Martian atmosphere) on extra-solar planets. It is therefore crucial to find some quantitative and/or qualitative criterion, accessible to remote detection, which would allow us to distinguish between biologic and abiotic origins. A first conclusion arises: a biosignature is a concept more complex than the “binary” detection of a given compound. The question “Is there oxygen (or ozone) in this atmosphere?” has to be replaced by “How much oxygen (or ozone) is there?”. It is however not enough. The search for signs of life implies the need to gather as much information as possible in order to understand how the observed atmosphere physically and chemically works. For this, it is fundamental to take into account the instrumental characteristic. Indeed, sensitivity and resolution behave as filters, permitting us to detect given species only for amounts above a threshold: as an example, the ozone content of an “exo-Mars” or an “exo-Ganymede” could not be detected with a Darwin/TPF instrument while the ozone content of an “exo-Earth” could.

Numerical simulations

In order to validate the biosignature “ozone” in the infrared, to test and refine its definition, we sought to simulate an accumulation of oxygen and ozone by abiotic processes in the atmosphere of exoplanets (Selsis et al. 2002). For that, we used a numerical code, PHOEBE, modeling the physical and chemical evolution (primarily temperature and chemical composition) of a planetary atmosphere starting from an arbitrary initial state and submitted to the irradiation of a star. We sought the conditions maximizing the production of O₂ and O₃ molecules, starting from the photodissociation of CO₂ and H₂O, and we calculated in each case the infrared emission of these planets searching for the resulting spectroscopic features. We tried to produce realistic cases of “false positives”, i.e. cases presenting what was hitherto regarded as a biosignature: the band of O₃ at 9.6 μm

A mixture of CO₂ and water vapor proves to be relatively inefficient in producing O₂ because, as in the case of Mars, the hydrogenated radicals coming from the photolysis of H₂O induce a fast recombination into CO₂. However, if one considers a very dense atmosphere of CO₂ (> 1 bar), even with a permanent liquid water reservoir, the photolysis of H₂O becomes a negligible process. In this case, the radiative properties of CO₂ induce a hot lower atmosphere, who-

se temperature decreases quickly with altitude, up to very low values in the middle atmosphere causing the condensation of CO₂. As it goes up into the atmosphere, the water vapor also condenses when meeting this cold trap. The photons able to photolyse H₂O are also absorbed by CO₂. The altitudes where one finds the radiation that can photodissociate H₂O are then very high and only a minute quantity of water vapor reach them. Under these conditions, CO₂ is photodissociated without a fast reformation of the molecule because of the lack of hydrogenated radicals. Thus, O₂ accumulates and O₃ forms a dense layer. However, this dense layer of O₃ absorbs the UVs at longer wavelengths than CO₂ does. As a consequence, O₃ strongly heats the middle atmosphere, modifies its thermal structure and creates a stratosphere, just like on Earth. This effect of ozone results in decreasing the efficiency of the cold trap and letting more water vapor reach high altitudes. Thus, there is a strong negative feedback limiting the accumulation of O₂ and O₃. We estimated that, in a 1 bar CO₂ wet atmosphere, without surface oxidation, and taking into account the uncertainties of modeling, the column densities of O₂ and O₃ are:

- $1.3 \times 10^{22} < O_2 < 8.8 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$, which is respectively 0.3% and 20% of the O₂ column densities on Earth ($4.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$),
- $5 \times 10^{17} < O_3 < 1.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$, which is respectively 5% and 200% of that of O₃ on Earth ($9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$).

This result shows that it is theoretically possible to find an abiotic atmosphere rich in O₂ and O₃, **possibly with more ozone than on Earth**, the oxygen coming from the photolysis of CO₂. However, such a CO₂-rich atmosphere has a very special infrared signature. For CO₂ pressure higher than 50 mbar, characteristic absorption bands appear at 9.4 and 10.5 μm. These bands, first, characterize CO₂-rich atmospheres and, second, mask the signature of ozone at 9.6 μm when measurements are performed with the (low) spectral resolution of an instrument such as Darwin/TPF. For even higher pressures, other bands appear at 7.3 and 7.9 μm and the absorption induced by CO₂ - CO₂ collisions practically erases any other spectral signature in the thermal emission.

What does occur in a CO₂ atmosphere without any water vapor? In this case, similar to the “dry Mars” considered previously, the CO₂ partial pressure, P_{CO₂}, necessary to a significant enrichment in O₂ / O₃ is much weaker. Indeed, the only phenomenon which limits the conversion of CO₂ into CO and O₂ is the absorption by O₂ of the radiation able to photodissociate CO₂: the O₂ increase produces a decrease of the CO₂ dissociation rate and consequently of the O and O₂ production. Let us consider a water free atmosphere containing 50 mbar of CO₂, knowing that for higher values of P_{CO₂}, the ozone signature is no longer detectable by an instrument with low spectral resolution. In such a case, one obtains column densities of $9 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ and $1.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ for O₂ i.e. respectively 2% and 19% of the terrestrial values. This case could be considered as a ‘false positive’ if the analysis was based only on the presence of

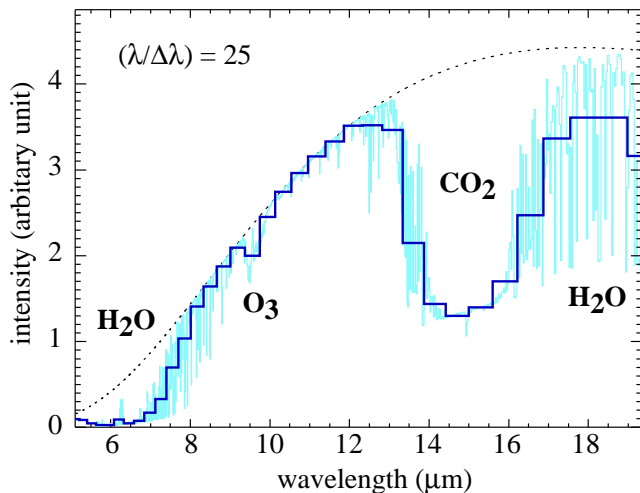


Fig. 2.: Abiotic signature of O_3 in a wet atmosphere losing H. In the case of a wet upper atmosphere submitted to an intense UV/EUV irradiation, H_2O photolysis followed by the escape of H atoms may result in a build-up of O_2 and O_3 . This IR spectrum was computed for the higher O_2 abundance we obtained. Only a very thin ozone layer can form in the enhanced presence of hydrogenous radicals produced by H_2O photolysis and its signature is hardly detectable, even in this 'optimized' configuration.

the single species O_3 whose spectral signature can, in principle, be distinguished from that of CO_2 . However, it is generally admitted that water is necessary to life as we know it and specifically to oxygenic photosynthesis since O_2 is produced from the oxygen atoms of water. Consequently, a detection of O_3 , associated with the CO_2 signature but without that of water, cannot be regarded as a biosignature.

We have studied another case of abiotic O_2 / O_3 enrichment, that of an atmosphere rich in water vapor, subjected to an intense dissociating radiation and a high H atom escape. The latter can be thermal (Jeans) or non-thermal (sputtering, exothermic reactions). To induce a significant O_2 enrichment, a high photodissociation rate of water vapor is needed. It is then necessary that H_2O is the main UV absorbing species and that water vapor is present in large quantities at high altitude. This is generally not the case because of the water vapor losses by condensation, as rain or snow, when it goes into the atmosphere (cold trap). This is for instance what occurs during a 'runaway greenhouse' scenario (Kasting 1988): the wet atmosphere has an isothermal profile allowing the vapor to reach the high altitude where it is photodissociated.

We studied various 'wet' atmospheres formed during such runaway or because of the infall of icy particles in the upper atmosphere e.g. cometary particles or small comets. In such a situation, water vapor is present at high altitude and O_2 build-up occurs since the H escape rate exceeds that of oxidation of the planetary surface. We tuned the surface oxidation rate in order to have an accumulation of O_2 . In a 1 bar atmosphere made of N_2 and water vapor, our simulations yield an extreme upper limit of 1% for O_2 . For a larger

oxygen abundance, O_2 competes with H_2O for UV photodissociation and the destruction of O_2 increases while the photolysis of H_2O decreases. 1% of O_2 would be detectable through the visible/NIR lines of O_2 in the reflected spectrum of the planet. Strong H_2O lines would also be observed and at high resolution ($R > 80$) their depth and broadening may indicate a very wet atmosphere. This with the orbital distance and the stellar luminosity could warn the observer that a runaway greenhouse is occurring. Also, this abiotic mechanism for oxygen build-up cannot produce a dense IR-absorbing ozone layer. Indeed, hydrogen escape requires H_2O photolysis, which, in return, produces O_3 -destroying radicals. Also, the nearly isothermal profile obtained in a runaway greenhouse scenario would unlikely produce a deep spectroscopic signature in the middle atmosphere.

Fig.2 shows the deepest O_3 signature we obtained with a 'wet' scenario. This most favourable case profits from not very realistic ad hoc conditions, especially because we considered the infall of pure H_2O : real cometary material would also deliver UV absorbing species (such as CO_2) and reducing ones (such as CO or CH_4 , organics and metals). If more CO_2 is added to this atmosphere the production of O_2 is strongly reduced as fewer photons can take part in water photolysis. Therefore, wet abiotic synthesis of O_2 would not likely produce a thermal emission spectrum with the simultaneous signature of O_3 , H_2O and CO_2 .

The conclusions from these numerical simulations are:

- Under abiotic conditions, an atmosphere can contain O_2 and O_3 amounts similar to, or even higher than, the current ones in the Earth's atmosphere.
- The signature of one of these molecules alone, without additional information on the composition of the atmosphere, cannot be considered as a reliable biomarker.
- In the 5-20 μm spectroscopic range, the triple signature of $O_3 - H_2O - CO_2$, is a reliable biosignature which has not been reproduced so far by any abiotic photochemical modelling.

Regarding the last conclusion, at the spectral resolution planned for Darwin / TPF instruments ($\lambda/\Delta\lambda < 25$), the identification of these three species in the spectrum is a robust way to filter out a non-biological production of O_2 and O_3 . With future instruments, providing higher spectral resolution, additional details in the spectrum will allow the sharpening of 'false positive' eradication. For example, it will become possible to distinguish the O_3 signature from the bands that appear at high P_{CO_2} . This means that an abiotic atmosphere can present the triple signature but that the presence of the "high pressure" band of CO_2 would make it possible to point out a possible abiotic origin of the O_3 one.

It must be noted that seeking oxygenic photosynthesis, such as present on the Earth, by searching for the triple signature $O_3 - H_2O - CO_2$ is no more restrictive than searching only for O_3 since H_2O and CO_2 are "ingredients" of the O_3 producing processes. Moreover, *by definition*, H_2O and

CO₂ are expected to be abundant on habitable planets (Kasting et al. 1993).

Last but not least, it must be noted that, if the 5-20 μm range makes it possible to reject abiotic O₃ signatures even at low spectral resolution, this is probably not the case in the visible and the near-infrared range where some of the abiotic atmospheres we simulated did produce reflected light spectra with the signature of O₃, O₂, H₂O and CO₂. In addition, the CO₂ signature at $\lambda < 1.1 \mu\text{m}$ is undetectable for concentrations similar to the terrestrial one (Des Marais et al., 2002).

These conclusions stand only for the thermal wavelength: such distinction between abiotically produced features and biogenic ones is no longer found in low-resolution reflection spectra (see section).

False negative cases: when O₃ fails to trace O₂-rich atmospheres

As already mentioned, the non-detection of the O₃ - H₂O - CO₂ species does not at all mean the absence of life on the observed planet. Our planet sheltered life for about 2.5 Gyrs years without presenting such a signature: the rise of atmospheric oxygen occurred about 2.2 Gyrs ago (Bekker et al. 2004). It does not even mean that there could not be a form of life based on oxygenic photosynthesis, this metabolism on Earth being older than the rise of atmospheric O₂ (Brocks et al. 1999).

On another hand, an atmosphere rich in O₂ and O₃ may not present systematically the expected signature. Let us consider, for instance, the case of an inhabited planet similar to the Earth, but orbiting farther away from its star. At its orbital distance, a CO₂ pressure higher than 50 mbar is required to ensure a mean surface temperature above 0°C. Observed with Darwin, this “exo-Earth” would exhibit the signatures of H₂O and CO₂, the latter including in addition to the 15 μm band, additional high pressure bands that would mask the signature of O₃. A biosphere similar to the terrestrial one could not be detected in the IR under such conditions.

Observed with a ‘super-Darwin/TPF’ and a spectrometer with a much higher resolution, the signature of O₃ could be extracted from the CO₂ bands. However, the existence of these specific CO₂ bands would imply the existence of high CO₂ pressures and therefore the possibility of a non-biological production of O₂ and O₃. Then, one could not draw any strong conclusion regarding the existence of an ecosystem. For this reason, the thermal emission does not make it possible to search for O₂ producing ecosystems in the whole Habitable Zone (HZ). The value, $P_{\text{CO}_2} = 50 \text{ mbar}$, roughly defines a border between the internal HZ, where a spectral signature of O₃ can be detected and the external HZ where it cannot (Fig. 3). In this external zone, either the greenhouse gas is CO₂, and O₃ is no longer a biomarker, or it is another gas (CH₄, NH₃, N₂O) with reducing properties incompatible with an accumulation of O₂ / O₃.

Detection of an O₂-rich atmosphere in the reflected spectrum

In the visible and near-infrared spectral range, the identification of an O₂-rich atmosphere faces a double problem: first the minimum resolution power required for the detection of a single O₂ line is $R=54$, ($R=70$ for the detection of 2 or 3 lines, see Fig. 4). Second, the Chappuis band of O₃, which is very wide, requires a very high sensitivity. The Earthshine spectra obtained by Woolf et al. (2002) and Arnold et al. (2002) clearly show how difficult the detection of this feature on extrasolar planets would be. Observations in the near-infrared are needed to detect the presence of CO₂ which is a crucial information for both habitability and biosignatures. High resolution ($R \geq 100$) would be required to retrieve information about the pressure but only a much higher one would give the CO₂ column density which is the important parameter to rule out abiotic photochemistry as the origin of O₂. O₂ and O₃ detections are thus ambiguous biomarkers, at low resolution, in the reflected spectrum.

A planet experiencing a runaway greenhouse effect may concentrate O₂ in its atmosphere but not O₃ because of the radicals produced by H₂O photodissociation (except during the period starting when all the water is lost and ending when all the O₂ is consumed). It was estimated by Kasting (1988) that the runaway phase, if it occurred on Venus, should have lasted for only a small fraction of the planet’s history, less than 100 Myrs, for a water reservoir comparable to the terrestrial one. However, theories about planetary formation suggest the existence of water-rich terrestrial planets (Léger et al. 2004; Raymond et al. 2004) having an inexhaustible reservoir, able to feed a runaway greenhouse process during a large fraction of the planet’s lifetime. Therefore, an abiotic signature of O₂ can be detected in the reflected spectrum of a planet even for low CO₂ levels. A way to filter out such false-positive cases would be to validate only the planets with both O₂ and O₃ signature, but this strategy faces an observational problem: The ozone absorption is a broad but very faint feature (compared to the O₂ lines) that requires a very high sensitivity and could possibly be masked by the Rayleigh scattering (Woolf et al., 2002). The simultaneous detections of O₂ and CH₄, requiring moderate resolution, were suggested as a biosignature by Lovelock (1980) and Sagan et al. (1993) and remain the most reliable and accessible biomarkers in the visible/NIR range. The spectral signature of chlorophyll (the ‘red-edge’ seen at 700-750 nm and due to the absorption band of the pigment) has been suggested as a marker for vegetation on exoplanets (Arnold et al., 2002; Woolf et al., 2002). These authors have performed observations of the Moon’s Earthshine as an analog to the observation of an extrasolar Earth-like planet. To show up in the data, the red-edge of chlorophyll requires the use of a model for the atmospheric transmission because it is mixed with the 760 nm line of O₂. Such a procedure could obviously not be done in the case of an unknown exoplanet. Also, pigments with other spectral properties exist and thus the terrestrial vegetation signatures may not be universal.

As we can see, if a visible TPF-C is launched before an

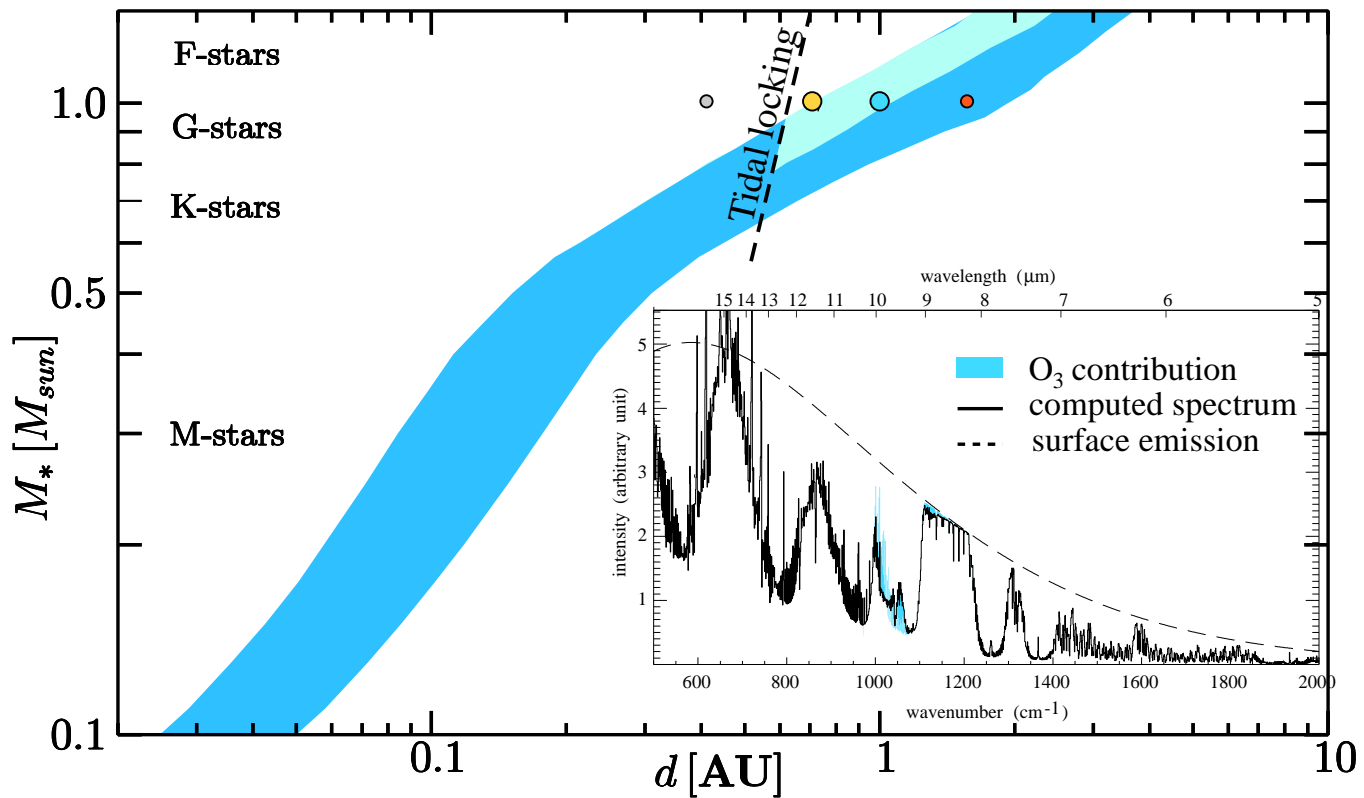


Fig. 3.: Where to search for the infrared O_3 signature in the Habitable zone? This figure gives the extension of the habitable zone (HZ) and the tidal locking limit for stars between 0.1 and 1.2 M_{sol} at an age of 4.5 Gyr. In the region of the HZ shown in dark, more than 50 mbar of CO_2 are required to provide habitability for photosynthetic O_2 producers, whether due to the large orbital distance or to the tidally synchronized rotation of the planet, requiring a strong greenhouse effect to prevent the atmosphere to condense on the night-side. The included graph shows the masking of the $9.6 \mu\text{m}$ band of O_3 by CO_2 bands, in a 1 bar CO_2 atmosphere. As this overlap preventing the detection O_3 starts for $P_{CO_2} > 50$ mbar, only in the small fraction of the HZ (shown in light) can be searched for the thermal signature of O_3 . Moreover, a detection of O_2 or O_3 at other wavelengths would be poorly indicative of life because of the possible abiotic build-up of these compounds at CO_2 pressures above 50 mbar.

IR interferometer, the characterization of the planet would have to wait further infrared analysis to possibly conclude on the detection of biosignatures. An optical mission would thus be dedicated to the detection phase and the pre-selection of interesting candidates.

Other biosignatures?

Oxygenic photosynthesis is only one among many possible metabolisms invented by life on Earth. Other sources of carbon are used (CO , CH_4 , organic molecules) as well as many sources of hydrogen or 'electron donors' (H_2S , S , H_2 , CH_4 , organic molecules, NH_3 , NO_2 , Fe^{2+} , MN^{2+} , SO_4^{2-} , to quote only few of them). The output of these various metabolisms are present in our atmosphere as trace materials, with abundances of about, or lower than, a ppm (part per million). The following table gives a list of the terrestrial atmospheric compounds which are produced by biological activity and that are potentially detectable in the thermal emission of a planet.

One can see from Table 1, that none of these compounds could be detected for the current terrestrial abundances with

Darwin/TPF. These abundances could have been higher in the past and this was probably the case for CH_4 . The methanogenic archaea that produce CH_4 by consuming CO_2 and H_2 are very primitive organisms and appeared prior to the oxygen producers. Before the build-up of atmospheric oxygen, which occurred around -2 Gyr, the photochemical life time of CH_4 in the atmosphere was much longer. Nowadays, the total production of CH_4 by the biosphere is 2×10^{14} g/yr (GEIA³, 2002) which induces in the atmosphere a CH_4 abundance of 2×10^{-6} (2 ppm). In an atmosphere without oxygen (where O_2 would be replaced for instance by N_2 , CO_2 or Ar) the same production would lead to an abundance between 100 and 1000 times larger and CH_4 would then be a major greenhouse gas, "easily" detectable in the planetary thermal emission. In addition, methane is currently produced by anaerobic organisms that are confined in 'marginal' environments (marsh, sediments, animal digestive systems, underwater hydrothermal sources; GEIA, 2002). Before the rise of atmospheric O_2 on the Earth, these methanogens were spread over a much wider biotope and the total CH_4 pro-

³Global Emission Inventory Activity (GEIA): <http://weather.engin.umich.edu/geia/>

Tabla 1: Biogenic molecules with transition bands within DARWIN window [5-20 μ m]. The estimated abundance needed to produce a signature detectable by Darwin in the spectrum and the current abundance in Earth's present atmosphere are indicated. The resolution required for detection is given in Fig.4. 1 ppm=10⁻⁶, 1 ppb=10⁻⁹. (lo) and (mi) refer respectively to the lower atmosphere, < 15 km, and mid to the middle or upper one, > 15 km.

species	bands (μ m)	minimum abundance	Earth abundance
CH ₄	7.5	10 ppm	2 ppm
NO	5.4	1 ppm	< 1 ppb (lo) 10 ppb (mi)
NO ₂	6.2	10-100 ppb	1 ppb (lo) 0.1 ppb (mi)
N ₂ O	17, 8.5, 7.8	1-10 ppm	0.3 ppm
NH ₃	11- 9, 6	1-10 ppm	0.01 ppb

duction was higher than today. The recent discovery of anaerobic methanotrophic organisms (using CH₄ as a source of carbon, Hinrichs et al., 1999) indicates that the climate before oxygenation was controlled by the combined action of methanogenic and the methanotrophic species.

The Earth could have exhibited a strong biological CH₄ signature during an important period of its existence (Schindler and Kasting, 2000). CH₄ could thus be quite an interesting biomarker, complementary to O₃, which could be indicative of primitive worlds and/or worlds which require a strong greenhouse effect that cannot be provided by CO₂. It is generally accepted that only a very small fraction of the CH₄ emitted into our present atmosphere comes from non-biological sources. This 'geothermal' fraction, lower than 0.04 % of the total production, is released by underwater hydrothermal systems. The abiotic formation process is believed to rely on the oxidation of iron by water that releases H₂ which, in the presence of CO₂ and under specific temperature and pressure conditions, gives CH₄ (Holm & Andersson 1998). On the other hand, some authors suggest that this abiotic CH₄ flow could have been more important in the past or could exist on other planets (Pavlov et al. 2000). Consequently, it is necessary to carry out the same type of study for CH₄ as for ozone in order to know whether the detection of a CH₄-rich terrestrial planetary atmosphere does imply the presence of an ecosystem. There is currently a controversy about the very low abundance of methane detected on Mars ($\sim 10^{-8}$, announced by Krasnoplosky at EGU2004) and its possible biologic origin. It is here important to note that the extremely low emission rate required to sustain such a low level (less than 10⁵ molecules s⁻¹ cm⁻²) can be provided by various non abiotic sources. The give one example: methane can be produced by current hydrothermal systems, or by ancient ones and now released by the erosion of an old clathrate reservoir.

Methane is also an abundant compound in the external and cold part of our Solar System: It is a major component of Titan's atmosphere and is part of the composition of giant gas planets. According to models (Prinn, 1993), the

carbon present in the protosolar nebula, before planet formation, was mainly in the form of CH₄ in the external region and in CO in its inner region. The limit beyond which CH₄ condenses, under the pressures and temperatures in this nebula, is at about 10 AU from the Sun, which explains why one finds CH₄ ice on Pluto, Triton, and Kuiper Belt objects. Cometary ices typically contain 0.5 - 1 % of CH₄ (Crovisier 1994) and a large fraction of their mass is made of organic matter. Comet impacts on a terrestrial planet could thus be a significant source of CH₄ (a part of which would be a by-product of the organic matter after the impact). 1% of the mass of a Hale-Bopp-sized comet converted into methane after an impact would result in an atmospheric level of CH₄ equal to the present terrestrial one. This confirms that, in the absence of more thorough study, it is not possible to consider CH₄ as a reliable biomarker.

Among the other components that have a direct or secondary biological origin, one finds several nitrogen compounds, mainly the nitrogen protoxide, N₂O, for which no significant abiotic source is known. N₂O is produced by bacteria (known as nitrifying and denitrifying) in the ground and oceans, at a rate of 10¹³ g/yr (GEIA, 2002). Its content in the atmosphere, although small (0.3 ppm), plays a major part in photochemistry. It is indeed the main source of nitrogen oxides (NO and NO₂) which are the main destructors of ozone in the middle and lower atmosphere. It is an optically very active gas in the infrared and, regarding the greenhouse effect, it is even more effective than CH₄, for a given mass. In a terrestrial thermal emission spectrum, the signature of N₂O at 7.8 μ m is detectable but a quantity at least 10 times larger would be needed to detect N₂O on an exoplanet with Darwin/TPF. It is especially difficult to state whether such quantities are realistic and if they could have occurred on the Earth, in the past, and particular before the rise of O₂.

Atmospheric N₂O is oxidized and photolysed in the upper atmosphere, where it produces NO and NO₂ which are themselves IR active compounds. However, the minimum quantities for the detection of these two gases are much higher than their current terrestrial abundance and it is considered that they can also be produced by abiotic sources related to lightning (especially in volcanic plumes, Navarro-Gonzalez, 1998) and impacts (Prinn and Fegley, 1987) at a rate larger that coming indirectly from the biosphere.

Another nitrogen compound is present at a trace level in our atmosphere: ammonia, produced by nitrogen fixing bacteria. NH₃ has an extremely short life time because of our current oxidizing environment but also because of its photolysis by UV. This explains its very low abundance (0.01 ppb) which is 2×10^5 times lower than that of CH₄, in spite of a production rate only 5 times weaker (7.5×10^{13} g/yr; GEIA, 2002). As for CH₄, there are abiotic sources of NH₃ in the outer Solar System. The necessary concentration for the detection of NH₃ (1-10 ppm) is so high that it would imply a large and continuous production source, which would be difficult to assign to an abiotic process. It is also not obvious that any ecosystem would be able to produce such quantities of NH₃.

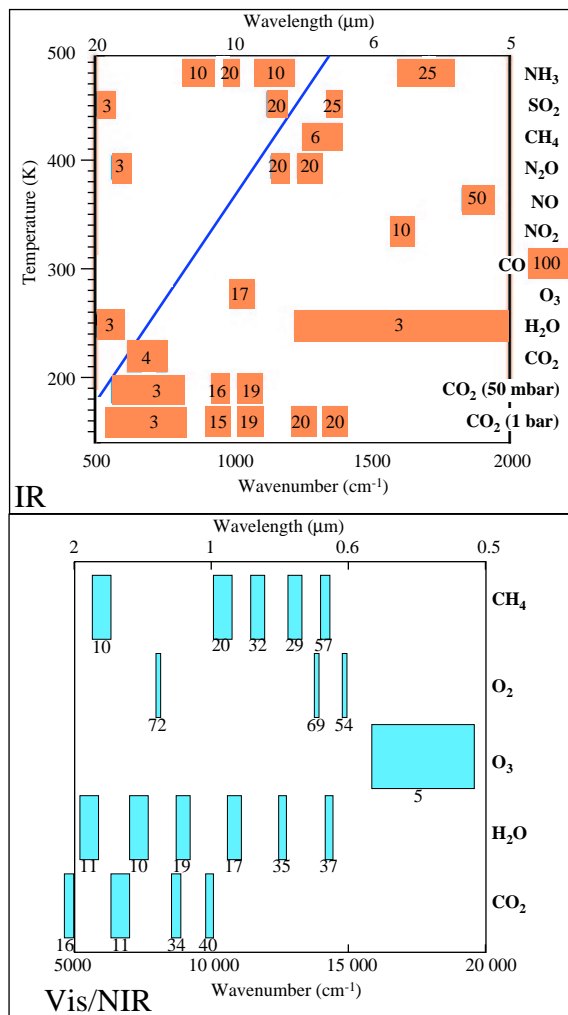


Fig. 4.: Potential spectroscopic signatures in the Mid-Infrared [5-20 μm] and in the Visible-Near-Infrared [0.5-2 μm] ranges. The resolution power ($\lambda/\Delta\lambda$) required for detection is indicated for each molecular feature. IR (mid-infrared, from Selsis, 2000): All these compounds are present (at least as trace gases) in present Earth's atmosphere though only CO₂, H₂O and O₃ are effectively detectable at low resolution. The detection of the other species would imply levels higher than their terrestrial values (see table 1). The level required for detection and the consequent width of the bands has been estimated from synthetic spectra computed for various abundances. One notes in the case of CO₂ that, even at low resolution, some quantitative information can be inferred. We also give the relation between the brightness temperature and λ_{max} , the wavelength at which Planck's law is maximal when expressed as the number of photons emitted per time unit and frequency (or wavelength) unit. VIS/NIR (visible/near-infrared, from Des Marais et al., 2002, and Ollivier, 2004): here, the minimum resolution required is for present atmospheric levels (absorption lines can be broader for higher abundance). One can see that near-infrared is required for CO₂ detection. The Chappuis band of O₃ is a very broad but faint feature that requires a high signal-to-noise ratio.

Temperature and radius of the planets

If the surface temperature of a planet does not directly reveal the presence of life, it can be a particularly useful data when combined with the composition of a possible atmosphere and to the orbital parameters of the planet. In the case of the Earth, it is striking to note that the surface temperature always remained within the reasonable "limits" for life (Crowley 1983) whereas the luminosity of the Sun has increased by approximately 40% since its formation (Baraffe et al. 1998; Guinan & Ribas 2002). The coldest times in the Earth's history are the 'Snowball Earth events' characterized by an ice cover down to the equator. At the beginning of these events, the runaway ice-albedo feedback makes the global mean temperature drop to $\approx 50^\circ\text{C}$ for a few tens of thousands years (Schrag et al. 2002). This temperature drop is followed by a period of a few million years during which the mean temperature is around 10°C . Snowball events occurred near the beginning (2.45 - 2.22 Gyr ago) and at the end (0.73-0.58 Gyros ago) of the Proterozoic. The most ancient low-latitude glaciations may be a consequence of the first release of biological oxygen (Selsis 2002). A description of the Neoproterozoic glacial events has recently been published by Ridgwell et al. (2003).

The hottest periods (for which we have no reliable geological records) may have occurred before the Proterozoic when the atmosphere was anoxic. Indeed, in the absence of an oxidizing atmosphere, the levels of atmospheric methane (produced by methanogens) could have been 100-1000 times higher than today, resulting in a strong greenhouse warming. It is difficult to estimate the surface temperature reached because the photolysis of methane also leads to the formation of Titan-like hazes that increase the albedo. However, mean surface temperature above 30°C are possible after the appearance of methanogenesis and before the rise of oxygen.

At the same time, the atmosphere underwent deep transformations. It is probable that the influence of life on the atmosphere and the volatile compounds produced by the geophysical cycles very strongly force this temperature within limits favourable to life. Is the propagation and the evolution of terrestrial life a consequence of favourable and random climatic conditions? Or do we have to consider the conditions on the Earth as the consequence of a 'homeostasis' linked to the biological activity and its consequences for the geophysics processes?

If it is difficult to answer this question today, the history of our planet seems to show that life played an important role in maintaining favourable, if not optimal, conditions. In particular, the biological genesis of methane probably counterbalanced the weak solar luminosity before the rise of atmospheric O₂ (Pavlov et al. 2000; Selsis 2002). Simultaneously with the information on the chemical composition of the atmosphere, it would be very interesting to gather information on the temperature in order to cumulate signs of life and signs of habitability. It is clear that ozone in the atmosphere of a planet whose surface is heated to 300°C can only be considered as being of biological origin with some difficulty.

What can we know, remotely, about the temperature of an exoplanet? This question is far from being easy. In theory, spectroscopy gives access to information on the temperature. The thermal profiles of the planets in the Solar System could thus be deduced from the structure of their spectra (obtained over a wide spectral range: UV, visible, infrared, radio). This however requires a spectral resolution and a sensitivity, which are well beyond the performance of an instrument of the Darwin/TPF type. The question must thus be adapted to the observational means which will initially be available. First, it is possible to deduce the flux of energy received at the measured orbital distance. This quantity has to be compared with the 1370 Wm^{-2} received by the Earth. This gives us, in fact, only little information on the real temperature range at the surface as the albedo can have any value between about 5% (ocean) and 80% (ice). Also, even if the assumed albedo is close to the real one, the surface temperature that may be enhanced by greenhouse gases and day-night variations remain unknown.

However, with a low resolution ($\lambda/\Delta\lambda > 10$) spectrum of the thermal emission, as shown in Fig. 1, the mean brightness temperature and the radius of the planet can be obtained by fitting the envelope of the thermal emission by a Planck function. The ability to retrieve the temperature relies on the existence and identification of spectral windows probing the same atmospheric levels or the surface (indicated by dashed arrows on the graph). Such identification faces some difficulties. For instance, a strong absorption by water, smoothed by a low resolution, may produce a Planck-like spectral shape and thus in a significant error in the temperature and the radius. There are however atmospheric windows that can be used in most of the cases, especially between 8 and 11 μm as seen in Fig. 4. The average brightness temperature of the Earth is generally a correct estimate of the average surface temperature, usually lowered by about 10K due to the contribution from the top of the clouds (this depends on the geometry of observations). On Venus and Mars, the brightness temperature gives respectively a good estimate of the atmospheric temperature respectively at 60 km and of the surface. In the case of Venus, Earth and Mars, three terrestrial planets with a dense atmosphere, does the black body temperature deduced from the emission spectra give a good approximation to the surface temperature? The answer is 'yes' in the case of Mars where the emitting surface is the planetary surface (see Fig. 1). However, it is difficult to define an average Martian temperature because the temperature varies with time and latitude. In the Earth's case, the total planetary spectrum is a mixture of surface and clouds emission, the latter occurring at lower temperature. The temperature given by the envelope of the spectrum is thus slightly lower than the average surface temperature. This temperature also depends on the observation geometry, as well as seasons. It can thus differ from the total average temperature of the Earth ($\approx 288 \text{ K}$). In the extreme case of Venus, the spectrum envelope gives a temperature of 277 K, to be compared to a surface temperature of 740 K. Observed in the mid infrared Venus could be considered as a habitable planet, with a mean temperature just above the triple point of water. The reason for this discrepancy comes from the

fact that the Venusian atmosphere is completely opaque below 60 km because of the permanent cloud cover and the absorption continuum, induced at high pressure, by CO_2 - CO_2 collisions. With low-resolution spectral observations, it is difficult to know, without ambiguity, if the lower atmosphere contributes or not to the spectrum and so, if the temperature reflects the surface conditions.

It should however be noted that the presence of a cloud layer, or more generally of an opaque atmosphere, does not prevent a deduction of the planet diameter starting from its thermal IR spectrum. The accuracy of the radius determination will depend on the quality of the fit (and thus on the sensitivity and resolution of the spectrum), the precision of the Sun-star distance (known with a precision of better than 2% for G and K stars within 20 pc of the Sun) and also the distribution of brightness temperatures over the planetary surface. Concerning the latter, we can consider a Lambertian sphere (like the Moon, Lawson et al., 2000) as a "worst case" exhibiting high temperature contrasts. In such a case, the inferred radius would be 10% smaller than the real one. However, in this case, and if the rotation period is not too fast too smooth the day-night contrast, the variation of the thermal flux with the phase would reveal the absence of atmosphere and the estimate could be readjusted. Thus, when the brightness temperature is stable along the orbit, the estimated radius is reliable to better than 10%. On the other hand, the reflected flux only allows one to infer the product $A \times R^2$ where A is the albedo and R the planetary radius. The first generation of optical instruments will be very far from the angular resolution required to directly measure an exoplanet radius. Such a measurement can nowadays be performed only if the planet passes in front of its parent star (this case is called 'transit'), by an accurate photometric technique. This is probably the main weakness of the characterization in the visible range. Indeed, the knowledge of the planetary radius is crucial for the general understanding of the physical and chemical processes occurring on the planet (tectonics, hydrogen loss to space).

Conclusion and other perspectives

In this paper, we considered the information given by low resolution ($\lambda/\Delta\lambda \sim 25$) mid-infrared spectral range (5-20 μm) spectra on the nature and the atmospheric composition of extrasolar planets, and particularly, telluric ones. Assuming earth-like biotic or at least comparable conditions, we reviewed potential biosignatures and detailed how they can be searched for. In particular, we showed that ozone, often considered as a biomarker can, if detected alone, lead to false detection of life. A more robust criterion of life can be found in the simultaneous detection of ozone, water, and carbon dioxide. More generally, we showed that the thermal IR spectral range is particularly well suited for the exo-planetology and the study of the exoplanets atmospheres. In addition to spectral features, the thermal IR spectral range can lead to important physical parameters such as the size and an estimation of the temperature of the planet. The development of space observatories aiming at detecting and

analyzing extrasolar planets should lead to strong breakthroughs in that scientific domain in a near future.

As exciting as the search for life signatures can be, it remains an uncertain objective, which is neither the single nor the first motivation for a mission such as Darwin/TPF. These observatories will be wonderful tools for the study of terrestrial planets, their atmosphere, their formation and their evolution. To do planetary science with Darwin/TPF is also essential for astrobiology because this should bring many elements improving our knowledge of terrestrial planets and possible sites for life. We should in particular get clues to answer the following question: are our planetary system and our planet common objects in the Universe or on the contrary extremely marginal?

First of all, the existence itself of terrestrial planets in the habitable zone of stars is considered by planetary formation models but cannot be confirmed with our current observation tools. The first major element will thus be the statistical information on the distribution of these small planets. On this point, other space observatories should give us information before Darwin; first COROT, then Kepler mission, based on planetary transits observation should have the sensitivity to detect Earth-sized planets. Contrary to these other missions, Darwin/TPF will give us this information for nearby systems ($< 10 pc$ approximately) for which we have access to complementary data concerning the presence or not of giant planets, right now detectable by the radial velocity method. The influence of giant planets on the habitability of internal planets is not yet well known but probably important, regarding the formation of internal telluric planets itself, the origin of water and the volatile compounds on these planets, the bombardment of these planets by asteroids or comets (Levison & Agnor 2003; Raymond et al. 2004).

For each studied system, the observed properties of internal planets (such as their distribution, mass, orbit, the presence or not of an atmosphere, its chemical composition), confronted with the properties of giant planets of the system, will give us precious clues about the origin, the formation and the evolution of the planetary systems, the atmospheres and perhaps life. Such an instrument would also inform us considerably about the concept of habitable zone: are these zones filled with planets as in the Solar System? Do these planets have atmospheres? And if yes what are their composition? Is CO_2 the only greenhouse gas that proves to provide habitability (any efficient greenhouse gas produces detectable features in the thermal emission spectrum)? How do the characteristics of these planets vary with the spectral type and the metallicity of their star, the distribution of giant planets or the age of the system?

The prospect of being able to observe very young planetary systems (less than 0.5-1 Gyr) is very interesting. The atmospheres of the Solar System planets have evolved and differ from their primitive composition. The nature of the prebiotic environment on Earth is probably one of the keys to understand the origins of life. However, it is possible that only the observation of young exoplanets could bring part of the answer.

χ^1 Ori is a G1V star located at 8.7 pc from the Earth, comparable or at least, very similar to the Sun (Guinan and Ribas, 2002); its mass is $0.99 M_{Sun}$ and its age is estimated at 300 Myr. At the same age, the Earth had already oceans (Wilde et al. 2001) and an atmosphere, of unknown composition. Exposed to an intense bombardment, was life able to appear and evolve?. Does χ^1 Ori have planets? If so, what are they made of? An instrument such as Darwin/TPF could maybe shed light on these points, providing us with a detailed movie of the evolution of the terrestrial planets and their atmospheres.

*

Referencias

- Arnold, L., Gillet, S., Lardi re, O., Riaud, P., & Schneider, J. 2002, *A&A*, 392, 231
- Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F., & Hauschildt, P. 1998, *A&A*, 337, 403
- Beichman, C. A., Woolf, N. J., & Lindensmith, C. A., eds. 1999, *The Terrestrial Planet Finder (TPF): a NASA Origins program to search for habitable planets (JPL Publications)*
- Bekker, A., Holland, H. D., Wang, P.-L., et al. 2004, *Nature*, 427, 117
- Borucki, W. J., Koch, D. G., Dunham, E. W., & Jenkins, J. M. 1997, in *ASP Conf. Ser. 119: Planets Beyond the solar system and the Next Generation of Space Missions*, 153
- Bracewell, R. N. 1978, *Nature*, 274, 780
- Brocks, J. J., Logan, G. A. and Buick, R., & Summons R., E. 1999, *Science*, 285, 1033
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. 2000, *ApJ*, 529, L45
- Charbonneau, D., Brown, T. M., Noyes, R. W., & Gilliland, R. L. 2002, *ApJ*, 568, 377
- Crovisier, J. 1994, in *IAU Symp. 160: Asteroids, Comets, Meteors 1993*, Vol. 160, 313–326
- Crowley, T. J. 1983, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 21, 828
- Des Marais, D. J., Harwit, M. O., Jucks, K. W., et al. 2002, *Astrobiology*, 2, 153
- Guinan, E. & Ribas, I. 2002, in *ASP Conf. Series*, vol. 269, 85–106
- Hall, D. T., Strobel, D. F., Feldman, P. D., McGrath, M. A., & Weaver, H. A. 1995, *Nature*, 373, 677
- Hinrichs, K.-U., Hayes, J. M., Sylva, S. P., Brewert, P. G., & Delong, E. F. 1999, *Nature*, 398, 802

- Holm, N. G. & Andersson, E. M. 1998, *The molecular origins of life* (Cambridge Univ. Press), 86–99
- Johnson, R. E. & Jessor, W. A. 1997, *ApJ*, 480, L79
- Joshi, M. M., Haberle, R. M., & Reynolds, R. T. 1997, *Icarus*, 129, 450
- Kasting, J. F. 1988, *Icarus*, 74, 472
- Kasting, J. F. 1995, *P&SS*, 43, 11
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P., & Reynolds, R. T. 1993, *Icarus*, 101, 108
- Lawson, S. L., Jakosky, B. M., Park, H., & Mellon, M. T. 2000, *JGR*, 105, 4273
- Léger, A., Mariotti, J. M., Mennesson, B., et al. 1996, *Icarus*, 123, 249
- Léger, A., Ollivier, M., Altwegg, K., & Woolf, N. J. 1999, *A&A*, 341, 304
- Léger, A., Pirre, M., & Marceau, F. J. 1993, *A&A*, 277, 309
- Léger, A., Selsis, F., Sotin, C., et al. 2004, *Icarus*, 169, 499
- Levison, H. F. & Agnor, C. 2003, *AJ*, 125, 2692
- Mayor, M. & Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355
- Nair, H., Allen, M., Anbar, A. D., Yung, Y. L., & Clancy, R. T. 1994, *Icarus*, 111, 124
- Navarro-Gonzalez, R., Molina, M. J., & Molina, L. T. 1998, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3123
- Noll, K. S., Johnson, R. E., Lane, A. L., Domingue, D. L., & Weaver, H. A. 1996, *Science*, 273, 341
- Noll, K. S., Roush, T. L., Cruikshank, D. P., Johnson, R. E., & Pendleton, Y. J. 1997, *Nature*, 388, 45
- Ollivier, M. 1999, PhD thesis, Université de Paris XI
- Ollivier, M. 2004, in *Proceedings of IAP Colloquium "Extrasolar Planets: Today and Tomorrow"*, ASP Conf. Series, in press
- Owen, T. 1980, in *Strategies for the search for life in the Universe*, ed. M. Papagiannis (Reidel)
- Pavlov, A. A., Kasting, J. F., Brown, L. L., Rages, K. A., & Freedman, R. 2000, *JGR*, 105, 11981
- Prinn, R. G. & Fegley, B. 1987, *Earth and Planetary Science Letters*, 83, 1
- Raymond, S. N., Quinn, T. R., & Lunine, J. I. 2004, *Icarus*, 168, 1
- Ridgwell, A. J., Kennedy, M. J., & Caldeira, K. 2003, *Science*, 302, 859
- Rosenqvist, J. & Chassefiere, E. 1995, *P&SS*, 43, 3
- Rouan, D., Baglin, A., Copet, E., et al. 1998, *EM&P*, 81, 79
- Sagan, C., Thompson, W. R., Carlson, R., Gurnett, D., & Hord, C. 1993, *Nature*, 365, 715
- Schindler, T. L. & Kasting, J. F. 2000, *Icarus*, 145, 262
- Schrag, D. P., Berner, R. A., Hoffman, P. F., & Halverson, G. P. 2002, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 1
- Selsis, F. 2000, PhD thesis, Université de Bordeaux I, available at anonymous server alienor.observ.u-bordeaux.fr/pub/selsis/selsis.pdf
- Selsis, F. 2002, *ASP Conf. Series*, vol 269, 273
- Selsis, F., Despois, D., & Parisot, J.-P. 2002, *A&A*, 388, 985
- Vidal-Madjar, A., Lecavelier des Etangs, A., Désert, J.-M., et al. 2004, *Nature*, 422, 143
- Volonte, S., Laurance, R., Whitcomb, G., et al. 2000, *Darwin: the Infrared space interferometer*, Tech. rep., ESA
- Walker, J. C. G. 1977, *Evolution of the atmosphere* (New York: Macmillan)
- Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H., & Graham, C. M. 2001, *Nature*, 409, 175
- Williams, D. M., Kasting, J. F., & Wade, R. A. 1997, *Nature*, 385, 234
- Wolszczan, A. & Frail, D. A. 1992, *Nature*, 355, 145
- Woolf, N. J., Smith, P. S., Traub, W. A., & Jucks, K. W. 2002, *ApJ*, 774, 430
-

TESIS DOCTORALES

Análisis sismológico de las estrellas pulsantes tipo Delta Scuti del cúmulo de las Pléyades

Lester Fox Machado

lfox@iac.es

Director/es: Fernando Pérez Hernández (IAC-ULL) y Eric Michel(OPM)

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Lectura: 26 de marzo de 2004

El análisis sismológico de las estrellas tipo δ Scuti nos proporciona información sobre la estructura de las estrellas de masa intermedia (entre 1.5 y $2.5 M_{\odot}$). Estas estrellas variables son candidatas idóneas para investigar algunos de los procesos hidrodinámicos poco entendidos en la actualidad que ocurren en el interior de las estrellas. Además, la aplicación de la sismología estelar a objetos pulsantes pertenecientes a un cúmulo abierto cercano facilita el estudio, dado que en este caso se puede considerar que todas las estrellas tienen aproximadamente la misma edad, composición química y distancia. Adicionalmente, parámetros como la metalicidad o distancia se pueden estimar mejor para las estrellas de un cúmulo que para las estrellas de campo.

En esta Tesis Doctoral hemos estudiado una muestra de seis estrellas tipo δ Scuti pertenecientes al cúmulo de las Pléyades observadas por medio de la red observacional STEPHI (*STellar PHotometry International*, Michel et al. 1995) a través de tres campañas multisitio, de las cuales dos fueron realizadas durante el desarrollo de este trabajo (Fox-Machado et al. 2002, Li et al. 2004). Dicha muestra consta de V650 Tau, V647 Tau, V534 Tau, HD 23628, V624 Tau y HD 23194.

En el aspecto observacional de la tesis presentamos las técnicas de adquisición, reducción y análisis de los datos obtenidos durante las campañas de observación. Dicho análisis nos permitió obtener información precisa de las frecuencias de oscilación de las últimas cinco estrellas, una de las cuales era considerada estrella no variable hasta nuestras observaciones. Las frecuencias de oscilación de los espectros de amplitudes de las series temporales se calcularon mediante el ajuste iterativo de senos más blanqueado (Ponman 1981) y el programa PERIOD98 (Sperl 1998). Un total de 29 modos de oscilación fueron detectados en nuestra muestra con un nivel de significación superior al 99% (véase por ejemplo la Fig. 1).

En el aspecto teórico de la tesis se presenta la modelización de las seis estrellas problema. Hemos mejorado el análisis teórico incluyendo de forma adecuada el efecto de la rotación tanto sobre los modelos estelares como sobre las frecuencias de oscilación, con el objetivo de obtener una descripción más realista de la estructura estelar. Las frecuencias teóricas de oscilación se calcularon incluyendo el efecto de segundo orden en la rotación a partir de modelos rotantes, ajustándose éstos a los parámetros observacionales más relevantes del cúmulo y de cada estrella como son la metalicidad, distancia, edad y velocidad de rota-

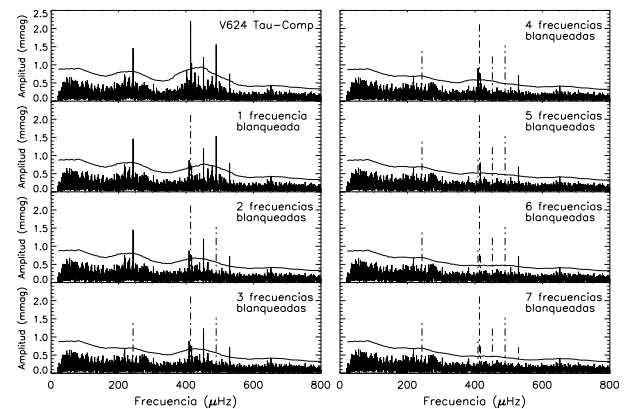


Fig. 1.: Espectro de amplitudes y proceso de blanqueado de los modos de oscilación presentes en la serie temporal V624 Tau—Comp. En cada paso se escoge un pico por encima del nivel de significación del 99% (línea continua) y se sustrae de la serie temporal, obteniéndose un nuevo espectro. De esta forma, se detectaron siete modos de oscilación por encima de este nivel en la estrella V624 Tau (líneas de puntos y trazos).

ción. Los modelos sísmicos fueron agrupados en conjuntos de seis, uno por estrella, de igual distancia, edad, metalicidad y sobrepenetración convectiva. Aplicamos interpolaciones entre las frecuencias teóricas de oscilación, ν_{cal} , según las velocidades angulares de rotación, Ω_{rot} , para cubrir el intervalo de velocidades de rotación estimado para cada modelo estelar. Hemos comparado las frecuencias observacionales y las teóricas para cada Ω_{rot} interpolada mediante ajustes tipo χ^2 . La mejor solución la encontramos con la minimización de esta magnitud. Hemos restringido las posibles soluciones considerando que los factores de visibilidad de los modos de oscilación dependen en gran parte del ángulo de inclinación entre el eje de rotación estelar y la visual. Como resultado hemos encontrado las posibles identificaciones de los modos de oscilación de las estrellas problema, que indican una metalicidad del cúmulo de $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0668$ ($Z \sim 0.02$, $Y \sim 0.28$), con un módulo distancia $m_V - M_V = 5.60 - 5.70$ y para una edad de $70 \times 10^6 - 100 \times 10^6$ años. Todas las estrellas parecen oscilar con modos p , radiales y no radiales, de orden bajo.

En el marco del presente análisis teórico hemos concluido que una metalicidad subsolar con contenido alto en He es poco probable en el cúmulo de las Pléyades, en contraste con algunas sugerencias hechas por otros investigadores.

Estudio de las componentes galácticas en el entorno solar

Eduard Masana Fresno emasana@am.ub.es

Director/es: Carme Jordi i Nebot

Centro: Universitat de Barcelona

Lectura: 16 de julio de 2004

En el entorno solar encontramos estrellas de características físicas muy diferentes, pertenecientes a dos de las componentes estelares que forman la Galaxia: el disco (delgado y grueso) y el halo. Los datos astrométricos del catálogo *Hipparcos* de estrellas enanas FGK combinados con la fotometría infrarroja del catálogo *2MASS* han permitido la determinación de los parámetros (cinemática, metalicidad, edad y luminosidad) de cada una de estas componentes en el entorno solar y establecer las posibles dependencias de estos parámetros con la temperatura y/o la metalicidad. En todo el proceso se ha puesto especial atención al correcto tratamiento de los errores y sesgos observacionales que se hayan podido introducir en la selección de las estrellas que forman nuestra muestra.

La muestra construida contiene más de 11000 estrellas con datos astrométricos del catálogo *Hipparcos*, medidas de la velocidad radial (en un 20% de los casos) y fotometría en las bandas *BV* del visible y *JHK* del infrarrojo, además de los colores del sistema Strömgen. Parte de esta fotometría se obtuvo en diversas campañas observacionales llevadas a cabo en el telescopio del OAN del Observatorio de Calar Alto y en el Telescopio Carlos Sánchez del Observatorio del Teide. La fotometría se utilizó para obtener algunos de los parámetros físicos de las estrellas (metalicidad, gravedad superficial, temperatura) y una estimación del enrojecimiento estelar.

Para la determinación de la temperatura se ha utilizado la fotometría en las bandas *VJHK*. El método que hemos desarrollado se basa en la comparación entre la fotometría observada y la fotometría sintética calculada para cada una de estas bandas a partir de los modelos de atmósferas estelares. El método, aplicable a estrellas entre los 4000 K y los 8000 K, proporciona la temperatura y el semidiámetro angular, con unos errores estimados del orden del 1.5% y 2%, respectivamente. La aplicación del método a las 11000 estrellas de la muestra permite establecer una calibración de la temperatura en función del color $(V - K)_0$ y de la metalicidad, con una dispersión de 20 K. A partir de la temperatura y el semidiámetro angular se han calculado también las correcciones bolométricas en las bandas *V* y K_{2MASS} y establecido calibraciones en función de los mismos parámetros que en el caso de la temperatura. En este caso las dispersiones obtenidas son de 0.005 magnitudes.

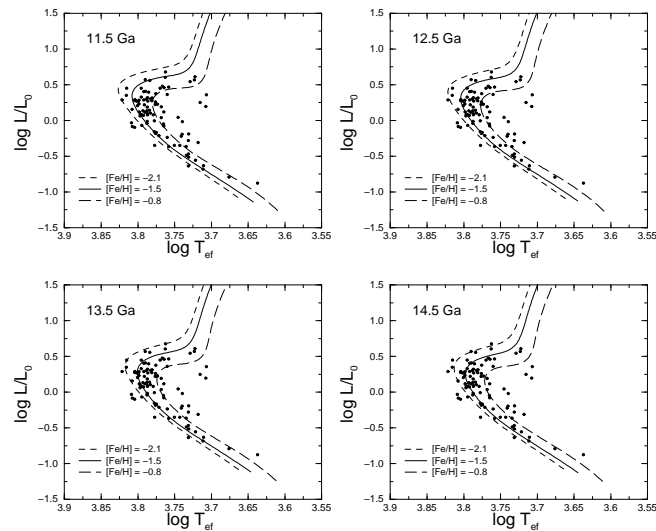


Fig. 1: Ajuste a las estrellas pertenecientes al halo incluidas en la muestra del conjunto de isócronas teóricas de Bergbusch y Vandenberg (2001, *ApJ*, 556, 322) para edades entre los 11.5 y los 14.5 Ga. Se ha considerado $[\alpha/Fe] = 0.3$ y tres metalicidades correspondientes aproximadamente a $[Fe/H]$ y $[Fe/H] \pm \sigma$, siendo $[Fe/H] = -1.51$ la metalicidad promedio obtenida para el halo y $\sigma = 0.58$ su dispersión.

La muestra se supuso formada por estrellas pertenecientes al disco delgado, disco grueso o halo. Las propiedades de cada una de estas componentes se obtuvieron a través del ajuste por máxima verosimilitud de un modelo de la muestra que incluía, además de las características físicas de la población de la cual ha sido extraída la muestra, los procesos de selección y los errores observacionales. Ello proporcionó los valores medios de la cinemática y metalicidad de cada componente galáctica, una calibración de su magnitud absoluta en función del color $(V - K)_0$ y una estimación (corregida de sesgos observacionales) de la distancia individual a cada estrella. Las edades de cada componente fueron estimadas mediante el ajuste de isócronas teóricas en el diagrama HR, utilizando en el eje de luminosidades una determinación no sesgada de la misma calculada a partir de la distancia corregida de sesgos y de la corrección bolométrica.

Los resultados obtenidos muestran un halo con una edad de entre 12.5 y 13.5 Ga y metalicidad promedio $[Fe/H] = -1.5$; un disco grueso con una edad entre 10 y 12 Ga y $[Fe/H] = -0.63$, y un disco delgado que ha sido dividido en dos subcomponentes jóvenes (edad inferior a 10 Ga), ambas de metalicidad solar pero con cinemática algo diferente, y una componente ligeramente más vieja y menos metálica que las anteriores. Por su parte los valores de la cinemática, en buen acuerdo con trabajos recientes basados también en datos *Hipparcos*, indican la existencia de una relación de ésta con la edad y la metalicidad.

La tasa de formación estelar del Universo a $z=0.24$ y $z=0.4$ a partir de $H\alpha$

Sergio Pascual Ramírez spr@astrax.fis.ucm.es

Director/es: Jesús Gallego Maestro y Jaime Zamorano Calvo

Centro: Departamento de Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid

Lectura: 9 de julio de 2004

El objetivo principal de esta tesis es extender la exploración de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) de galaxias con formación estelar. Este objetivo está profundamente conectado con el estudio de historia de la formación estelar en el Universo.

El problema que surge al intentar obtener una imagen homogénea de la historia de la formación estelar es que las diversas muestras de galaxias se seleccionan con criterios distintos y además se usan distintos trazadores de la tasa de formación estelar (SFR). La extensión de la exploración a mayores desplazamientos hacia el rojo permite una comparación directa de la SFR entre las dos exploraciones.

Para realizar una exploración similar a la exploración UCM, en la que los objetos son seleccionados por su línea de emisión $H\alpha$ mediante el procedimiento del prisma-objetivo, se utiliza la técnica de los filtros estrechos. La longitud de onda central de los filtros utilizados coincide con dos ventanas en el espectro de emisión del cielo nocturno, en 8200 Å y 9200 Å, que para la línea $H\alpha$ corresponde a $z=0.24$ y $z=0.4$. La exploración mediante filtros estrechos está abierta a líneas de emisión a mayores desplazamientos hacia el rojo. En el caso del filtro a 8200 Å, [OII] λ 3727 a $z=1.2$ y [OIII] λ 5007 a $z=0.6$ y en el del filtro a 9200 Å, [OII] λ 3727 a $z=1.5$ y [OIII] λ 5007 a $z=0.8$.

En la tesis se estudió en detalle el proceso de selección de objetos mediante filtros estrechos y cómo obtener el flujo y anchura equivalente de la línea de emisión a partir de las magnitudes en la banda estrecha y en una banda ancha de comparación. También se desarrolló una herramienta que permite la simulación de imágenes de banda ancha y estrecha, lo que constituye una ayuda inestimable a la hora de diseñar filtros estrechos para futuras exploraciones.

En el observatorio de Calar Alto se realizaron observaciones con un filtro estrecho centrado a 8200 Å de los campos ELAIS-N1 y SA114 en el instrumento CAFOS, mientras que en el observatorio de La Palma, utilizando la cámara de gran campo del telescopio INT y los filtros de 8200 y 9200 Å se observaron los campos ELAIS-N1, SA114 y SA95. Los candidatos se seleccionaron utilizando una herramienta diseñada específicamente. Parte de los candidatos eran estrellas, lo que se tuvo en cuenta utilizando uno de los parámetros de salida de *SExtractor*, que es un índice de “estelaridad”. Se tuvo en cuenta la contaminación por galaxias con línea de emisión a mayores desplazamientos hacia el rojo mediante el método analítico de Jones & Bland-Hawthorn (2001)

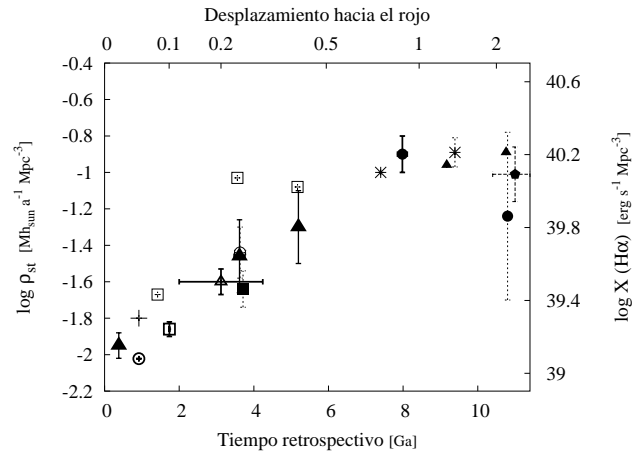


Fig. 2.: Evolución de la densidad de tasa de formación estelar en función del tiempo retrospectivo, utilizando como trazador de SFR la línea $H\alpha$. Los puntos obtenidos en la tesis se encuentran a $z=0.24$ y $z=0.4$ marcados como triángulos sólidos.

A partir de las muestras se construye la función de luminosidad, teniendo en cuenta la corrección por contaminación, y se obtiene la densidad de tasa de formación estelar. Cuando se compara los resultados con el valor local de la exploración UCM se obtiene una evolución $\propto (1+z)^\beta$, con $\beta = 4.1 \pm 0.1$, compatible con una evolución intensa de la densidad de tasa de formación estelar (figura 1).

Conocida la evolución de la SFR, se estudió también la naturaleza de las galaxias responsables de la formación estelar. Este estudio se realizó mediante dos métodos alternativos: desplazamientos hacia el rojo fotométricos y espectroscopía. Para una fracción de la muestra obtenida con el filtro de 8200 Å se disponía de colores *Ugriz* del *Wide Field Survey*, lo que permitió obtener su desplazamiento hacia el rojo fotométrico utilizando *hyperz* (Bolzonella *et al.* 2000). Se encontraron también contaminantes a mayor z , en un número mucho mayor al previsto inicialmente mediante el método analítico.

Se comenzó la confirmación espectroscópica de la submuestra analizada mediante desplazamientos hacia el rojo fotométricos, lo que permitió confirmar el 60% de los emisores $H\alpha$. Se confirmaron también dos emisores [OIII] λ 5007 a $z=0.6$. La contaminación por objetos a mayor desplazamiento hacia el rojo no era tan grande como la prevista por los desplazamientos hacia el rojo fotométricos, pero sí mucho mayor que la calculada por el método analítico. El estudio mediante diagramas de diagnóstico y curvas de rotación de las galaxias con emisión $H\alpha$ a $z=0.24$ permitió concluir que son de naturaleza muy similar a las galaxias del Universo local seleccionadas por su línea de emisión.

Stellar evolution in the post-AGB stage

Olga Suárez Fernández olga@laeff.esa.es

Director/es: Minia Manteiga y Pedro García Lario

Centro: Universidad de Vigo

Lectura: 28 de mayo de 2004

En esta tesis se presenta un estudio de las estrellas en la etapa evolutiva posterior a la Rama Asintótica de Gigantes, que llamaremos post-AGB según sus siglas en inglés (*post-Asymptotic Giant Branch*). Con este objetivo se ha llevado a cabo una búsqueda observacional de estrellas en esta fase evolutiva, lo que ha dado como resultado un catálogo de espectroscopía óptica en el que se recogen 255 objetos, de los cuales 203 son estrellas post-AGB o nebulosas planetarias (PN, de las siglas en inglés *Planetary Nebula*). Este catálogo es el producto de 15 años de observaciones realizadas por nuestro grupo, siguiendo criterios de selección basados en valores límites de las densidades de flujo en las bandas fotométricas del satélite IRAS.

Los objetos observados han sido clasificados en tipos espectrales, siempre que fue posible. En el caso de las nebulosas planetarias y de los objetos de transición, han sido calculadas sus clases de excitación.

Como resultado de estas observaciones hemos obtenido la muestra más extensa y completa existente hasta el momento de objetos en la etapa evolutiva post-AGB con clasificaciones espectrales. Esto nos ha permitido realizar estudios estadísticos acerca de las propiedades físicas de las estrellas en estas etapas tardías de evolución.

En particular, se ha obtenido la distribución espectral de energía (SED, según sus iniciales en inglés) de todas las estrellas de la muestra pertenecientes a las etapas de nuestro interés, con el fin de estudiar de forma conjunta las propiedades y evolución de la envoltura circunestelar y de la estrella central.

Estas SEDs han sido clasificadas en cinco grupos (I, II, III, IV a y IVb) de acuerdo a los criterios definidos en van der Veen et al. (1989, *A&A* 226, 108), que fueron caracterizados mediante el estudio de la latitud galáctica, el tipo espectral, la química dominante y la posición en el diagrama color-color IRAS de los objetos que pertenecen a cada uno de ellos.

Para completar la caracterización y determinar el estado evolutivo de las estas estrellas según su tipo de SED, se hizo una comparación entre la distribución de los tipos espectrales encontrados para cada clase de SED y la distribución predicha por modelos evolutivos. Esta comparación corroboró los resultados obtenidos utilizando la distribución en latitud galáctica, y la posición de las estrellas en el diagrama color-color, que se detallan a continuación.

A partir de los resultados obtenidos se puede establecer una conexión evolutiva entre las clases de SED I y II. Ambas clases están dominadas completamente por la emisión en el infrarrojo, y presentan contrapartidas ópticas fuertemente enrojecidas. La clase II parece representar un estado evolutivo ligeramente más avanzado que la clase I. En estas

dos clases se encuentran objetos que aún después de abandonar la fase AGB, presentan una significativa pérdida de masa post-AGB.

La clase III se encuentra distribuida en el diagrama color-color IRAS sin ocupar ninguna posición característica. Su distribución espectral continúa dominada por la emisión infrarroja, aunque la estrella central ya comienza a ser claramente visible. Estudiando la distribución en latitud galáctica y los tipos espectrales de las estrellas de esta clase, deducimos que se trata de una clase formada por objetos masivos, pero que no están sufriendo pérdida de masa significativa en la etapa post-AGB.

La distribución espectral de las clases IVa y IVb muestra claramente dos máximos, uno en el óptico correspondiente a la estrella central, y otro en el infrarrojo, correspondiente a la envoltura. La clase IVa, contiene estrellas de baja masa, cuya lenta evolución justifica que ocupen posiciones variadas en el diagrama color-color, sin favorecer una distribución determinada, al igual que ocurre con la clase IVb. Sin embargo, en la clase IVb se observa un mayor número de objetos y una mayor dispersión galáctica, lo que sugiere que se trata de una clase *término*, en la que acabarán objetos de masas distintas al final de su evolución. En esta clase se pueden encontrar objetos de masas relativamente altas que ya han evolucionado lo suficiente para mostrar dos máximos en su distribución espectral, y objetos poco masivos cuya envoltura nunca ha llegado a oscurecer la estrella central.

Este estudio demuestra una vez más la conveniencia de disponer de información en varias longitudes de onda para poder caracterizar la evolución de las estrellas en la fase post-AGB. La posición de uno de estos objetos en el diagrama color-color IRAS, no determina de forma unívoca su momento evolutivo. Es necesario conocer datos acerca de su distribución espectral de energía, y combinar esta información con datos espectroscópicos en el óptico para poder determinar su naturaleza post-AGB, su estado evolutivo y una estimación de la masa inicial de la estrella progenitora.

En esta tesis también se ha llevado a cabo un estudio sobre la clasificación de espectros mediante técnicas de inteligencia artificial en colaboración con miembros del Departamento de Tecnologías de la Información y de las Comunicaciones de la Universidade da Coruña. En concreto, se ha desarrollado un sistema experto que permite la clasificación automática de espectros de catálogos estelares con un alto grado de fiabilidad. También han sido probados varios grupos de redes neuronales que han demostrado su eficiencia en la clasificación espectral de librerías de espectros estándar.

Supergigantes B en la Vía Láctea y galaxias cercanas: modelos y espectroscopía cuantitativa

Miguel A. Urbaneja Pérez maup@iac.es

Director/es: Artemio Herrero Davó

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Lectura: 20 de abril de 2004

A pesar de lo escaso de su número frente a las estrellas de tipo solar, las estrellas azules luminosas tienen un papel preponderante en la evolución de las galaxias que las albergan y, por tanto, en la del propio Universo. Estas estrellas son las responsables principales del depósito de material, nuclearmente procesado o no, así como de energía, mecánica y radiativa, en el medio interestelar circundante. Progenitores de las supernovas de tipo II, son los candidatos principales para explicar los eventos más energéticos conocidos en el Universo: las explosiones de rayos gamma. Gracias a su alta luminosidad, las estrellas supergigantes de tipo B pueden detectarse individualmente incluso a las distancias a las que se encuentran las galaxias de los cúmulos de Virgo y Coma. Esta alta luminosidad produce efectos drásticos en la estructura, arrancando material de las capas externas de la estrella, y en la evolución de la estrella.

El análisis espectroscópico detallado de las atmósferas de estrellas de tipo supergigante B proporciona información en cuatro campos: la estructura de la atmósfera estelar y sus procesos físicos, la evolución estelar, la evolución química de galaxias y la determinación de distancias en el Universo local.

En la primera parte de la presente tesis, presentamos el trabajo realizado para la introducción en los análisis de la última generación de modelos de atmósferas de estrellas tempranas (modelos en no-ETL que consideran consistentemente los efectos de la pérdida de masa y extensión de la atmósfera así como del *blanketing/blocking* producidos por cientos de miles de líneas metálicas en la región UV). La herramienta para la generación de dichos modelos es el código atmosférico y de síntesis espectral *FASTWIND* (Santolaya-Rey, Puls & Herrero 1997; Puls et al. 2003). La aplicación de estos modelos así como el uso de una metodología de análisis que considera de forma consistente los efectos de la pérdida de masa, extensión atmosférica y efectos de *blanketing/blocking* supone un salto cualitativo en la técnicas de análisis usadas hasta la fecha. La segunda parte del trabajo, basada en el análisis de espectros ópticos y UV obtenidos con los más potentes y modernos telescopios (HST, WHT, VLT y Keck), persigue los siguientes objetivos primarios: (i) determinación de las abundancias químicas (He, C, N, O, Mg y Si) de cada una de las estrellas y comparación con las predicciones de los modelos de evolución estelar, (ii) gradientes radiales de abundancias en el disco de las galaxias espirales cercanas, en el Grupo Local (M33) y más allá del mismo (NGC 300), y, (iii) análisis de espectros de baja resolución para explotar las propiedades físicas de las supergigantes B y las capacidades de la instrumentación multiobjeto,

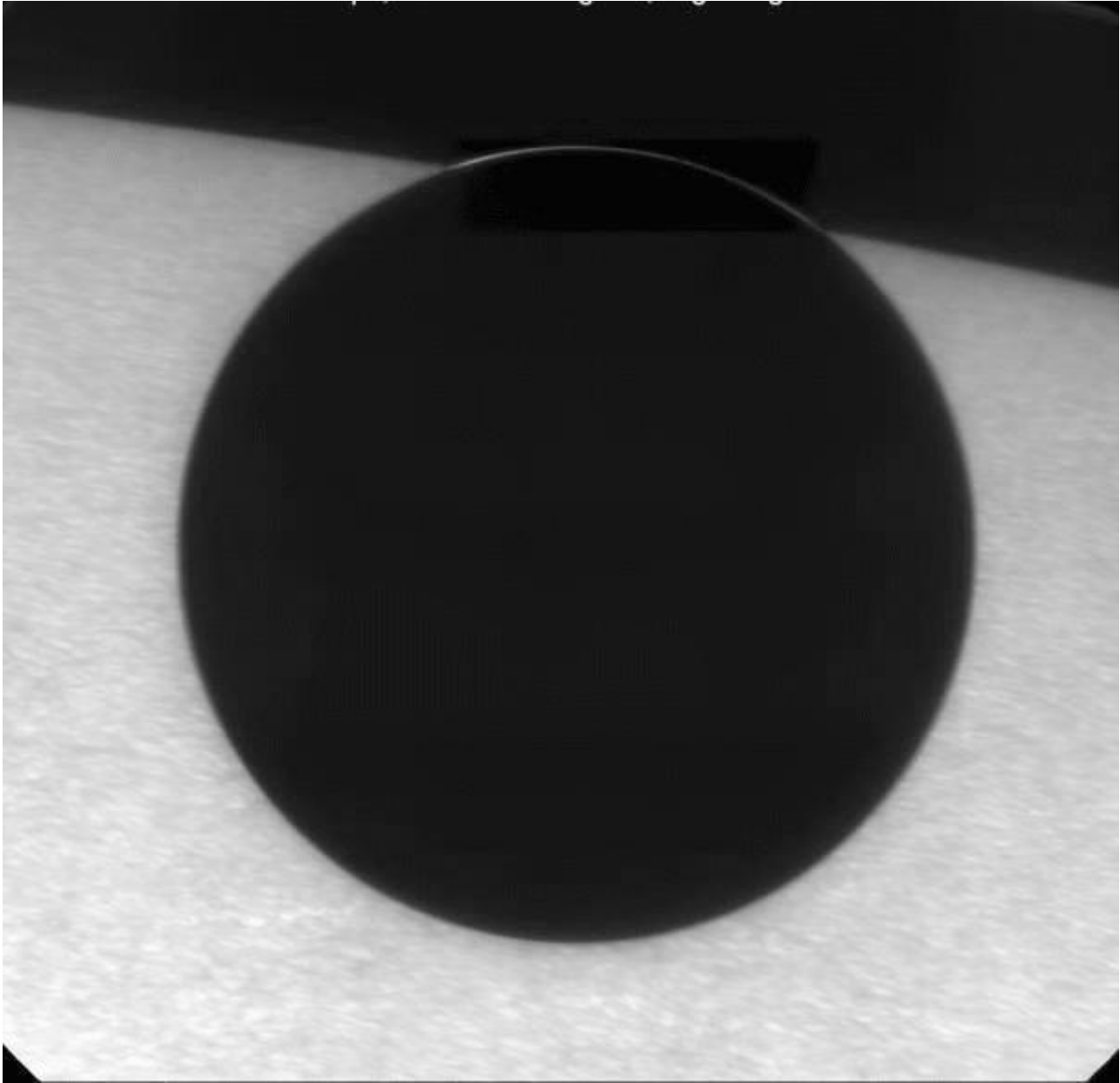
con el fin de analizar estrellas cuyas galaxias huéspedes se encuentran fuera del Grupo Local. Los análisis en M33 suponen el trabajo más completo hasta la fecha más allá de las Nubes de Magallanes, mientras que los análisis en NGC 300 representan el primer estudio cuantitativo de una muestra de estrellas más allá del Grupo Local de galaxias. A continuación resumimos los principales resultados que se desprenden del presente trabajo.

Evolución de estrellas masivas: hemos analizado una muestra de aproximadamente 30 Sgs B, con tipos espectrales comprendidos entre B0 y B3, pertenecientes a tres galaxias espirales distintas: la Vía Láctea, M33 y NGC 300. Localizada en un diagrama HR, esta muestra se sitúa mayoritariamente en una región más allá de la SP definida por las trazas evolutivas de recientes modelos teóricos de evolución que consideran los efectos de la pérdida de masa y la rotación. Aunque las estrellas muestran diferentes grados de evolución química, las razones derivadas de N/O son sistemáticamente más bajas que las predichas por los modelos, y este hecho es independiente de la metalicidad inicial de la estrella. Además, las estrellas de menor metalicidad inicial parecen presentar un mayor grado de enriquecimiento en sus abundancias superficiales de N. Tan solo una de las estrellas muestra un elevado grado de evolución en su razón de N/O. Las masas que derivamos espectroscópicamente son sistemáticamente más bajas que las predichas por las trazas evolutivas. La principal conclusión es que los resultados son mejor reproducidos si las estrellas, salvo la que muestra N/O alto, están evolucionando directamente desde la SP.

Gradientes de abundancias en galaxias espirales: a partir de los análisis estelares, derivamos los gradientes radiales de abundancias de oxígeno para dos galaxias espirales, M33 y NGC 300, obteniendo resultados muy similares para ambas: $-0.06 \pm 0.01 \text{ dex kpc}^{-1}$ para M33 y encontramos $-0.053 \pm 0.043 \text{ dex kpc}^{-1}$ para NGC 300. Así mismo, obtenemos metalicidades en las regiones centrales próximas a la solar en ambas galaxias.

Para la espiral del Grupo Local, las abundancias estelares muestran un muy buen acuerdo con las obtenidas por Vílchez et al. (1988) a partir de medidas de la temperatura electrónica de regiones HII. Para la espiral del Grupo de Sculptor, las abundancias estelares son bien reproducidas por las nebulares cuando se aplica la calibración O/H - R_{23} de Pilyugin (2001), aunque los resultados obtenidos mediante la calibración de Kobulnicky et al. (1999) son también compatibles. Junto con el oxígeno, determinamos el comportamiento espacial para otros dos elementos α , magnesio y silicio. Ambos elementos muestran una buena correlación de sus abundancias, así como con la de oxígeno.

TRÁNSITO DE VENUS



Luz del Sol refractada en la atmósfera de Venus. Imagen obtenida con el Telescopio Solar Sueco (SST) de 1 m en La Palma (<http://vt-2004.kva.astro.su.se>).