

UNIVERSITAT DE BARCELONA

DEPARTAMENT D'ASTRONOMIA I METEOROLOGIA



UNIVERSITAT DE BARCELONA



Diseño y caracterización del sistema
fotométrico de la misión Gaia de la Agencia
Espacial Europea

Memoria presentada por
José Manuel Carrasco Martínez
para optar al grado de
Doctor en Física

Barcelona, octubre de 2006

Parte V

CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA

”Hay una teoría que afirma que si alguna vez alguien descubre exactamente para qué es el Universo y por qué existe, éste desaparecería instantáneamente y sería reemplazado por algo mucho más raro e inexplicable. Hay otra teoría que afirma que esto ya ha sucedido.”

Douglas Adams (1952-2001)
Escritor inglés

7 Conclusiones y trabajo futuro

7.1. Conclusiones

Para alcanzar los objetivos científicos de *Gaia* es imprescindible complementar las medidas astrométricas y de velocidades radiales con fotometría multicolor de alta precisión. Esto es necesario tanto para obtener una astrometría precisa al microsegundo de arco como para tener la correcta interpretación física del censo estereoscópico de la Galaxia. Este último objetivo impone que el sistema fotométrico sea capaz de parametrizar astrofísicamente 10^9 objetos en presencia de diversos grados de enrojecimiento interestelar y para el rango completo de composiciones químicas y edades de las estrellas que pueblan la Vía Láctea, así como identificar objetos peculiares y cuásares, objetos del Sistema Solar, etc.

No existía ningún sistema fotométrico capaz de cumplir con unos requisitos tan exigentes y por ello, este trabajo ha diseñado un sistema fotométrico expresamente para *Gaia*. Los filtros de banda ancha creados, y situados en el plano focal de los telescopios ASTRO, cumplen los requisitos para la corrección cromática durante el procesado de datos de la astrometría, a la vez que permiten la caracterización astrofísica de los objetos en las regiones con elevada densidad estelar. El sistema de banda intermedia de SPECTRO asegura la clasificación y parametrización astrofísica precisa.

La principal contribución de esta tesis es el propio sistema fotométrico propuesto, así como la metodología utilizada para crear el sistema fotométrico. El sistema C1B+C1M ha sido diseñado basándonos en nuestro conocimiento astrofísico (capítulos 2 y 3), en la experiencia de sistemas fotométricos terrestres (capítulo 1) y en la utilización del simulador de la fotometría de la misión (creado en el capítulo 4) y el uso de la figura de mérito (FoM, capítulo 5), obteniendo un total de cinco y catorce

filtros implementados en ASTRO y SPECTRO (capítulo 6), respectivamente. Este número de filtros refleja la gran variedad de objetos (todo tipo de estrellas, cuásares, galaxias, objetos del Sistema Solar, ...) y de parámetros astrofísicos a tratar y la necesidad de romper las degeneraciones (o sea, los cambios en dos o más parámetros que pueden traducirse en los mismos cambios en algunos rasgos espectrales, pero diferentes en otros).

El desarrollo novedoso introducido en este estudio se halla en el uso de una FoM objetiva para comparar diferentes propuestas de sistemas fotométricos. Esta FoM se basa en la predicción de las precisiones de los parámetros estelares en términos de T_{ef} , $\log g$, $[M/H]$, $[\alpha/Fe]$ y A_V . Dichas precisiones se han calculado utilizando espectros sintéticos, recopilados a este propósito durante esta tesis (capítulo 4), para evaluar la sensibilidad de cada uno de los filtros a cada parámetro astrofísico. La FoM también tiene en cuenta el grado de degeneración local en el parámetro. Este método puede utilizarse en el futuro para la optimización de cualquier sistema fotométrico con fines distintos a los de *Gaia* (estudio de galaxias, cuásares de alto corrimiento al rojo, ...).

La FoM global para un sistema fotométrico se ha calculado teniendo en cuenta las prioridades de las diversas estrellas consideradas como “objetivos científicos” y de sus parámetros astrofísicos. Dicha priorización ha sido elaborada también a lo largo de esta tesis (capítulo 3). De esta forma, la FoM nos permite escoger objetivamente entre los sistemas fotométricos propuestos para asegurar la precisión que exige la misión, teniendo al mismo tiempo el menor número de degeneraciones locales.

A modo de breve resumen, tres de los filtros de banda ancha de C1B están situados a la izquierda de la línea H_β , sobre la línea H_α , y a la derecha del salto de Paschen. Los otros dos filtros del sistema C1B rellenan los huecos entre los tres filtros mencionados para cubrir completamente el rango espectral de ASTRO. Un filtro de banda ancha de C1M, implementado en el instrumento SPECTRO, proporciona una medida del flujo ultravioleta a longitudes de onda más cortas que el salto de Balmer. Siete filtros de banda intermedia están situados sobre las series de Balmer de los tipos estelares más calientes, sobre la línea de CaII H, sobre el triplete de Mg I y en la banda de MgH, sobre la línea H_α , sobre una de las bandas de absorción debidas al TiO en las estrellas frías, y sobre la banda profunda de CN para las estrellas de tipo R y N. Un filtro adicional sirve para medir el flujo en el rango de longitudes de onda cubierto por el espectrógrafo de velocidades radiales (RVS). Finalmente, cinco

filtros intermedios se dedican a la determinación del pseudocontinuo.

La luz sin filtrar de ASTRO proporciona datos fotométricos de un filtro muy ancho (de 400 a 1000 nm). Esta magnitud, bautizada como G , proporciona la magnitud *Gaia* con mayor relación señal-ruido, y es, por tanto, la más idónea para el análisis de variabilidades. Análogamente, en SPECTRO se define la magnitud GS .

Las precisiones al final de la misión, calculadas según una aproximación de fotometría de apertura, son de 0.01 mag para $V \sim 16$ y 18 para los filtros C1M y C1B, respectivamente. En el caso de G y para estrellas observadas con C1B y C1M más brillantes que $V \sim 16$ y 14 respectivamente, la precisión fotométrica está limitada por los errores de calibración (sec. 5.4.3). A pesar de que no existe aún un modelo detallado de las calibraciones, una estimación somera del número de parámetros de calibración involucrados y del número de estrellas disponible muestra que se pueden conseguir precisiones fotométricas por debajo de la milimagnitud en G y del orden de la milimagnitud para magnitudes menores a las arriba mencionadas. El ajuste de la PSF muestra que es posible conseguir observar con SPECTRO campos con densidades estelares de alrededor $2\text{--}4 \times 10^5$ estrellas por grado cuadrado a magnitud 20, siempre y cuando se combine con la información astrométrica.

El comportamiento del sistema fotométrico de *Gaia* a la hora de determinar los parámetros astrofísicos ha sido evaluado utilizando los errores ‘a posteriori’ del formalismo de la FoM, así como utilizando algoritmos de parametrización astrofísica (basado en χ^2 y redes neuronales). Las diferencias y limitaciones de estos métodos ha sido discutida en esta tesis. Ambas aproximaciones demuestran que las precisiones deseadas se pueden alcanzar a $G \sim 17\text{--}18$ mag y que la precisión en cada parámetro depende de la temperatura, luminosidad, composición química, extinción interestelar, y de la magnitud aparente, tal y como era de esperar. Pueden obtenerse incertidumbres de 0.5–1 dex en $[M/H]$ incluso para estrellas muy poco metálicas ($[M/H] = -4.0$) y débiles. La determinación de $[\alpha/Fe]$ con una precisión de 0.1–0.2 dex es posible por debajo de $G \sim 16\text{--}17$ para estrellas con temperaturas bajas e intermedias. Suponiendo una ley de extinción estándar, el sistema C1B+C1M permite la determinación de las extinciones individuales y, así, la determinación de T_{ef} es más precisa, incluso bajo presencia de cantidades significativas de extinción, por debajo de, al menos, $G \sim 18$. Según las estimaciones hechas con las redes neuronales, se pueden determinar las temperaturas con una precisión de 1–5 % para las estrellas con $T_{\text{ef}} < 10000$ de $G = 15$ y con precisiones de 2–11 %

para $G = 18$. Combinando astrometría y fotometría, se puede hacer un mapa 3D de la extinción galáctica. *Gaia* proporcionará paralajes con errores inferiores al 10 % para unos 100–200 millones de estrellas, permitiendo la determinación de las magnitudes absolutas para todas las regiones del diagrama HR, siempre que se conozca la extinción presente. El sistema C1B+C1M ha sido diseñado para proporcionar precisiones similares en la luminosidad de las gigantes y de las estrellas tempranas lejanas ($\sigma_{\log g} = 0.1\text{--}0.2$ dex), asegurando así el estudio de la estructura galáctica a gran escala. Las edades individuales de las estrellas del “turn-off” del halo y del disco grueso y delgado a distancias de hasta 2, 3 y 5 kpc hacia el centro galáctico, anticentro y en direcciones ortogonales, respectivamente, pueden determinarse con una precisión de unos 4–5 Gyr (nótese que estas incertidumbres son las correspondientes a las edades individuales. Para un grupo de estrellas, la edad promedio se podrá determinar con una precisión mucho mejor). Precisiones similares se pueden derivar para las estrellas AGB tempranas, permitiendo, así, extender a distancias mayores que las que proporcionan las estrellas del “turn-off” y subgigantes. Para las subgigantes, nuestras estimaciones proporcionan una precisiones mejores (3–4 Gyr).

Un mérito adicional del sistema fotométrico de *Gaia* es su capacidad de discriminar entre cuásares y estrellas y enanas blancas. Esto se traduce en la identificación de un número suficiente de objetos para la definición de un sistema inercial de referencia utilizando fuentes extragalácticas.

Por último, se ha evaluado también el comportamiento de los filtros C1B para evaluar los residuos de cromaticidad. Las estimaciones muestran que la contribución cromática a los errores de la paralaje es de 0.14–1.4 μas . Como estos valores están basados en los errores más pesimistas del frente de ondas y en un modelo de calibración simplista, es de esperar que sea posible una contribución residual de 1 μas para estrellas y de unos pocos μas para los cuásares.

En resumen, el sistema C1B+C1M satisface los requisitos de la misión y, por ello, fue adoptado como el sistema de *Gaia* en diciembre de 2004. Fue adoptado por el equipo de proyecto de la ESA como base para los requisitos formales de la misión a los equipos industriales que participaron en la ‘Invitation to Tender’ de la ESA para *Gaia*, en octubre de 2005.

La experiencia para el desarrollo del sistema fotométrico, incluyendo la selección de los ST y la aproximación de la FoM, nos situaron en una buena posición para optimizar rápidamente las nuevas propuestas para la carga útil del satélite de la

industria seleccionada, tal y como explicamos en la siguiente sección.

7.2. Diseño actual de *Gaia*

El desarrollo de esta tesis ha sido paralelo a los intentos de la industria de optimizar el diseño del instrumento para asegurar los requisitos científicos de la misión con el menor coste y complejidad posible. Esto ha provocado que el diseño de la carga útil se haya modificado en diversas ocasiones, y a veces incluso, gracias a nuestra interacción con la propia industria para garantizar los requisitos científicos de la misión, y de la fotometría en particular. En el capítulo 1 únicamente se ha descrito el instrumento tal y como se entendía en el momento de adoptar finalmente el sistema fotométrico “definitivo”, C1B+C1M, a finales de 2004.

A principios de 2006 se hizo pública finalmente cuál de las industrias candidatas se encargaría de la construcción del satélite (EADS-Astrium) y, su propuesta final de instrumento. Dicha propuesta simplifica considerablemente la carga útil y cambia de forma radical la obtención de la fotometría.

El principal cambio en este nuevo diseño es la eliminación del telescopio SPECTRO con el que se obtenían la fotometría de banda intermedia (MBP) y el espectro de alta resolución en la región del triplete del calcio (RVS) para determinar velocidades radiales. Ambos aspectos se han trasladado al mismo plano focal con el que se obtendrá la astrometría (ver Fig. 7.1 y comparar con las Figs. 1.5 y 1.7 para ver los cambios de diseño), reduciendo así el número de elementos a construir, la masa y el coste económico de la misión. Al estar ahora alojada la fotometría de banda intermedia en el mismo telescopio que la astrometría, la resolución angular de dicha fotometría ha sido mejorada, evitando muchos de los problemas del anterior diseño en las zonas densas de la Galaxia. Pero, al mismo tiempo, al trasladar la fotometría a ASTRO, se reduce la detección del rango ultravioleta del espectro, pues el recubrimiento de plata de ASTRO posee una reflectividad menor a este rango espectral que el que poseían los espejos de aluminio de SPECTRO. En (Jordi et al. 2005) se analiza el efecto de la sustitución de espejos en la determinación de los parámetros físicos, según los valores obtenidos de la FoM, mostrando que efectivamente la FoM se ve reducida.

Dado que ahora el espacio físico en el plano focal es reducido, no se pueden alojar



Figura 7.1: Plano focal común para los dos telescopios ASTRO en el diseño de EADS-Astrium hecho público en febrero de 2006. La primera columna de CCD contiene sólo dos CCD para monitorear el ángulo básico entre los dos telescopios (BAM) y una tercera que sirve de sensor para el frente de ondas (WFS). A continuación hay dos columnas de siete CCD cada una (SM1 y SM2) que sirven para detectar dónde hay estrella, es decir, como *sky mapper* (siendo SM1 la columna de CCD que ve sólo el primer telescopio, ASTRO1, y SM2 la que ve el segundo, ASTRO2). Las nueve columnas de siete CCD siguientes son las que se utilizan para la astrometría de la misión y la fotometría en el filtro *G*. Las dos siguientes columnas obtienen la espectrofotometría en la parte azul, BP, y roja, RP, del espectro. Por último, el conjunto de doce CCD que le siguen se encargan de registrar los espectros de alta resolución para la determinación de la velocidad radial.

tantas CCD y filtros como había en el diseño de SPECTRO. Por ello EADS-Astrium sustituye la filosofía de filtros fotométricos por la de obtención de espectrofotometría de baja resolución utilizando prismas de dispersión sin rendija (Fig. 7.2). Esta espectrofotometría se divide en dos regiones, una situada a longitudes de onda cortas ("Blue Photometer", BP) y otra a longitudes de onda mayores ("Red Photometer", RP).

La dispersión espectral de estos prismas (Fig. 7.3) se ha escogido con el fin de asegurar que los filtros C1B+C1M sean reproducidos adecuadamente a partir de los espectros de baja resolución obtenidos en BP/RP (Fig. 7.4).

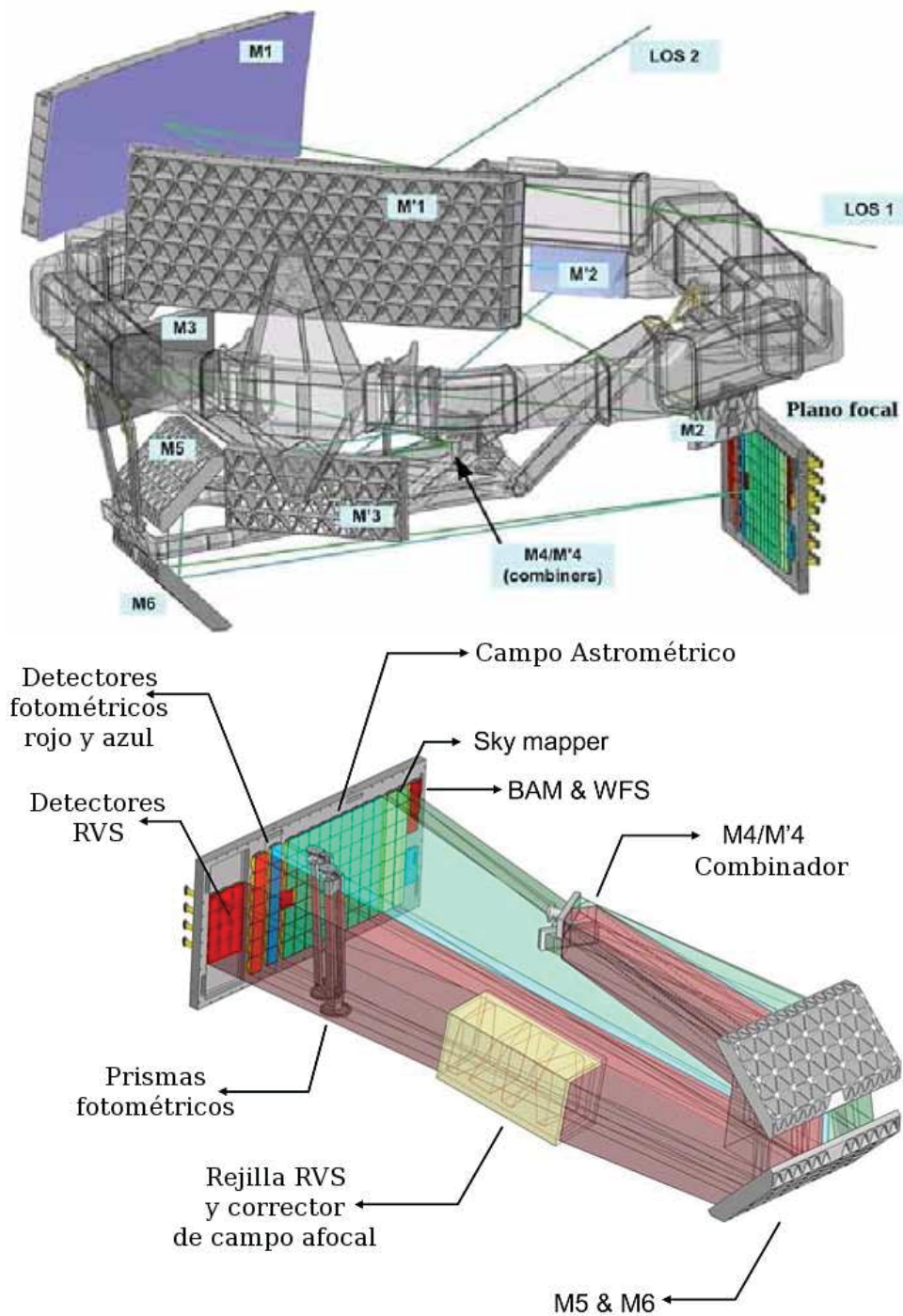


Figura 7.2: Trayectoria de los rayos de luz al entrar por los dos telescopios de *Gaia* hasta llegar al plano focal donde se detectan tras, en el caso de RVS y BP/RP, haber sido dispersados en diferentes longitudes de onda.

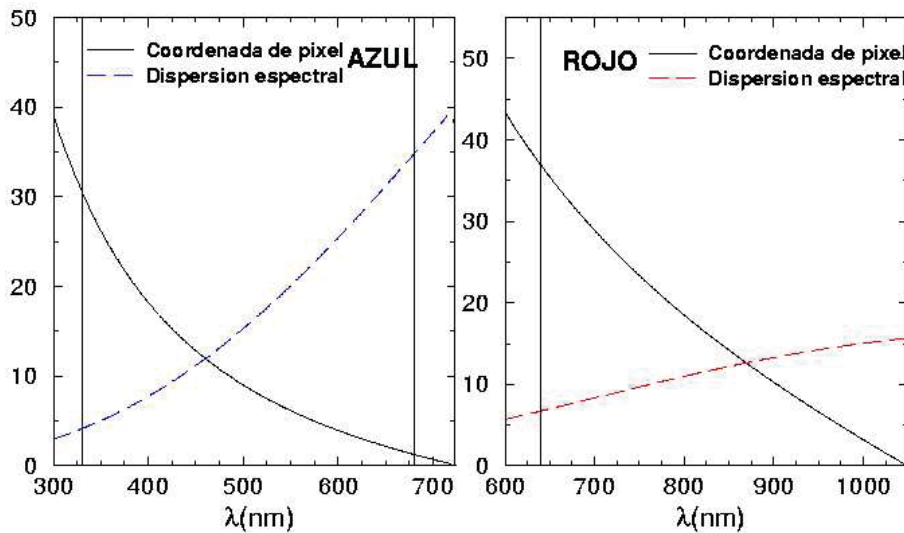


Figura 7.3: Dispersión espectral (nm/píxel) en el espectrofotómetro azul (*izquierda*) y en el rojo (*derecha*). En negro se dibuja la correspondencia entre píxeles de la ventana y las longitudes de onda. Las líneas verticales marcan los límites de longitud de onda de cada espectrógrafo.

El hecho de capturar los fotones recibidos en cualquier rango de longitudes de onda a lo largo del intervalo espectral de *Gaia* hace que, en principio, tengamos más información que con los 14 filtros propuestos para C1M y, por lo tanto, es de esperar que los parámetros astrofísicos se determinen con mayor fiabilidad. Ciertamente, según Brown (2006a) con el espectrógrafo se poseen el análogo a unos 18 filtros independientes. Esto se refleja, ciertamente, en los valores de la σ_{post} mostrados en la Fig. 7.5, donde se comparan los valores de esta nueva propuesta (indicada como nominal en la figura) y los obtenidos con C1M en el anterior diseño.

Desde febrero de 2006, nuestras herramientas han sido utilizadas para optimizar la propuesta de EADS-Astrium. En Jordi et al. (2006b) se sugiere la modificación de la dispersión nominal propuesta por EADS-Astrium para el espectrofotómetro azul hasta un 125% (ver opción “1.25” en la Fig. 7.5) y el aumento del tiempo de exposición en las CCD de RP. Dicha sugerencia ha sido aceptada en base a los valores de la FoM presentados en la tabla 7.1.

Sin embargo esta posible mejora debe ser analizada con mayor rigor, puesto que el proceso de calibración se ha complicado sensiblemente con el nuevo diseño de EADS-Astrium y es de esperar que en ciertos casos el error de calibración se vea incrementado sensiblemente. En Brown (2006b) se describen las tareas que se deberán

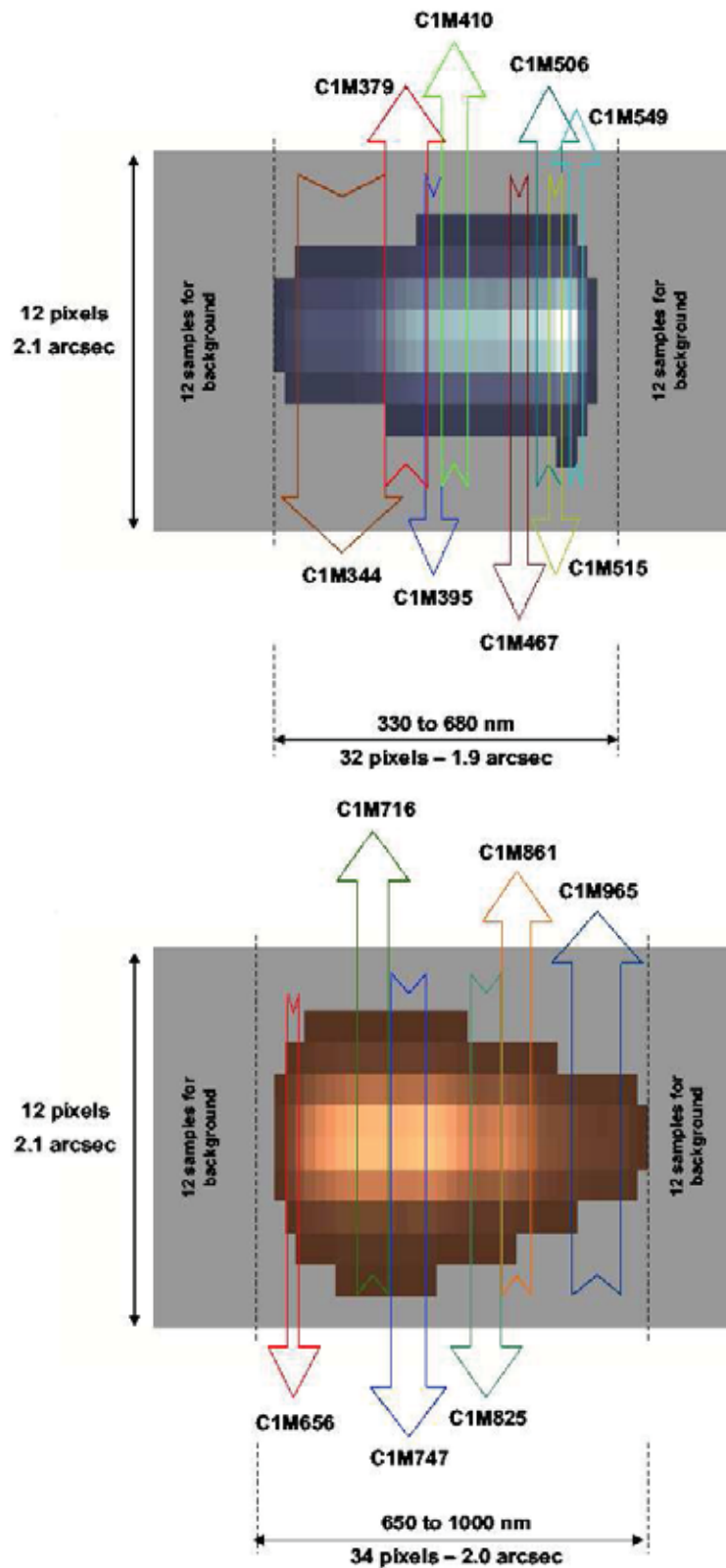


Figura 7.4: Imágenes bidimensionales de los espectros típicos de una estrella B1V en BP (*arriba*) y de una estrella M6V (*abajo*). Las flechas indican cómo se corresponden los diferentes filtros de C1M con el espectro obtenido con el nuevo diseño de EADS-Astrium.

Tabla 7.1: Valores de la FoM comparativos entre la propuesta nominal de EADS-Astrium y la opción recomendada en Jordi et al. (2006b) utilizando espectros extraídos de las librerías de BaSeL-2.2 y asumiendo $\sigma_{cal} = 0$.

Librería BaSeL2.2 (4 parámetros: T_{ef} , $\log g$, $[M/H]$, A_V)				
	N	C1B+C1M	EADS-Astrium	Opción recomendada
Halo	1560	0.8753	0.8718	0.8804
Disco grueso	1160	0.9361	0.9480	0.9529
Disco delgado	1394	0.9272	0.9456	0.9499
Bulbo	236	0.7620	0.8342	0.8462
Global	4350	0.9038	0.9163	0.9226

abordar para establecer el método de calibración de la fotometría de la misión. Los aspectos más críticos son: (i) PSF y dispersión espectral variables a lo largo del plano focal; (ii) movimiento de la imagen durante el tránsito, (iii) ineficiencia en la transferencia de carga por los efectos de radiación y (iv) dimensión finita de la ventana.

7.3. Trabajo futuro

Es precisamente el proceso de calibración y tratamiento de datos el que se debe plantear y estudiar en detalle en los próximos años. Para ello la comunidad científica ha creado una estructura acorde a la nueva fase de *Gaia*, organizada en unidades de coordinación (CU, *coordination units*) para el estudio de la implementación del procesado de datos (ver Fig. 7.6). Entre estas unidades de coordinación, la denominada CU5 se encarga de diseñar, desarrollar, probar e implementar el proceso de reducción de la fotometría de la misión, incluyendo el software del procesado de datos fotométricos, las calibraciones relacionadas y las tareas asociadas (alertas científicas durante la misión, interacción con la astrometría, ...).

La estructura de esta CU5 se subdivide en unidades de desarrollo (DU, *development units*) y cada una de éstas en paquetes de trabajo (WP, *working packages*). De

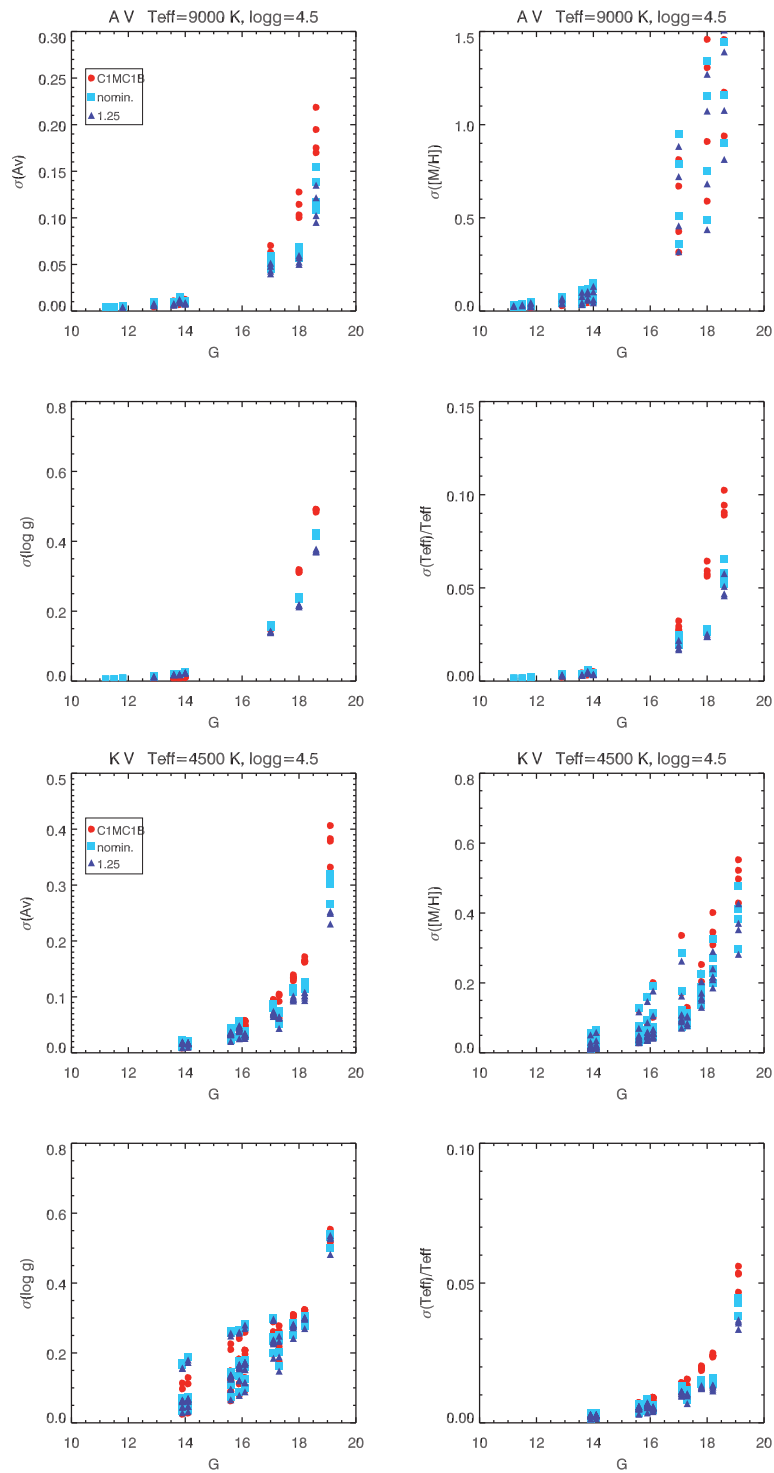
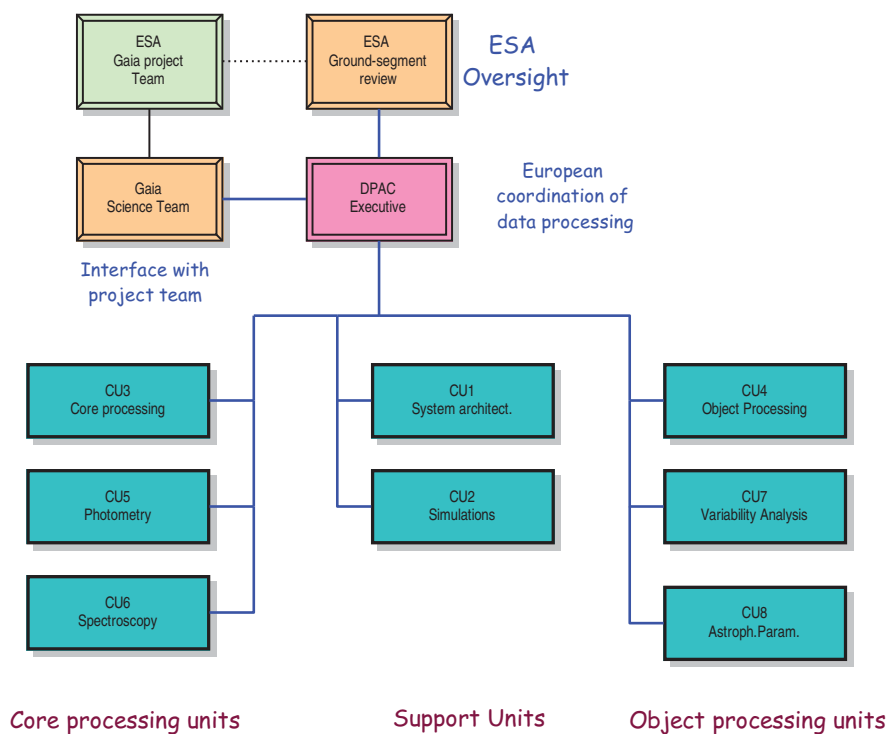


Figura 7.5: Precisiones astrofísicas para estrellas A y K con BaSel2.2 en función de G . La dispersión de σ_{post} para una G y opción de diseño dada (mismo símbolo), se debe a diferentes parámetros astrofísicos. $\sigma_{\text{post}}([M/H])$ crece a $[M/H]$ menores. No se incluye σ_{cal} .

Gaia Data Processing and Analysis Consortium



FvL, IoA, 15-11-05

Figura 7.6: Unidades de coordinación en el consorcio de análisis y procesado de datos de *Gaia* (DPAC, *Data Processing and Analysis Consortium*)

estas unidades de desarrollo el equipo de Barcelona se ha comprometido a desarrollar y/o contribuir principalmente en cuatro: DU12 (Calibración fotométrica, AF+SM, BP+RP), DU16 (Objetos de calibración interna) y DU13/DU14 (Caracterización de la respuesta absoluta del instrumento y observación desde Tierra). Éstos serán, pues, los objetivos del grupo de Barcelona en los próximos años: plantear e implementar el proceso de calibración interna del instrumento espectrofotométrico, elaborar criterios par la selección de objetos que sirvan para calibrar el instrumento, ver cómo se comporta a lo largo de la misión, proporcionar el software necesario, y por último, en una labor liderada por el grupo de Bolonia, seleccionar las estrellas que nos permitirán transformar los flujos observados por el satélite en unidades físicas útiles para la comunidad científica. Para ello estamos produciendo simulaciones de la relación señal-ruido y del número de tránsitos de *Gaia* útiles para propósitos de calibración

(Carrasco et al. 2006), utilizando espectros BP y RP simulados en Brown (2006a).

7.4. Últimas palabras

Gaia es una misión que involucra gran cantidad de científicos y produce ciencia de primer nivel realmente prometedora y fascinante. Cuando *Gaia* se lance finalmente y empiece a obtener la ciencia deseada, toda la sociedad podrá oír hablar sobre la gran cantidad de descubrimientos y estudios que se podrán llevar a cabo. El hecho de que la misión observe una cantidad tan grande de objetos con una precisión sin precedente situará a *Gaia* como un gran referente en la comunidad astronómica, tal y como ya ha ocurrido con la misión *Hipparcos* (ESA 1997)¹. El catálogo que resulte de los cinco años de continuo escaneo del cielo, permitirá, sin dudas, avanzar en campos muy diversos y el conocimiento de nuestra galaxia podrá dar un salto gigantesco en pocos años y por supuesto planteará nuevas incógnitas que permitirán al ser humano seguir avanzando en el conocimiento de su entorno, su historia y su lugar en el universo.

Personalmente me siento muy afortunado de poder participar en el desarrollo de una misión de tal envergadura a la vez que penetrar en el proceso que hace que todo esto sea posible. El espíritu presente en la creación de una misión espacial como *Gaia* creo que difiere bastante de otros campos de investigación astrofísica. En la elaboración de una misión espacial existe un propósito común a todo el personal involucrado, de forma que la colaboración entre grupos se produce de forma natural para generar la mejor ciencia posible con el instrumento diseñado.

Además, por el hecho de que *Gaia* sea una misión tan ambiciosa, el diseño del sistema fotométrico de la misión me ha permitido explorar campos muy diversos de la astrofísica, quizás no con la profundidad deseada pero sí hasta el punto de poder conocer qué esperan dichos campos de la fotometría. Este deseo de avanzar en el futuro se compagina con la necesidad de mirar al pasado al diseñar los filtros de *Gaia*. Crear un sistema fotométrico para *Gaia* requirió analizar el proceso con el que los sistemas fotométricos del pasado fueron creados e intentar aprovechar al máximo la experiencia obtenida a la vez que innovar utilizando herramientas útiles

¹Existen actualmente unos 1700 artículos con “referee” con la palabra *Hipparcos* en el “abstract”

hasta ahora no utilizadas.

La elaboración de esta tesis me ha permitido también conocer científicos de primera línea a mano de los cuales no dudo que *Gaia* acabará siendo una misión totalmente exitosa y de gran renombre en el futuro.

Así pues, con estas palabras de ánimo a todos lo que hacen posible *Gaia* y a todos los que duden en involucrarse en el diseño de una misión espacial, finalizo esta memoria de tesis, con el deseo de que todos los proyectos en los que me vea envuelto en el futuro sean tan apasionantes como el que ahora ocupa mi tiempo.

*“En el fondo, los científicos somos gente con suerte:
podemos jugar a lo que queramos durante toda la vida.”*

Lee Smolin
Físico estadounidense.