

UNIVERSITAT DE BARCELONA  
DEPARTAMENT D'ASTRONOMIA I METEOROLOGIA

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

*José Manuel Carrasco Martínez*



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



PROGRAMA DE DOCTORADO DE ASTRONOMÍA Y METEOROLOGÍA

BIENIO 2000–2002

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

DIRECTOR DE LA TESIS

Dra. Carme Jordi i Nebot



*A mi padre*





*En el mismo momento en que el hombre descubrió la vastedad del universo y se dio cuenta de que aun sus más disparatadas fantasías eran ínfimas comparadas con la verdadera dimensión de la Vía Láctea, tomó medidas para asegurar que sus descendientes no pudiesen ver las estrellas en lo más mínimo. (...) A medida que avanzaba la tecnología y se contaminaban los centros urbanos, las noches se fueron quedando sin estrellas. Nuevas generaciones alcanzaron la madurez ignorando totalmente el firmamento que había pasmado a sus mayores y estimulando el advenimiento de la era moderna de la ciencia y la tecnología. Sin darse cuenta siquiera, justo cuando la astronomía entraba en su edad de oro, la mayoría de la gente se apartaba del cielo en un aislamiento cósmico que sólo terminó con los albores de la exploración espacial.*

**Carl Sagan (1934-1996)**

**Astrónomo estadounidense.**



## Agradecimientos

Me pone más nervioso escribir estas primeras líneas que el resto de la tesis. Sé que muchos de los que estáis leyendo estas palabras iniciales no os leeréis el resto del documento o, como mucho, os abanicaréis con sus páginas mientras veis pasar las aburridas figuras y tablas que en ellas se contienen. Sí, yo también lo hago cada vez que me cae una memoria de tesis en las manos, llevado por el instinto “cotilla” de averiguar a quién habrá mencionado el autor en los agradecimientos. Supongo que si redacto de forma extensa estos agradecimientos me libraré de los cotillas más perezosos. Pues bien, allá va.

Escribir una tesis sobre astronomía es algo que he deseado hacer desde siempre pero que mi modestia y poca confianza en mí mismo, así como mis amigos más escépticos en mis capacidades (es decir, todos), se empeñaban en hacerme dudar de que algún día pudiera conseguir. Parece ser que finalmente sí lo he conseguido y llega el momento de repasar y agradecer a todos aquellos que han facilitado este logro.

Por supuesto, una tesis doctoral no se hace sin un director de tesis y yo me considero muy afortunado de haber tenido a Carme Jordi como directora de tesis. Creo que Carme ha sido en todo momento eso, una directora de tesis y, aunque parezca raro, creo que eso es lo más bonito que se puede decir de un director de tesis. Carme me ha guiado en este proceso, enseñándome todo lo necesario, soportando mis preguntas más absurdas y mis fallos más tontos con una paciencia encomiable, dedicándome una gran parte de su ocupado tiempo. Nunca me ha gustado ser pelota, así que no me extenderé más en las cualidades que hacen de Carme la mejor directora de tesis que he tenido (perdón por el chiste). Carme, moltes gràcies!

I would like to thank Jens Knude his kindness to accept me for my stay in Copenhagen and for everything I learned with him about color diagrams and reddening determination. Thank you very much!

También tengo que agradecer a mi familia el haber podido escribir la tesis. Mis padres siempre me han apoyado (y mantenido, je, je), permitiendo que mi deseo pudiera cumplirse, aunque en algún momento se les escapara algún “¿Y esto qué salidas tiene?”. Mi hermana, en cambio, siempre le ha visto el sentido lúdico a lo

que quiero que se convierta en mi profesión y aún recuerdo cómo en una de mis excursiones nocturnas al campo para ver estrellas ella me dijo con cierta envidia que menuda excusa me había buscado para irme de juerga el fin de semana al campo con mis amigos. En fin, la falta de sueño y los pies congelados tenían que tener alguna compensación.

Los miembros del departamento de Astronomía y Meteorología me han proporcionado un excelente ambiente de trabajo durante estos años y animo al “DAM-nyam” a que luche por no extinguirse a pesar de que poco a poco nuevas tesis vayan leyéndose y algunos miembros se vayan distanciando de las paredes de la facultad. Tened por seguro que, si finalmente consigo que esta tesis sea aprobada y una vez obtenido el título de doctor, haremos una de nuestras míticas cenas. Habéis sido unos compañeros de “comederos” fantásticos, así que muchas gracias a todos (Elies, Miquel, Yolanda, Sara, Xavi, Manu, Manel, Mercè, Jordi, Germán, Adolfo, Pau, Tomeu, Joaquim, Nacho, ...).

También quiero mencionar a los miembros del grupo Hipparcos del departamento y en especial a los que hemos hecho posible algunas de las retransmisiones por internet de diversos eventos astronómicos y que además han sido compañeros de congresos (Guillem, Salva, Francesc, Eduard, Lola, David, Belén, ...). He pasado muy buenos ratos con vosotros en medio de alguna observación o viajando por el mundo en busca de alguna forma de conocer nueva gente.

Hablando de conocer a gente en congresos, quiero acordarme aquí de la gente maravillosa con la que hemos podido contactar en diversos congresos y/o escuelas de invierno (Ricardo, Bea, Manolo, Juanjo, Pedro, Juan, Alina, Silvia, Raffaella, Hervé, Deborah, Alberto, Vincenzo, Maria Teresa, Vivi, y tantos otros). Espero veros a menudo.

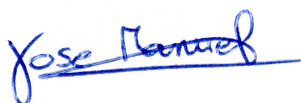
Me estoy dando cuenta de la gran cantidad de personas que conozco y por las que he tomado cierto aprecio en estos últimos años. Pero, por supuesto, también están aquellos amigos que, desde siempre han vivido conmigo mi sueño de ser doctor en astronomía. En este punto es donde “la cofradía” debe ser mencionada sin espera: Jordi, Néstor, Dani, David, Núria, Rosa. A todos ellos les debo dedicar un ‘desagradecimiento’, puesto que mientras he estado con ellos, NO he estado trabajando con esta tesis e incluso, a veces, mientras sí estaba trabajando con la tesis de hecho estaba deseando dejar de trabajar e irme a pasar el rato con ellos. Así que muchos desagradecimientos. Los fines de semana no serían lo mismo sin todos vosotros. De-

sagradezco también al resto de amigos con los que haya pasado algún fin de semana (Jordi Bernabeu, Ester, Maite, Marc, Pere, Raimon, Rosario, Vanessa, ...).

Por último, y para no superar en extensión al resto de la tesis, finalizo esta sección de desagradecimientos con la que ahora mismo es la persona más importante de mi vida, la maravillosa mujer con la que me he casado llamada Eugènia y que es la que realmente me ha animado en los momentos más duros de mi vocación científica y personal. Gracias por recordarme en mis horas bajas la ilusión y felicidad con la que viví mis primeros meses en el departamento. Gracias por convertirme en alguien un poco más sensible y por emocionarte y alegrarte a medida que voy logrando mis objetivos en la vida. Gran parte de esto te lo debo a tí, sin duda. Muchas gracias. Te quiero.

Tras esta retahíla de peloteos os invito a leer el resto de mi memoria de tesis para que cuando me veáis contradigáis mis palabras iniciales con un: “Pues yo sí que la he leído”.

Barcelona, 16 de octubre de 2006

A handwritten signature in blue ink that reads "Jose Manuel". The signature is written in a cursive style and is underlined with a single horizontal stroke.

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a una *Beca de Recerca i Docència* de la Universitat de Barcelona y a los contratos del Ministerio de Ciencia y Tecnología PNE-2003-04352, ESP2004-20292-E y ESP2005-24356-E.

## Summary of the thesis

The aim of this thesis is to design the photometric system for Gaia space mission (ESA), to be launched at the end of 2011. This set of bands must allow the correct classification of Gaia sources, parameterize them in terms of their physical properties and, furthermore, permit the evaluation of the chromatic effects in the astrometric measurements.

The considered payload design (*Gaia-2*), include broad and intermediate photometric bands. The recent payload design changes (February 2006), substitutes the filters by low resolution spectrophotometry. This change was produced, ensuring the correct identification of the spectral regions covered by the photometric bands proposed in this PhD, accepted previously to this change in the design. In this way, *Gaia-3* implements the same photometric system considered here but with prisms, instead of filters.

The intermediate band filters are more effective to measure discrete spectral features. But for the fainter stars without enough signal in intermediate bands, and for the very crowded stellar fields, *Gaia* have also broad band photometry allocated in the astrometric instrument, with higher angular resolution.

There are a lot of existing photometric systems, but none of them is optimum for *Gaia*, due to wide kind of stars, the large amount of sources to be observed with *Gaia* ( $10^9$ ) and due to the wide aparent luminosities to be observed by the satellite.

In photometric system design it was needed to have clear in mind the scientific targets of the mission and, in particular, of photometry. A list of key scientific targets (ST) was created, prioritizing them as function of their importance in the global context of *Gaia*. The photometric system was then optimized according to this priorities. In this way, we decided to optimize the system for isolate stars, without multiplicities and, among these, the crucial stars to understand the Milky Way. The used methodology was to look at the useful stars to study each of the galactic populations, identifying the best tracers for each scientific goal and selecting the representative stars at different directions, distances, interstellar absorption, etc. The final ST list is formed by 9183 stars. There were also considered some non prioritary sources and there were introduced “a posteriori” to produce some changes in the photometric system without losing the ST characterization (for instance, the optimization of the band centered on  $H_\alpha$  to detect the emission line stars.

Along this thesis, we have developed a simulation tool of Gaia photometric observations. This simulator is flexible enough to adapt changes in the instrument and in the passbands. The goal is to simulate the detected photon counts and the associated error, considering both the end of the mission or a single transit. These errors are useful to make an estimation of the astrophysical parameters determination and their associated recovered uncertainties.

The different proposals to be the *Gaia* photometric system were evaluated objectively using a mathematical entity, called Figure of Merit (FoM), to show how good the results were for each photometric system, independently with the classification and parameterization algorithms. Using this FoM, we could propose changes in the passbands to increase the value of the FoM, and getting the optimum photometric system for *Gaia*. The FoM concept is based on the characterization of the sensitivity of the passbands to slight changes on the astrophysical parameters of the observed source. Changes in the fluxes are compared with the observational errors, considering in some cases a certain a priori knowledge of the source (as for instance, the knowledge of the parallax from astrometry).

The result of this study was the creation of C1M (medium band) and C1B (broad band) systems, with 14 and 5 bands, respectively. As a brief summary, 3 of the C1B bands are located at the left of  $H_\beta$  line, on  $H_\alpha$  line and at the right of the Paschen jump. The other 2 passbands fill the gap between the other passbands. In C1M system the passbands are located to measure the Balmer jump and Balmer series, the CaII H line, the MgI+MgH bands, TiO bands for cold stars and CN bands for R and N type stars. an extra passband is located to measure the flux at the spectral range covered by the radial velocity spectrometer, which measure the Ca triplet.

Once the *Gaia* photometric system is defined, the final chapter of the thesis deal with the inverse problem, trying to recover the astrophysical parameters from C1M+C1B observations. This job is done by the classification working group (ICAP), but in this thesis we give some guides to deal with this subject, using the criteria to propose the set of bands. The color-color diagrams showed could be used in the future to the creation of the classification algorithms.





# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. La misión <i>Gaia</i>	3
1.1.1. Objetivos científicos	5
1.1.2. Principios	9
1.1.3. Instrumentos	10
1.1.3.1. ASTRO	12
1.1.3.2. SPECTRO	16
1.2. Sistemas fotométricos	18
1.2.1. Sistema Johnson, o sistema de Arizona	19
1.2.2. Sistemas Strömngren y Vilnius	21
1.2.3. Sistema de Ginebra	22
1.3. Objetivo de la tesis	22
1.4. Estructura del trabajo	25

## I DEFINIENDO LAS EXPECTATIVAS

<b>2. La información astrofísica</b>	<b>31</b>
2.1. ¿Cómo es la Vía Láctea y sus estrellas?	32
2.1.1. Poblaciones galácticas	32
2.1.2. Clasificación y evolución estelar	35
2.2. ¿Cómo es el espectro de una estrella?	38
2.2.1. Regiones espectrales con información	39
2.3. Determinación de los parámetros astrofísicos	41
2.3.1. Temperatura y extinción	41
2.3.2. Luminosidades absolutas	45
2.3.3. Composición química	45

2.3.4. Edades . . . . .	51
<b>3. Estrellas clave de <i>Gaia</i></b>	<b>55</b>
3.1. Abundancias y edades de las poblaciones estelares . . . . .	56
3.2. Objetivos científicos y prioridades . . . . .	58
3.2.1. Entendiendo la Vía Láctea . . . . .	59
3.2.2. Objetivos en el halo . . . . .	60
3.2.3. Objetivos en el bulbo . . . . .	63
3.2.4. Objetivos en el disco grueso . . . . .	65
3.2.5. Objetivos en el disco delgado . . . . .	67
3.2.6. Estrellas extragalácticas . . . . .	70
3.2.7. Objetos no estelares . . . . .	70
3.2.8. Prioridades de los parámetros astrofísicos . . . . .	71
3.3. Precisiones esperadas . . . . .	72
3.3.1. Precisión en las paralajes . . . . .	72
3.3.2. Precisiones a partir de la fotometría . . . . .	73
3.4. Construcción de la lista de ST . . . . .	75

## II

## CREANDO LAS HERRAMIENTAS

<b>4. Fotometría sintética</b>	<b>89</b>
4.1. El simulador . . . . .	89
4.1.1. Datos de entrada . . . . .	90
4.1.2. Datos de salida . . . . .	93
4.2. Librería de espectros . . . . .	94
4.2.1. Requisitos . . . . .	95
4.2.2. Espectros sintéticos de estrellas . . . . .	95
4.3. Ley de absorción . . . . .	105
4.4. Fondo de cielo . . . . .	107
4.5. Instrumentos . . . . .	108
4.6. Punto cero de las magnitudes . . . . .	114
4.7. Evaluación de errores . . . . .	114
4.7.1. Número de observaciones . . . . .	116

### III PROPONIENDO LOS FILTROS

<b>5. Sistemas fotométricos</b>	<b>125</b>
5.1. Las propuestas previas a la figura de mérito . . . . .	127
5.1.1. Sistema de Barcelona-Ginebra . . . . .	130
5.1.2. Sistemas de Vilnius . . . . .	135
5.1.3. Sistemas de Bailer-Jones . . . . .	136
5.1.4. Sistemas de Lindegren y la corrección cromática . . . . .	139
5.1.5. Sistema de Uppsala . . . . .	141
5.1.6. Sistemas de Straižys . . . . .	141
5.1.7. Sistema de København . . . . .	144
5.2. Blindtesting . . . . .	145
5.3. La figura de mérito . . . . .	148
5.3.1. Principios de la figura de mérito . . . . .	148
5.3.2. Evaluación de las propuestas BBP . . . . .	154
5.3.3. Evaluación de las propuestas MBP . . . . .	166
5.4. El sistema fotométrico para <i>Gaia</i> . . . . .	199
5.4.1. C1B . . . . .	200
5.4.2. C1M . . . . .	205
5.4.3. Las bandas <i>G</i> y <i>GS</i> . . . . .	210

### IV EVALUANDO EL SISTEMA FINAL

<b>6. Rendimiento fotométrico</b>	<b>217</b>
6.1. Recuperar la información astrofísica . . . . .	217
6.1.1. Índices de temperatura y extinción . . . . .	218
6.1.2. Colores sensibles a la gravedad . . . . .	224
6.1.3. Índices de abundancias químicas . . . . .	228
6.1.4. Clasificación por $\chi^2$ . . . . .	232
6.1.5. Redes neuronales . . . . .	235
6.2. Objetos no prioritarios . . . . .	238
6.2.1. Estrellas con líneas de emisión . . . . .	239
6.2.2. Cuásares . . . . .	240

**V CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA**

<b>7. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>247</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	247
7.2. Diseño actual de <i>Gaia</i> . . . . .	251
7.3. Trabajo futuro . . . . .	256
7.4. Últimas palabras . . . . .	259
<b>8. Referencias bibliográficas</b>	<b>261</b>
8.1. Información en la red . . . . .	261
8.2. Artículos y publicaciones . . . . .	262

**VI APÉNDICES**

<b>9. Acrónimos y definiciones de interés</b>	<b>281</b>
---	------------