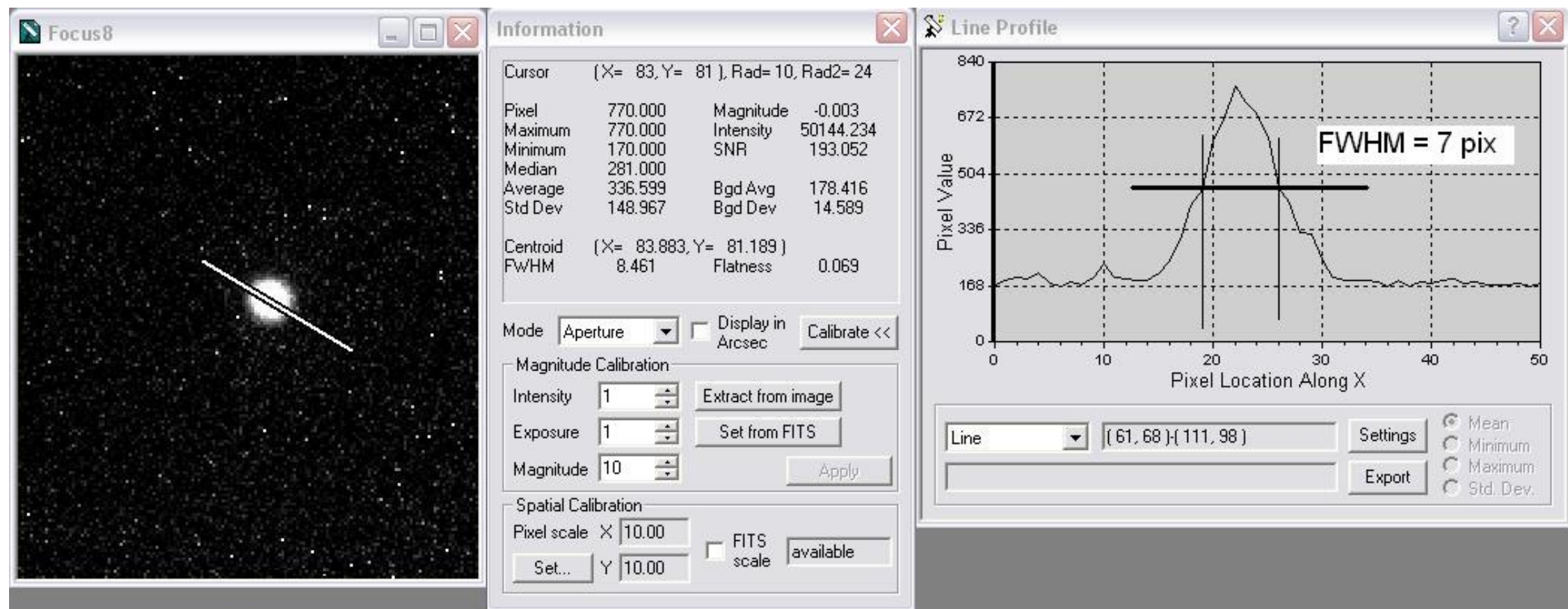


Astrometría

Aportes de Cecilia Mateu y Gonzalo Tancredi

Medida del seeing

Seeing se mide como el Ancho total a mitad del máximo - Full Width at Half Maximum (FWHM)



Altura máxima = 770, Nivel del fondo = 178, Altura relativa= 592
Mitad de altura = $592/2 + 178 = 474$, FWHM = 7 pix

Astrometría

- La medida de la posición de un astro en un instante dado en relación a un sistema de referencia establecido. Se puede determinar además el movimiento de los astros en el plano del cielo.

Guide to Minor Body Astrometry

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/Astrometry.html>

Ventajas y limitaciones de los CCD para astrometría

Ventajas:

- Gran sensibilidad
- Facilidad de reducción de las imágenes
- Resultados inmediatos

Desventajas:

- Pequeñez del campo
(grados cuadrados frente a décimas o centésimas de grados cuadrados)
- Error astrométrico por tamaño de pixel

Necesidades previas

- Determinación precisa de las coordenadas del observatorio (preferentemente con GPS o cartas geográficas).
- Obtener un reloj preciso. Se puede usar el reloj de la máquina ajustándolo a alguno de los relojes atómicos on-line.

Etapas

- La obtención de la secuencia de imágenes.
- Determinar las coordenadas en la imagen del centro del objeto y de estrellas de referencia: *las coordenadas de placa*.
- Transformación de las coordenadas de placa a un sistema de coordenadas universal: *las ecuaciones de transformación*.

La obtención de las imágenes

- Apuntar el telescopio a la zona deseada.
- Obtener una secuencia de por lo menos 3 imágenes separadas en el tiempo.

La separación en el tiempo depende del movimiento de los objetos. Para poder apreciar el movimiento se deben tomar exposiciones consecutivas en las que el objeto se haya movido algunas veces el tamaño del seeing.

(Ejemplo: si el objeto se desplaza a $30''/\text{hr}$ y el seeing es de $3''$, se debe esperar por lo menos 6 minutos para apreciar el movimiento del objeto.)

- Si el objeto es brillante ($\text{mag.} < 14$), se puede buscar la zona en un atlas estelar (Deep Sky Survey) y corroborar si aparece un objeto nuevo en la imagen. Luego de obtenida una secuencia es mas sencillo superponer las imágenes y hacer una animación (*blinking*), donde se apreciará el objeto en movimiento.
- Corroborada la aparición del objeto se puede seguir tomando imágenes, aunque es suficiente para las medidas astrométricas tener una secuencia de 3 imágenes donde el objeto se haya desplazado algunas decenas de segundos.

Reducción Astrométrica

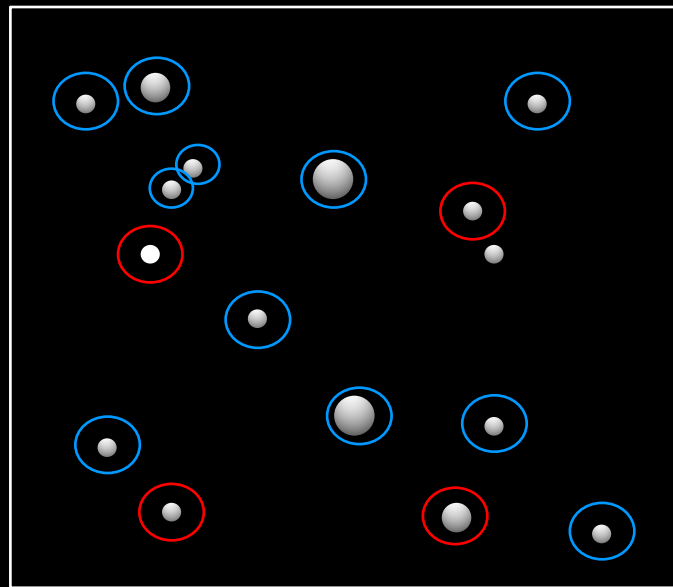
- Paso de las coordenadas (x,y) relativas en el plano del CCD a coordenadas en un sistema (celeste) de referencia: coordenadas ecuatoriales
- Los datos que tenemos para cada “placa” (o imagen CCD) son:
 - RA_0, DEC_0 = coordenadas de apuntado del telescopio $\rightarrow$ si el apuntado del telescopio es bueno éstas serán las coordenadas del centro de la placa
 - escala de placa (o $\Leftrightarrow$ distancia focal) arcsec/píxel
 - tamaño del campo
 - posiciones x_i, y_i de las estrellas de nuestra placa “problema”
 - hora/tiempo de la observación (debe ser precisa para astrometría de objetos de Sistema Solar)
- Necesitamos un catálogo de referencia para anclar x,y al cielo, e.g.:
 - USNO-B1 ($V < \sim 19$), UCAC-N ($V < 14$) , PPMXL (USNO+2MASS), Hipparcos, Tycho ($V < 12$), TGAS ($V < 12$) ... y... Gaia DR2 ($G < 20.7$)

CALIBRACIÓN ASTROMÉTRICA

Elección de ★ de referencia en imágenes

Identificación de ★ de referencia en catálogo

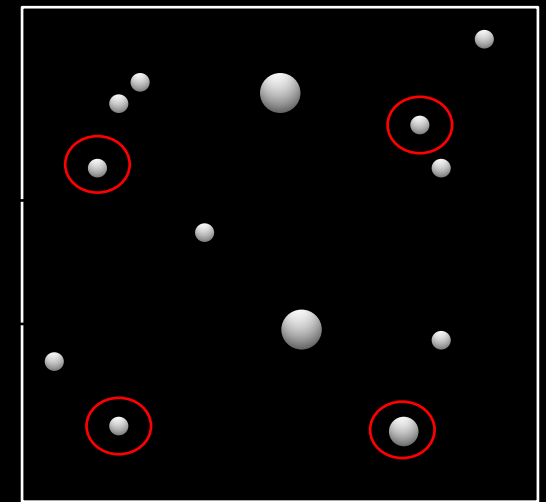
O
A
L
M



$(x_{\text{ref}}, y_{\text{ref}})$

(x_i, y_i)

2MASS, UCAC4



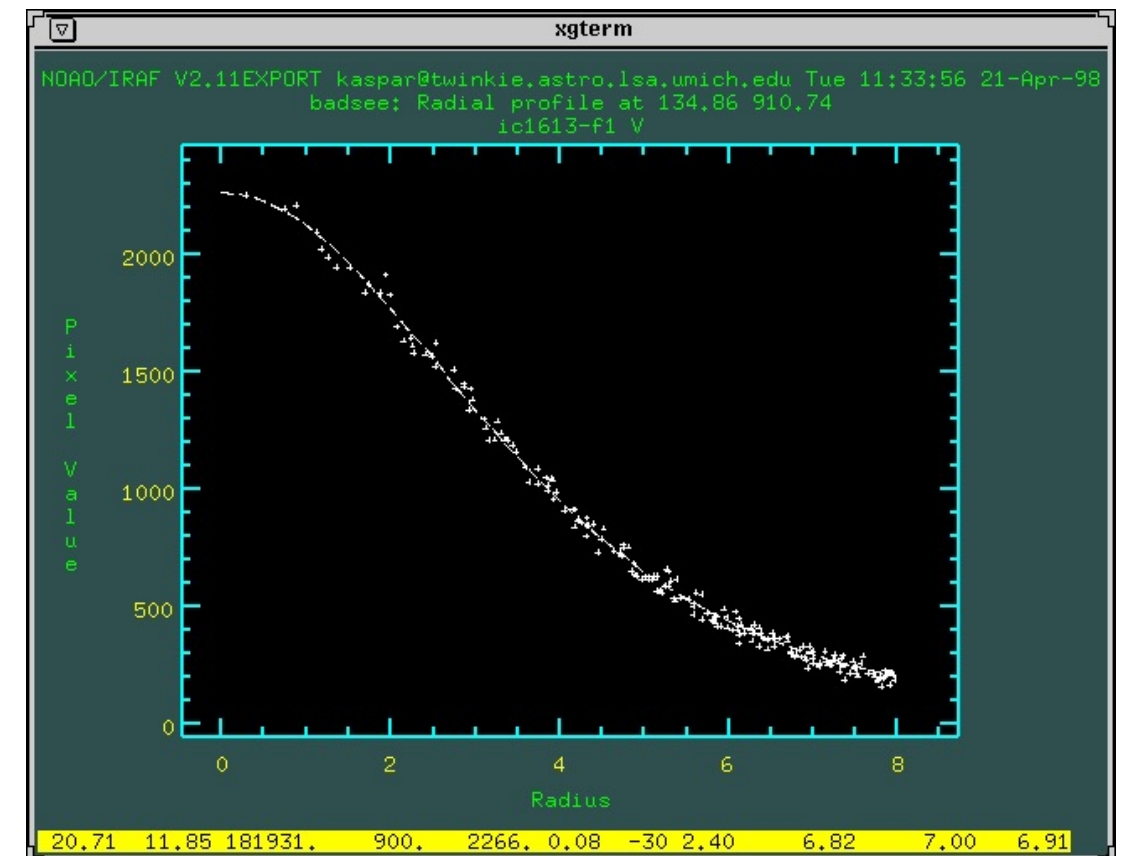
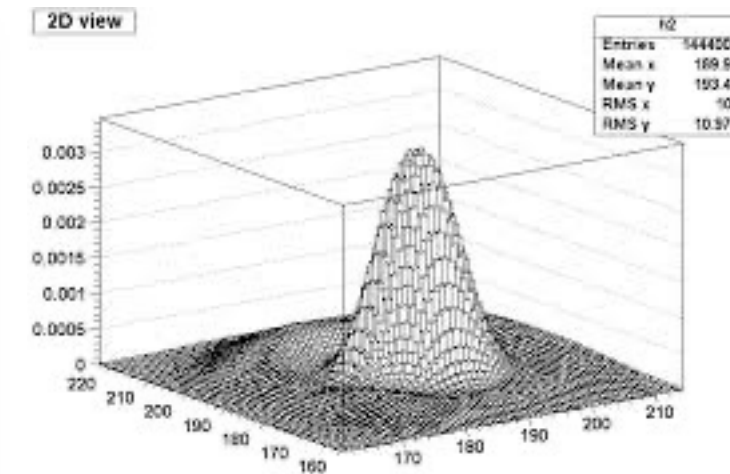
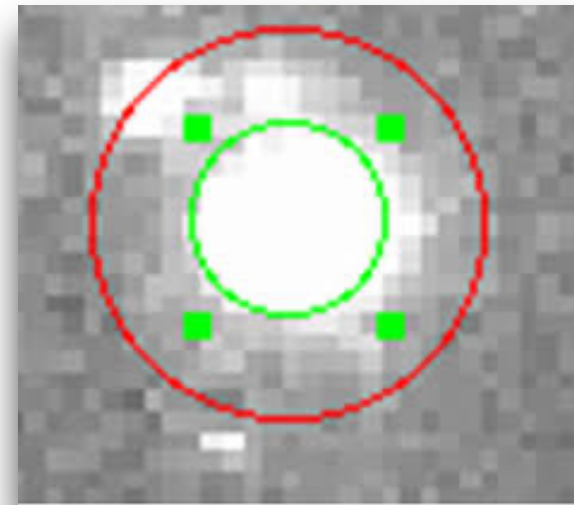
$(\alpha_{\text{ref}}, \delta_{\text{ref}})$

Cálculo de la soln.
astrométrica
(e.g. CM1, Stock & Abad 1988,
WCS Tools, astrometry.net, etc.)

Aplicación de la soln. astrométrica a las (x_i, y_i) de los objetos detectados

Centro de las estrellas

- Necesitaremos una lista de posiciones X_i, Y_i de los centros de las estrellas en la placa
- ¿Qué reportamos como el “centro” de cada estrella?
 - ~~pixel más brillante (ruidoso, medida estadísticamente inestable)~~
 - Centroide:
 - posición X, Y pesada por flujo (nro. de cuentas)
 - **ajuste de la PSF de cada estrella** (usualmente una gaussiana)

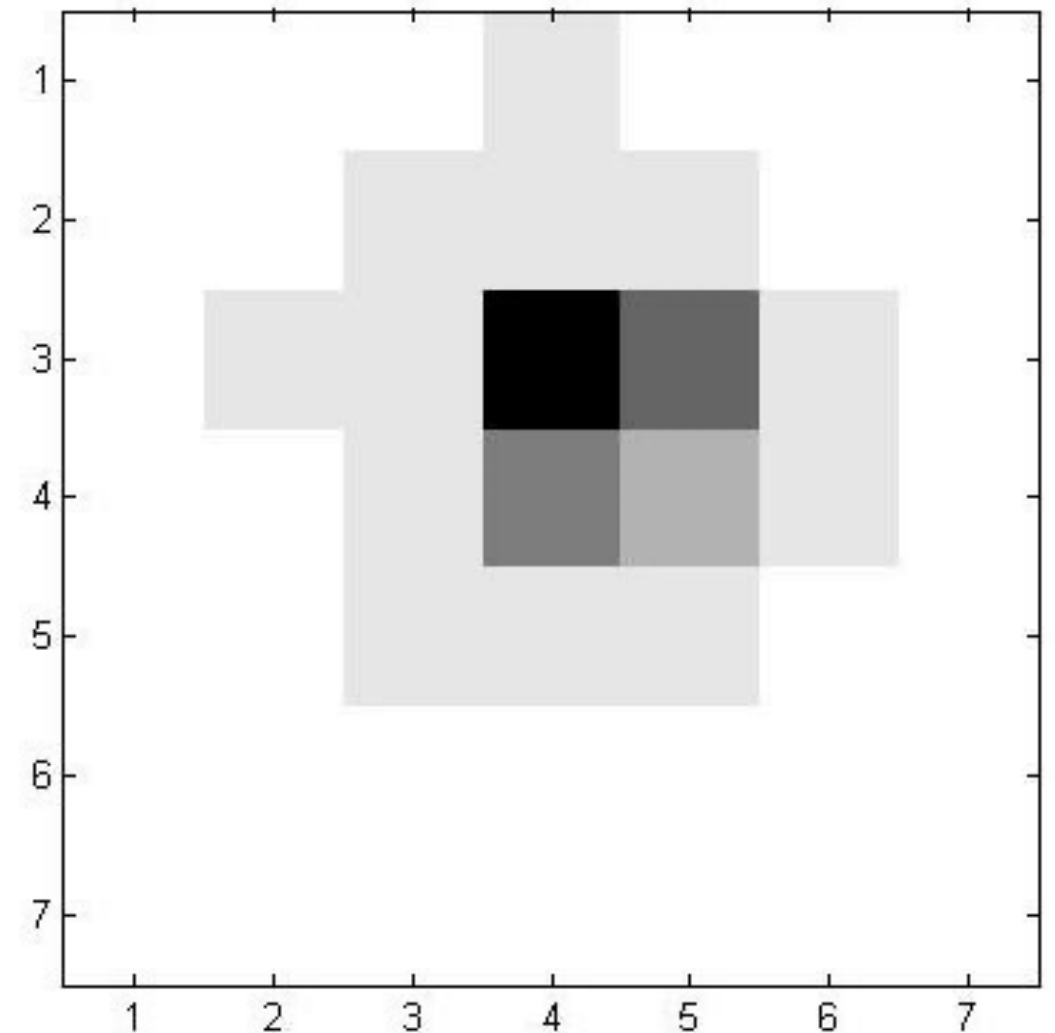


Cálculo del centroide

Cálculo del centro de masas

$$x_c = \frac{\sum_i x_i \left(\sum_j I_{ij} \right)}{\sum_i \sum_j I_{ij}}$$

$$y_c = \frac{\sum_j y_j \left(\sum_i I_{ij} \right)}{\sum_i \sum_j I_{ij}}$$



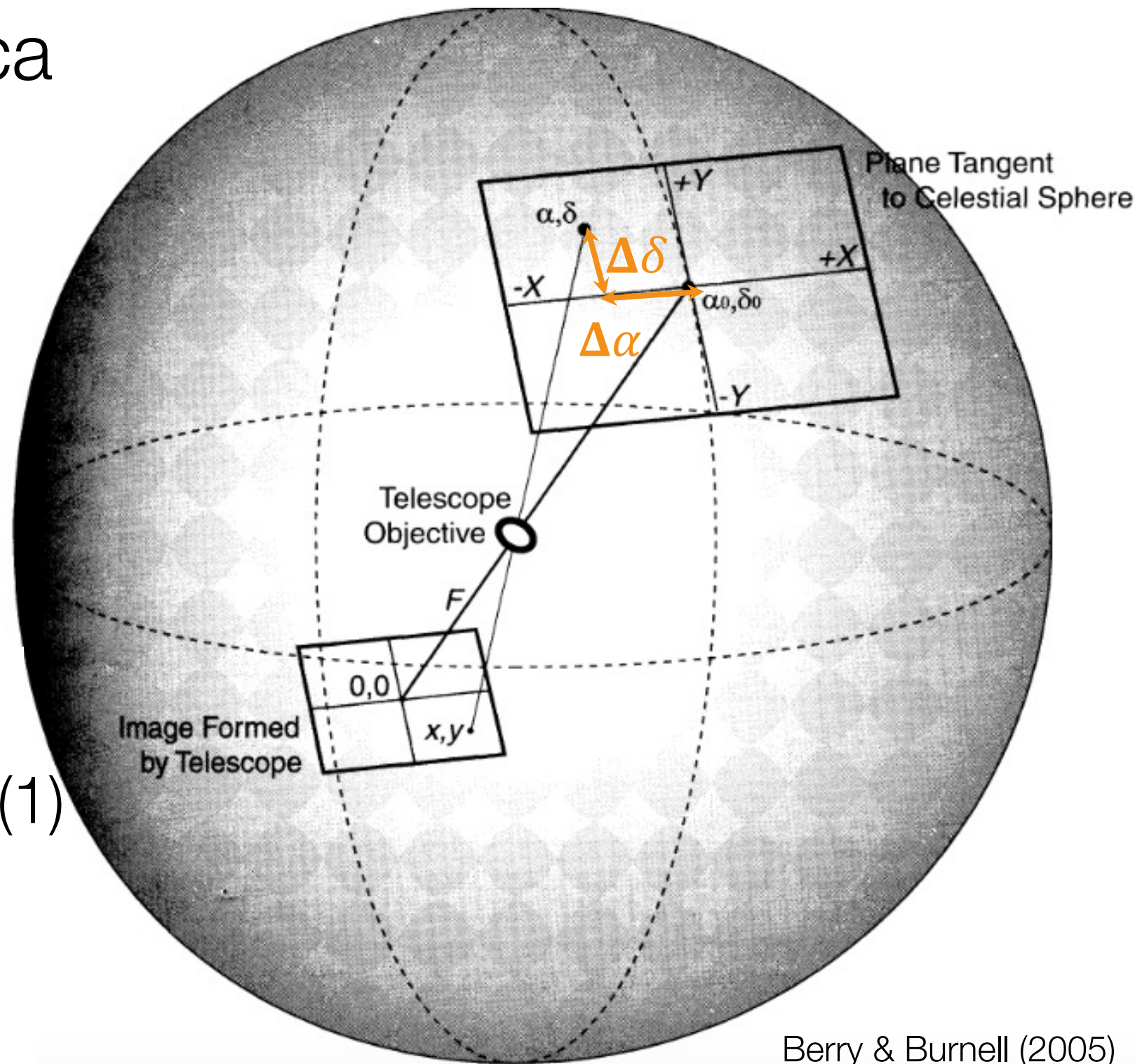
$$x_c = 4.25 \quad y_c = 3.31$$

Solución Astrométrica

- Proyección gnomónica o tangente del campo de visión del telescopio (lo que llamamos intuitivamente el plano del cielo):
 - paso α, δ en la esfera a X,Y en el plano tangente:

$$\begin{aligned} X &= \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta} \\ Y &= \frac{\sin \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) - \cos \delta_0 \sin \delta}{\cos \delta_0 \cos \delta \cos(\alpha - \alpha_0) + \sin \delta_0 \sin \delta} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \arctan\left(\frac{X}{\cos \delta_0 - Y \sin \delta_0}\right) \\ \delta &= \arcsin\left(\frac{\sin \delta_0 + Y \cos \delta_0}{\sqrt{1 + X^2 + Y^2}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$



Berry & Burnell (2005)

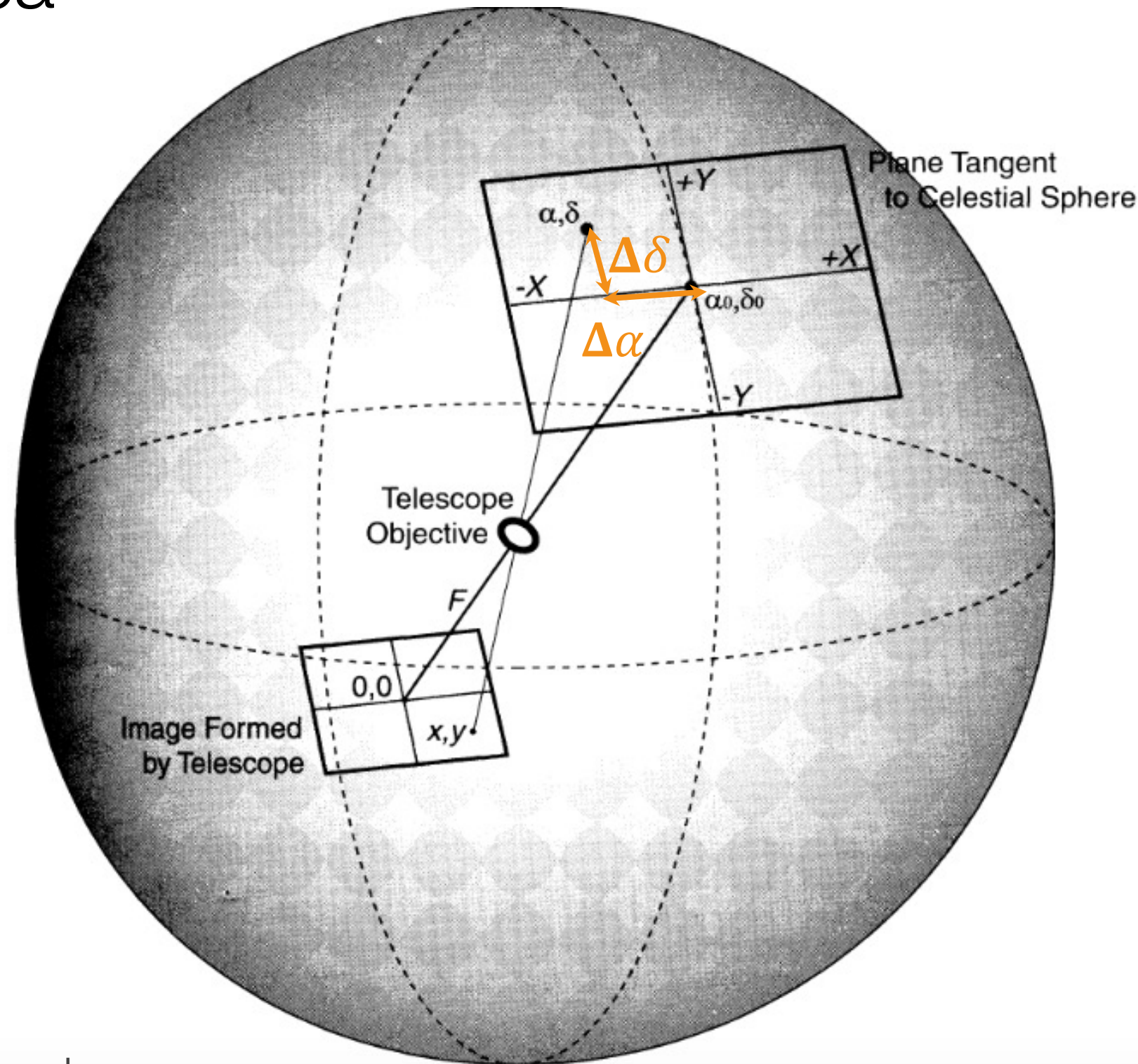
NOTA: en la literatura astrométrica muchas veces se denotan X,Y como u,v o u,v,w en el caso general en 3D

Solución Astrométrica

- Proyección gnomónica o tangente del campo de visión del telescopio (lo que llamamos intuitivamente el plano del cielo):
 - en la aprox. de campo pequeño, el sistema óptico transforma X, Y a x, y en el plano focal del telescopio simplemente a través de :

$$X = x/F$$
$$Y = y/F$$

- pero, en general la cosa no es tan taaaan simple porque aquí asumimos que los ejes X, Y son paralelos a x, y ...

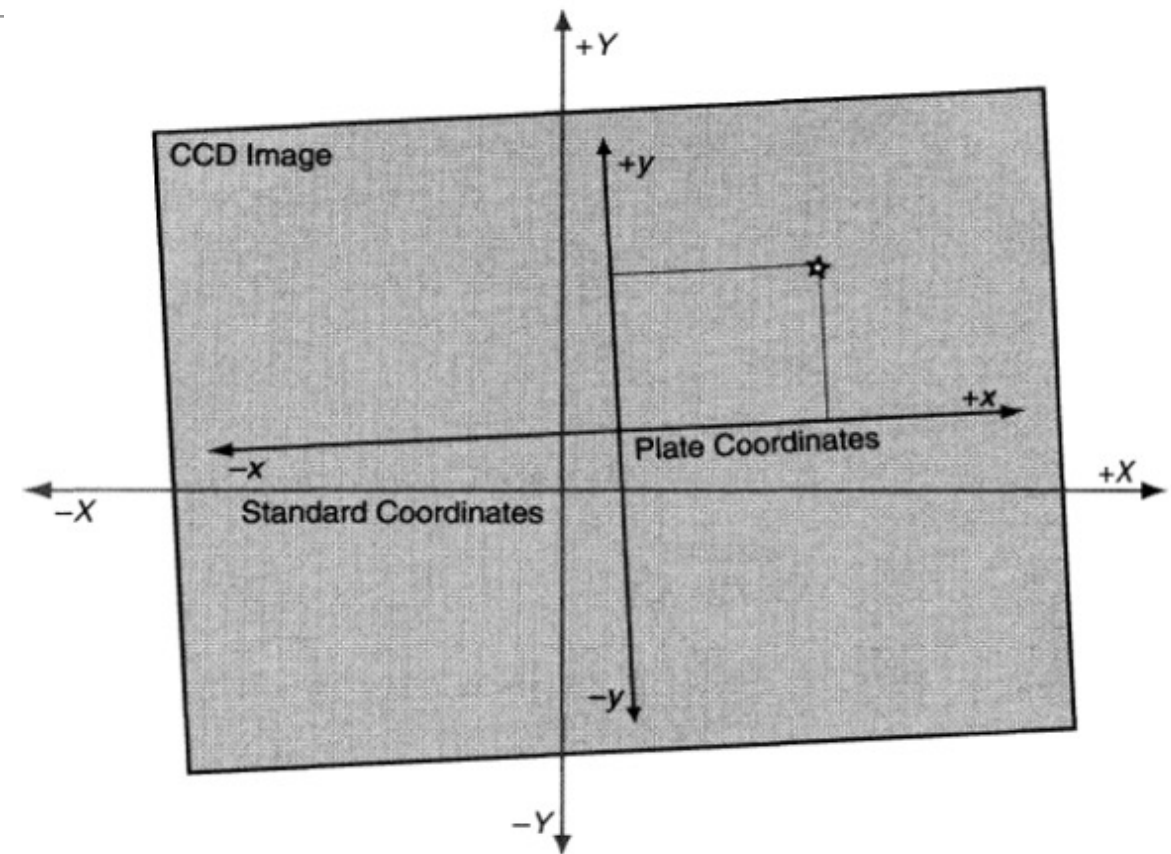


Solución Astrométrica

- en el caso más general puede haber **rotación del campo**, **traslación del centro** del campo y la distancia focal F puede no ser exactamente la que creemos. En ese caso tenemos:

$$X = \frac{\cos \rho}{F} x - \frac{\sin \rho}{F} y - \frac{x_{\text{offset}}}{F}$$

$$Y = \frac{\sin \rho}{F} x - \frac{\cos \rho}{F} y - \frac{y_{\text{offset}}}{F}$$



Berry & Burnell (2005)

- o en notación matricial

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \underbrace{\frac{1}{F}}_{\text{cambio de escala}} \left[\underbrace{\begin{pmatrix} \cos \rho & -\sin \rho \\ \sin \rho & -\cos \rho \end{pmatrix}}_{\text{rotación}} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} - \underbrace{\begin{pmatrix} x_{\text{offset}} \\ y_{\text{offset}} \end{pmatrix}}_{\text{traslación}} \right]$$

Solución Astrométrica

- esto se escribe en general como:

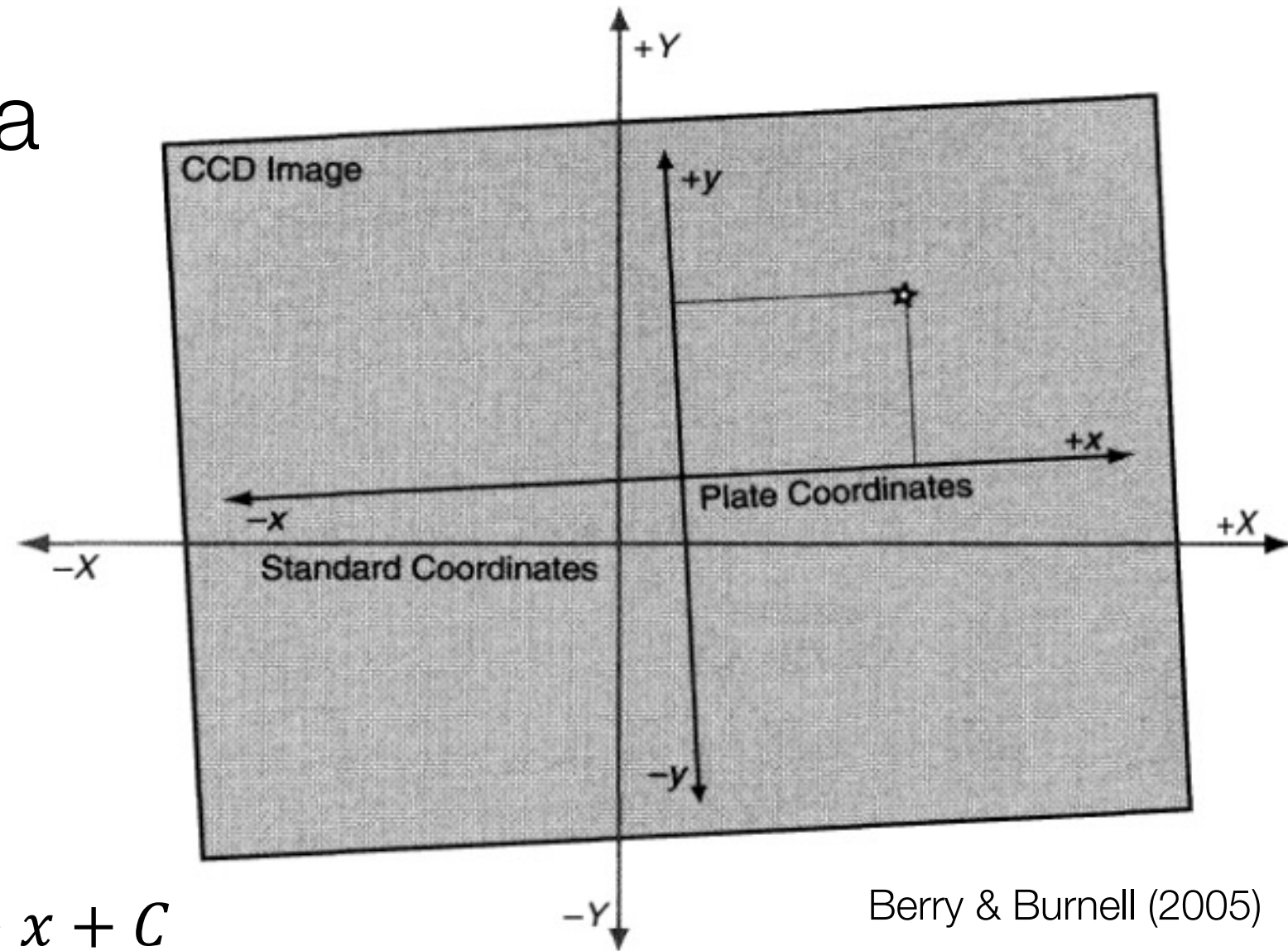
$$\begin{aligned} X &= ax + by + c \\ Y &= dx + ey + f. \end{aligned} \quad (3)$$

- o en notación matricial

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ d & e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c \\ f \end{pmatrix} = A \cdot x + C$$

- Las constantes a, b, c, d, e, f se llaman *constantes de placa* -> encontrando éstas podemos pasar de x, y a X, Y y de ahí a α, δ con las ecuaciones (2)

$$\begin{aligned} X_i &= ax_i + by_i + c \approx \alpha_i \\ Y_i &= dx_i + ey_i + f \approx \delta_i \end{aligned}$$



Berry & Burnell (2005)

para un campo pequeño, ec(2) =>
 $X_i, Y_i \approx \alpha_i, \delta_i$

Solución Astrométrica

- esto se escribe en general como:

$$X = ax + by + c$$
$$Y = dx + ey + f.$$

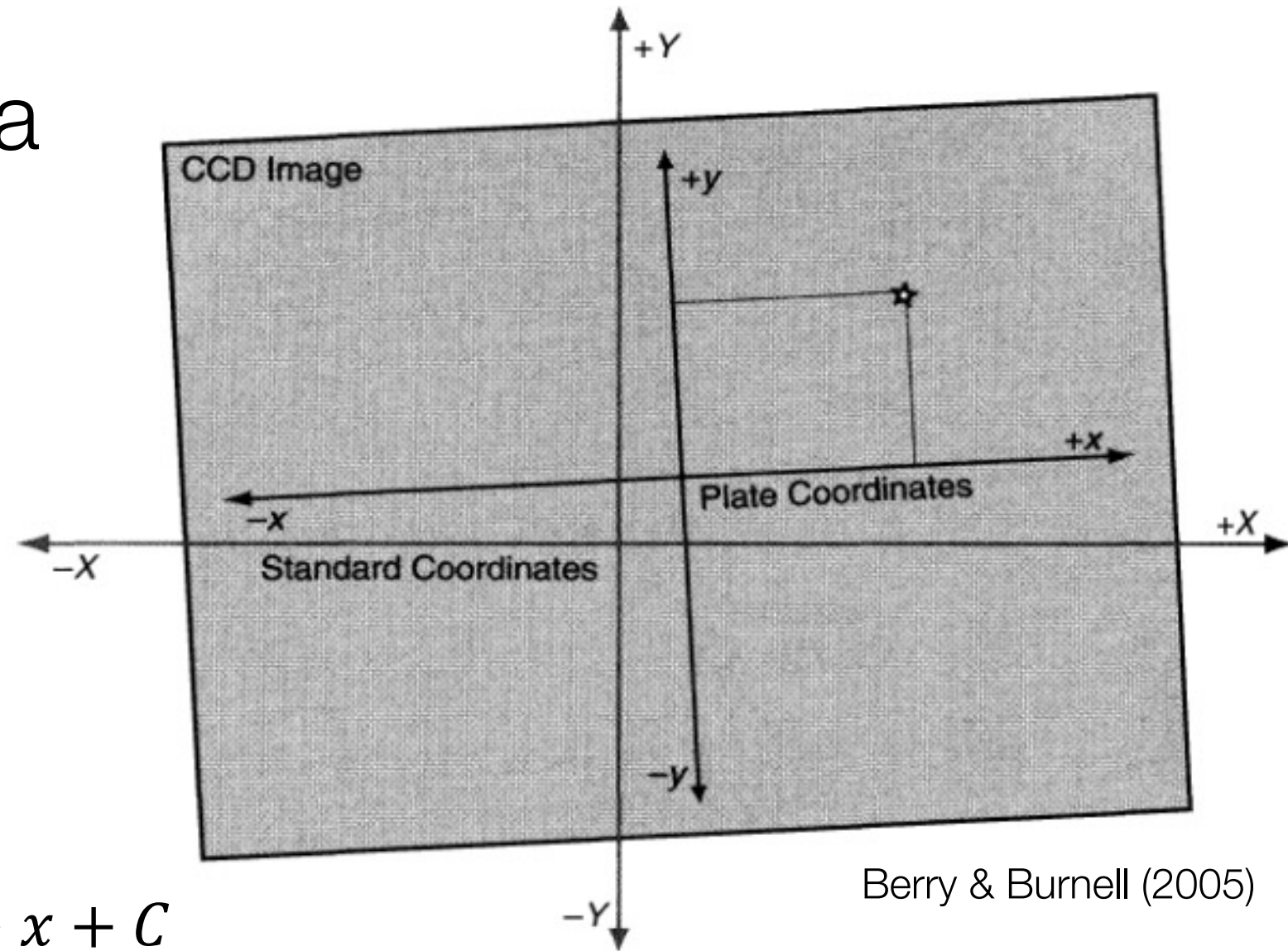
- o en notación matricial

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ d & e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c \\ f \end{pmatrix} = A \cdot x + C$$

- así, para N estrellas tenemos 2N ecuaciones y 6 incógnitas (a,b,c,d,e,f):

$$\alpha_i \approx X_i = ax_i + by_i + c$$

$$\delta_i \approx Y_i = dx_i + ey_i + f$$



- con 3 estrellas se resuelve exactamente
- con $N > 3$ se resuelve por mínimos cuadrados

World Coordinate System - Convención FITS

- Estándar FITS para World Coordinate System (WCS) ó Sistema de Coordenadas Mundo: sistema de keywords de las cabeceras FITS que definen la transformación de coordenadas CCD (x,y) a coordenadas celestes (e.g. RA,DEC)
- El estándar FITS se definió originalmente (Wells, Greisen & Harden 1981) para transformaciones lineales
- Las constantes de placa se guardan en keywords reservados con nombres estándar:

```
COMMENT --Start of Astrometry.net WCS solution--
COMMENT --Put in by the new-wcs program--
COMMENT
WCSAXES = 2 / no comment
CTYPE1 = 'RA---TAN' / TAN (gnomic) projection
CTYPE2 = 'DEC--TAN' / TAN (gnomic) projection
EQUINOX = 2000.0 / Equatorial coordinates definition (yr)
LONPOLE = 180.0 / no comment
LATPOLE = 0.0 / no comment
CRVAL1 = 14.132964192 / RA of reference point
CRVAL2 = 5.56320364588 / DEC of reference point
CRPIX1 = 735.922805786 / X reference pixel
CRPIX2 = 590.635486603 / Y reference pixel
CUNIT1 = 'deg' / X pixel scale units
CUNIT2 = 'deg' / Y pixel scale units
CD1_1 = -0.000161034462187 / Transformation matrix
CD1_2 = 9.21264316954E-06 / no comment
CD2_1 = 9.21264316954E-06 / no comment
CD2_2 = 0.000161034462187 / no comment
IMAGEW = 1536 / Image width, in pixels.
IMAGEH = 1024 / Image height, in pixels.
```

WCS - Transformación Lineal

- Ecuaciones para la transformación lineal con proyección tangente:

CTYPE1 = 'RA---TAN-SIP'

proyección tangente

CTYPE2 = 'DEC---TAN'

WCSAXES =
 CTYPE1 =
 CTYPE2 =
 EQUINOX =
 LONPOLE =
 LATPOLE =
 CRVAL1 =
 CRVAL2 =
 CRPIX1 =
 CRPIX2 =
 CUNIT1 =
 CUNIT2 =
 CD1_1 =
 CD1_2 =
 CD2_1 =
 CD2_2 =
 IMAGEW =
 IMAGEH =

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CD1_1 & CD1_2 \\ CD2_1 & CD2_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - CRPIX1 \\ y - CRPIX2 \end{pmatrix}$$

“intermediate world
 coordinates” en grados, con
 origen en CRVAL1,CRVAL2

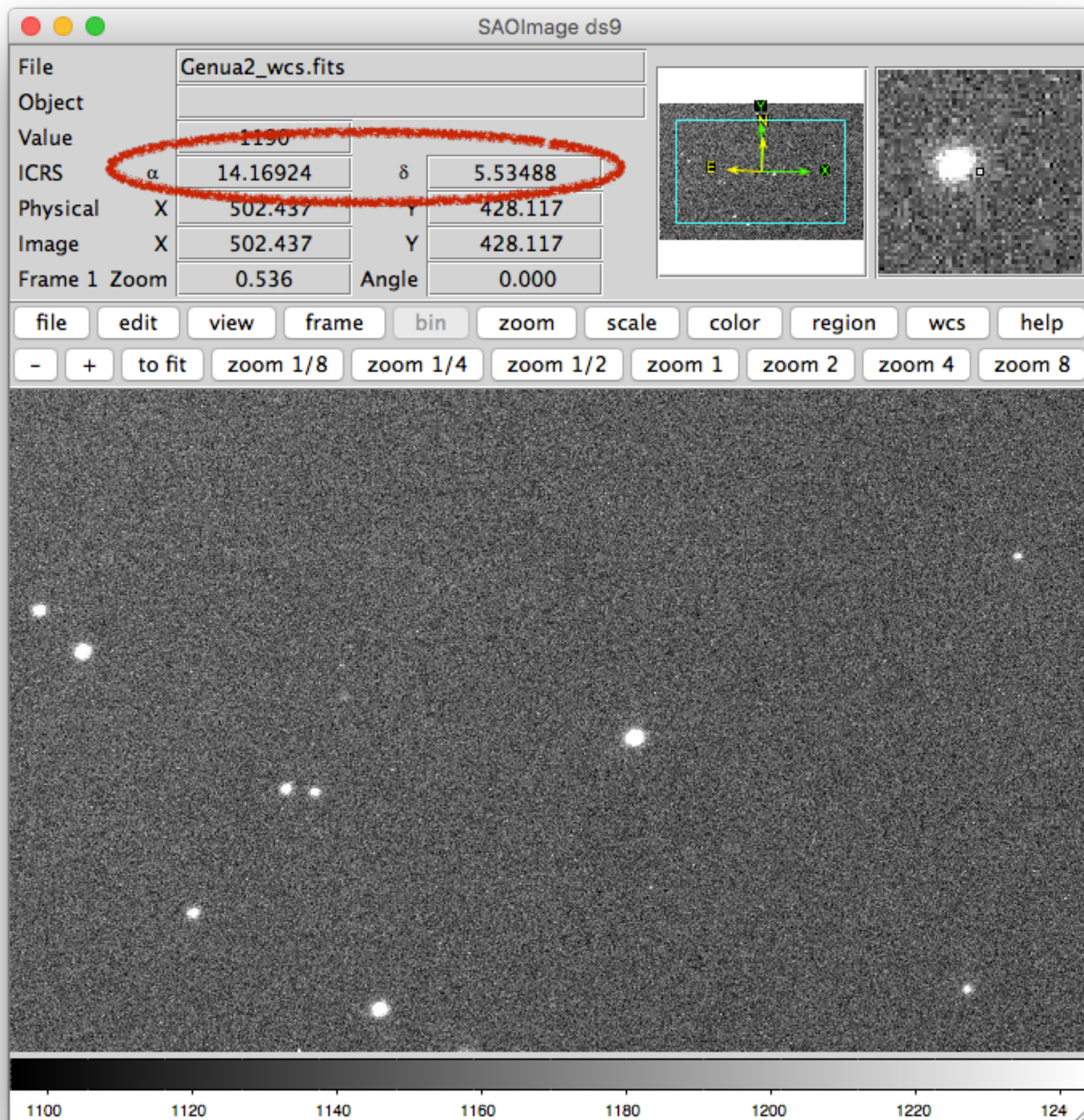
“relative pixel coordinates” =
 coordenadas relativas en píxeles,
 con origen en CRPIX1,CRPIX2

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CRVAL1 + \frac{\Delta\alpha}{\cos CRVAL2} \\ CRVAL2 + \Delta\delta \end{pmatrix}$$

- x,y <- coordenadas en píxeles sobre el CCD

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_o + \Delta\alpha / \cos \delta_o \\ \delta &= \delta_o + \Delta\delta \end{aligned}$$

imagen con
cabecera
WCS
(esto también
funciona en
MaxImDL)



Notas sobre la astrometría

- Las soluciones astrométricas que obtenemos con estos métodos son de precisión relativamente baja (décimas o centésimas de "). Son útiles e.g. para:
 - reconocer estrellas de nuestro catálogo en otros catálogos o sondeos
 - reportar posiciones (incluyendo un tiempo preciso de observación) de objetos menores del Sistema Solar
 - medir velocidades de objetos de Sistema Solar
- Un *catálogo astrométrico* tiene mucha mayor precisión: e.g. USNO-B1, UCAC-4, PPMXL, Hipparcos, Gaia
- Son soluciones astrométricas 2D, i.e. para sólo dos parámetros que son α, δ
- La solución astrométrica más general es 5D: α, δ, ϖ (paralaje) y movimientos propios $\mu\alpha, \mu\delta$ — — — — — **Gaia!**

Soluciones de orden superior

Correcciones de órdenes superiores

- En el caso aún más general X, Y se pueden escribir como un polinomio de x, y

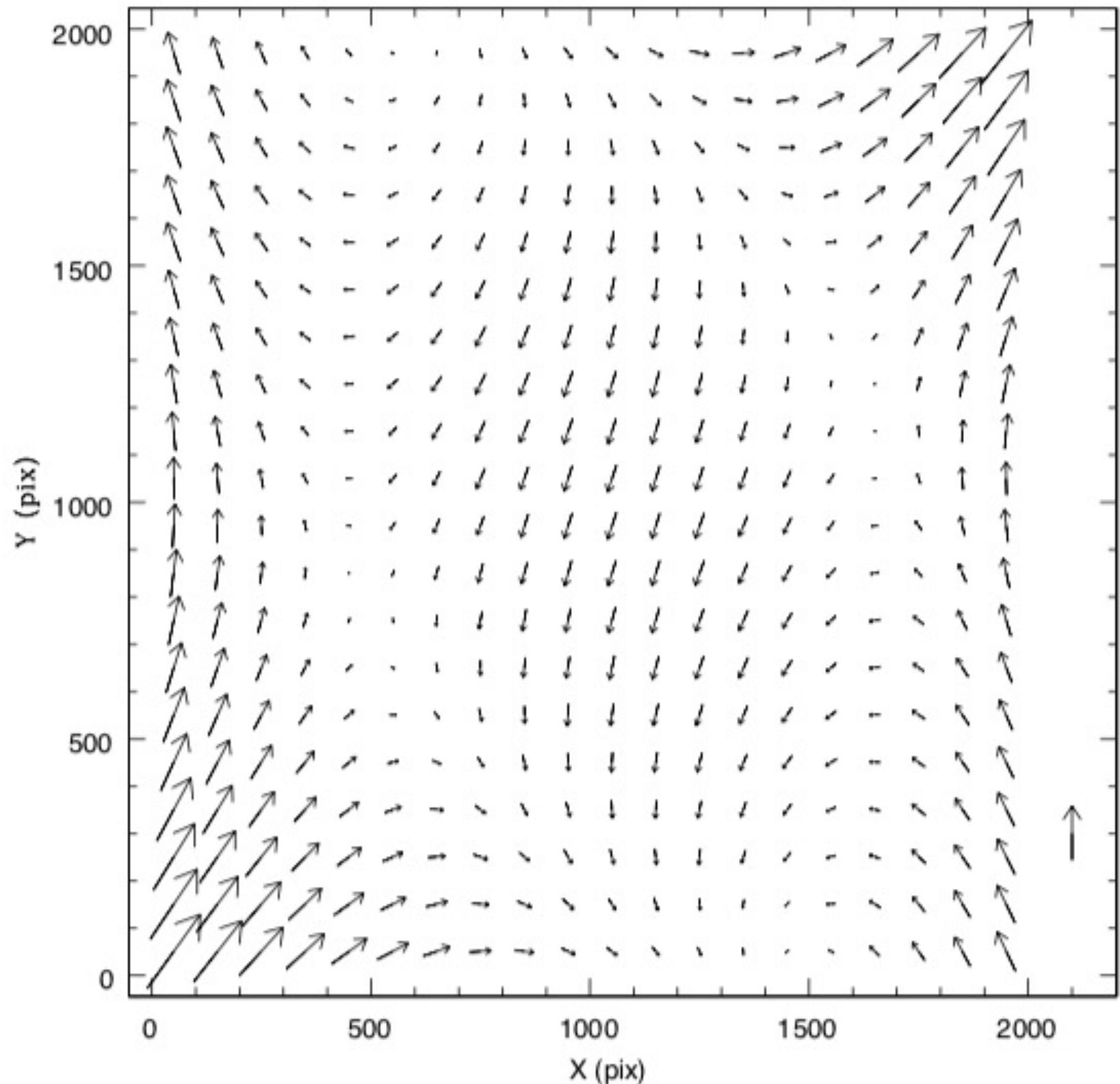
$$X = \xi = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + \dots (1)$$

$$Y = \eta = q_{00} + q_{10}x + q_{01}y + q_{20}x^2 + q_{11}xy + q_{02}y^2 + \dots (2)$$

- lo que hemos resuelto hasta ahora involucra sólo la parte lineal de estas ecuaciones
- La óptica puede introducir deformaciones dependiendo de la distancia al eje óptico o, en general, de la posición en la imagen en el plano focal
- una vez resuelta la parte lineal, **se puede hallar el campo de distorsión calculando los residuos en RA, Dec**, i.e. la diferencia de la posición de catálogo con la de la solución lineal, como función de la posición x, y en la imagen (e.g. Stock & Abad 1988)

WCS - Transformaciones de Orden Superior: **Simple Imaging Polynomial (SIP)**

- Existen varias convenciones para incluir el efecto de las distorsiones geométricas no-lineales
- El estándar **Simple Imaging Polynomial (SIP)** (Schupe et al. 2005) es de uso común y extendido
- (e.g. se usa en astrometry.net, los telescopios espaciales Spitzer, Hubble, ...)



SIP header keywords

```
CTYPE1 = 'RA---TAN-SIP' / RA---TAN with distortion
CTYPE2 = 'DEC---TAN-SIP' / DEC---TAN with distortion
CRVAL1 = 248.588845714283 / [deg] RA at CRPIX1,CRPIX2
CRVAL2 = -46.7664545714299 / [deg] DEC at CRPIX1,CRPIX2
CD1_1 = 3.79787003748175E-05
CD1_2 = 0.000336011759341397
CD2_1 = 0.000337467809645458
CD2_2 = -3.6366440945003E-05
CRPIX1 = 128.
CRPIX2 = 128.
A_ORDER = 2 / polynomial order, axis 1
A_0_2 = 1.569E-05 / distortion coefficient
A_1_1 = 5.232E-05 / distortion coefficient
A_2_0 = 3.31E-05 / distortion coefficient
B_ORDER = 2 / polynomial order, axis 2
B_0_2 = 4.172E-05 / distortion coefficient
B_1_1 = 2.213E-05 / distortion coefficient
B_2_0 = -9.819E-07 / distortion coefficient
AP_ORDER= 2 / polynomial order, axis 1
AP_0_1 = 5.677E-05 / distortion coefficient
AP_0_2 = -1.569E-05 / distortion coefficient
AP_1_0 = 5.871E-05 / distortion coefficient
AP_1_1 = -5.231E-05 / distortion coefficient
AP_2_0 = -3.309E-05 / distortion coefficient
BP_ORDER= 2 / polynomial order, axis 2
BP_0_1 = 4.432E-05 / distortion coefficient
BP_0_2 = -4.172E-05 / distortion coefficient
BP_1_0 = 2.091E-05 / distortion coefficient
BP_1_1 = -2.213E-05 / distortion coefficient
BP_2_0 = 9.814E-07 / distortion coefficient
```

Simple Imaging Polynomial (SIP)

- Las distorsiones se corrigen mediante términos polinómicos en la transformación:

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{CD1_1} & \text{CD1_2} \\ \text{CD2_1} & \text{CD2_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u + f(u, v) \\ v + g(u, v) \end{pmatrix}$$

donde

$$f(u, v) = \sum_{p,q} A_{p,q} u^p v^q, \quad p + q \leq A_ORDER,$$

$$g(u, v) = \sum_{p,q} B_{p,q} u^p v^q, \quad p + q \leq B_ORDER.$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - CRPIX1 \\ y - CRPIX2 \end{pmatrix}$$

- x, y <- coordenadas en píxeles sobre el CCD
- u, v <- coordenadas relativas en píxeles sobre el CCD, i.e. origen en el píxel de referencia CRPIXi

Simple Imaging Polynomial (SIP)

- Las distorsiones se corrigen mediante términos polinómicos en la transformación:

$$\begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{CD1_1} & \text{CD1_2} \\ \text{CD2_1} & \text{CD2_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u + f(u, v) \\ v + g(u, v) \end{pmatrix}$$

donde

$$f(u, v) = \sum_{p,q} A_{p,q} u^p v^q, \quad p + q \leq \text{A_ORDER},$$

$$g(u, v) = \sum_{p,q} B_{p,q} u^p v^q, \quad p + q \leq \text{B_ORDER}.$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - \text{CRPIX1} \\ y - \text{CRPIX2} \end{pmatrix}$$

A_{p,q} y **B_{p,q}** son los coeficientes del polinomio para la transformación **directa**
x,y -> RA,DEC

- x,y <- coordenadas en píxeles sobre el CCD
- u,v <- coordenadas relativas en píxeles sobre el CCD, i.e. origen en el píxel de referencia CRPIXi

Simple Imaging Polynomial (SIP)

- en el header se dan también los coeficientes para la transformación inversa

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = CD^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\delta \end{pmatrix}$$

$$u = U + F(U, V) = U + \sum_{p,q} AP_p_q U^p V^q, \quad p + q \leq AP_ORDER,$$

$$v = V + G(U, V) = V + \sum_{p,q} BP_p_q U^p V^q, \quad p + q \leq BP_ORDER.$$

donde

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x - CRPIX1 \\ y - CRPIX2 \end{pmatrix}$$

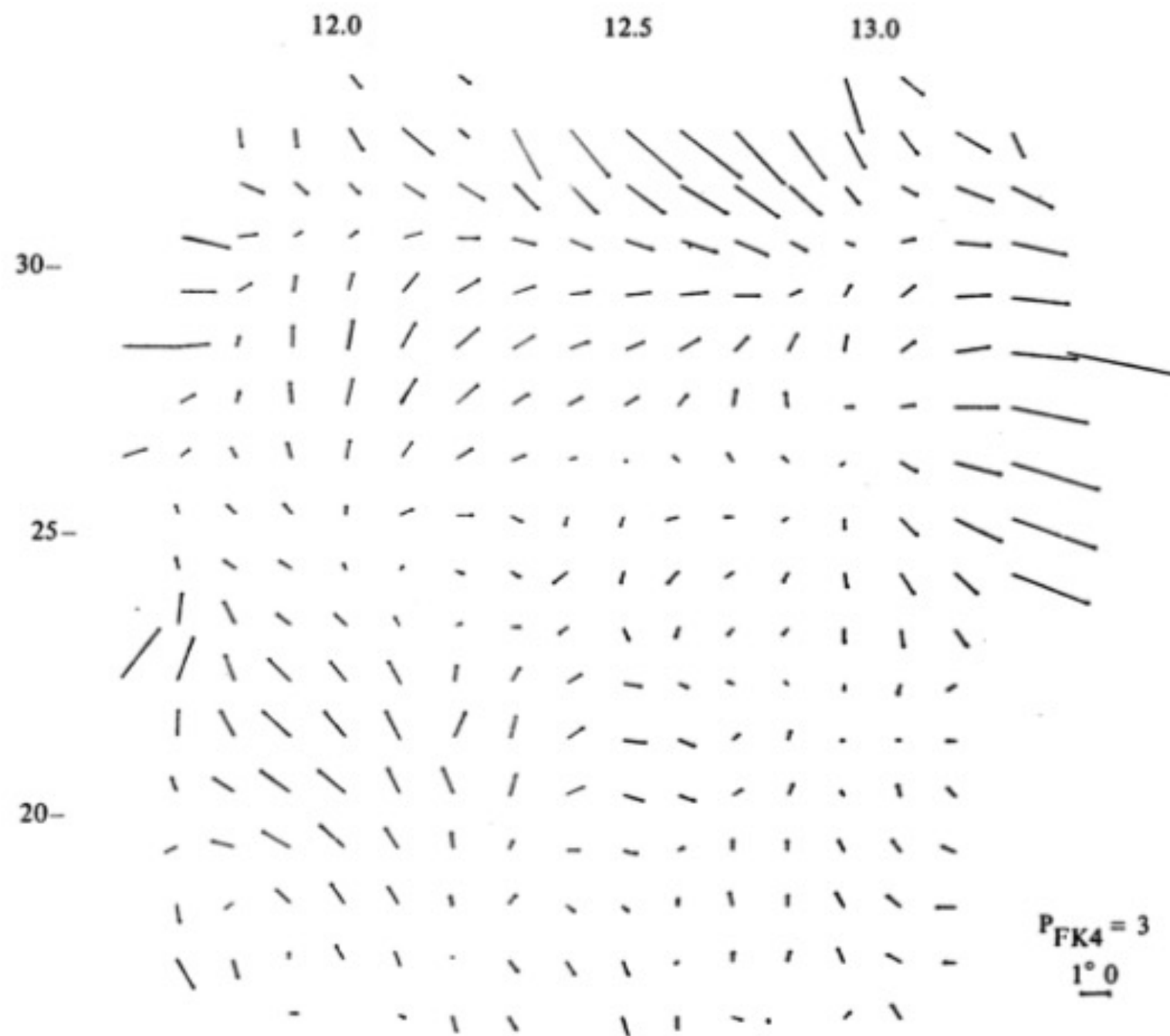
AP_p_q y **BP_p_q** son los coeficientes del polinomio para la transformación ***inversa***
RA,DEC -> x,y

- x,y <- coordenadas en píxeles sobre el CCD
- u,v <- coordenadas relativas en píxeles sobre el CCD, i.e. origen en el píxel de referencia CRPIXi

SIP header keywords

```
CTYPE1 = 'RA---TAN-SIP' / RA---TAN with distortion
CTYPE2 = 'DEC---TAN-SIP' / DEC---TAN with distortion
CRVAL1 = 248.588845714283 / [deg] RA at CRPIX1,CRPIX2
CRVAL2 = -46.7664545714299 / [deg] DEC at CRPIX1,CRPIX2
CD1_1 = 3.79787003748175E-05
CD1_2 = 0.000336011759341397
CD2_1 = 0.000337467809645458
CD2_2 = -3.6366440945003E-05
CRPIX1 = 128.
CRPIX2 = 128.
A_ORDER = 2 / polynomial order, axis 1
A_0_2 = 1.569E-05 / distortion coefficient
A_1_1 = 5.232E-05 / distortion coefficient
A_2_0 = 3.31E-05 / distortion coefficient
B_ORDER = 2 / polynomial order, axis 2
B_0_2 = 4.172E-05 / distortion coefficient
B_1_1 = 2.213E-05 / distortion coefficient
B_2_0 = -9.819E-07 / distortion coefficient
AP_ORDER= 2 / polynomial order, axis 1
AP_0_1 = 5.677E-05 / distortion coefficient
AP_0_2 = -1.569E-05 / distortion coefficient
AP_1_0 = 5.871E-05 / distortion coefficient
AP_1_1 = -5.231E-05 / distortion coefficient
AP_2_0 = -3.309E-05 / distortion coefficient
BP_ORDER= 2 / polynomial order, axis 2
BP_0_1 = 4.432E-05 / distortion coefficient
BP_0_2 = -4.172E-05 / distortion coefficient
BP_1_0 = 2.091E-05 / distortion coefficient
BP_1_1 = -2.213E-05 / distortion coefficient
BP_2_0 = 9.814E-07 / distortion coefficient
```

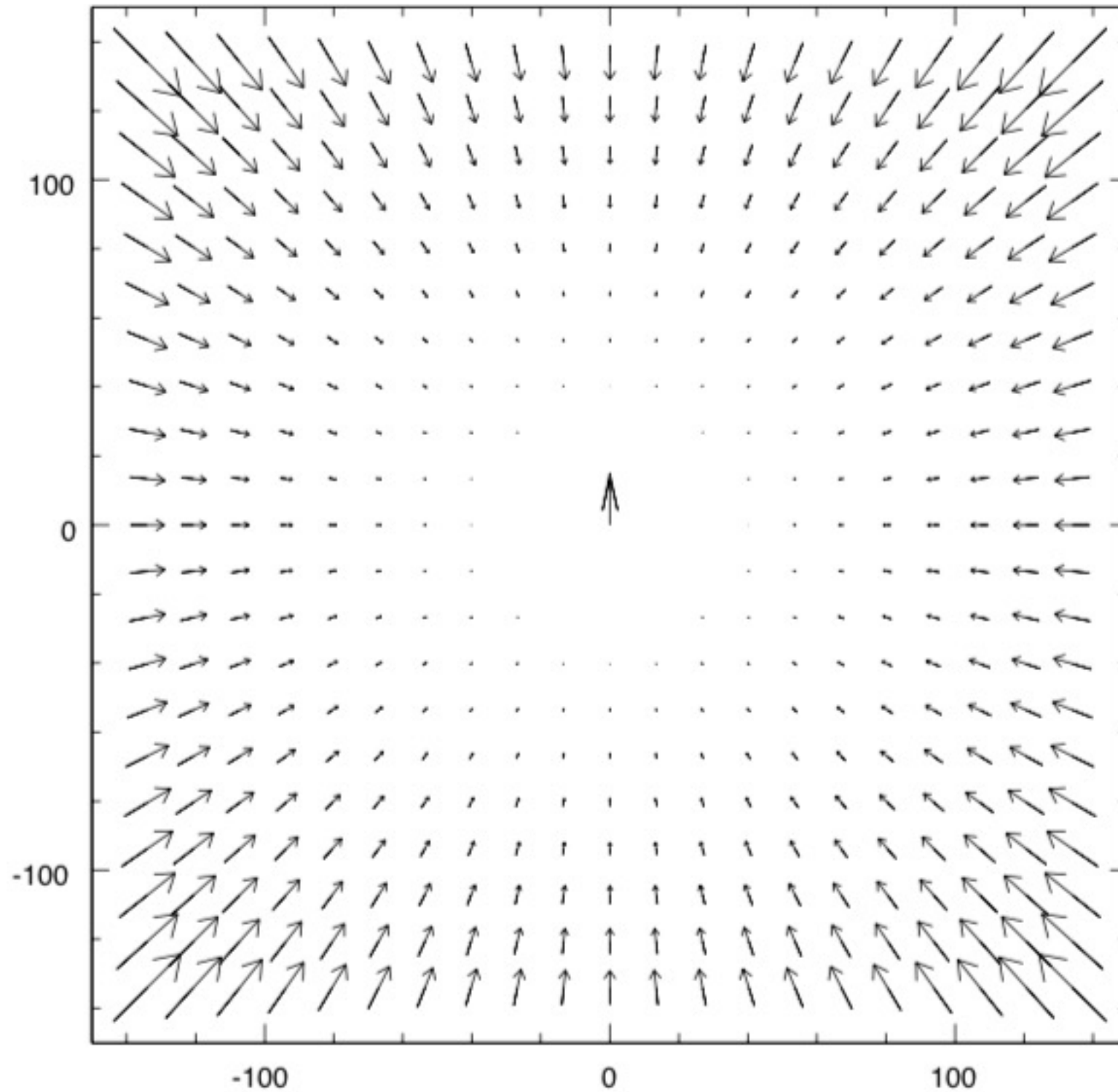

Patrones de distorsión



- se calcula la media de los residuos para cada posición x,y sobre la imagen en un entorno dado (e.g. 30" — 100" en un campo de 0.5°)
- se aplica esta corrección a las estrellas en ese entorno de la posición x,y

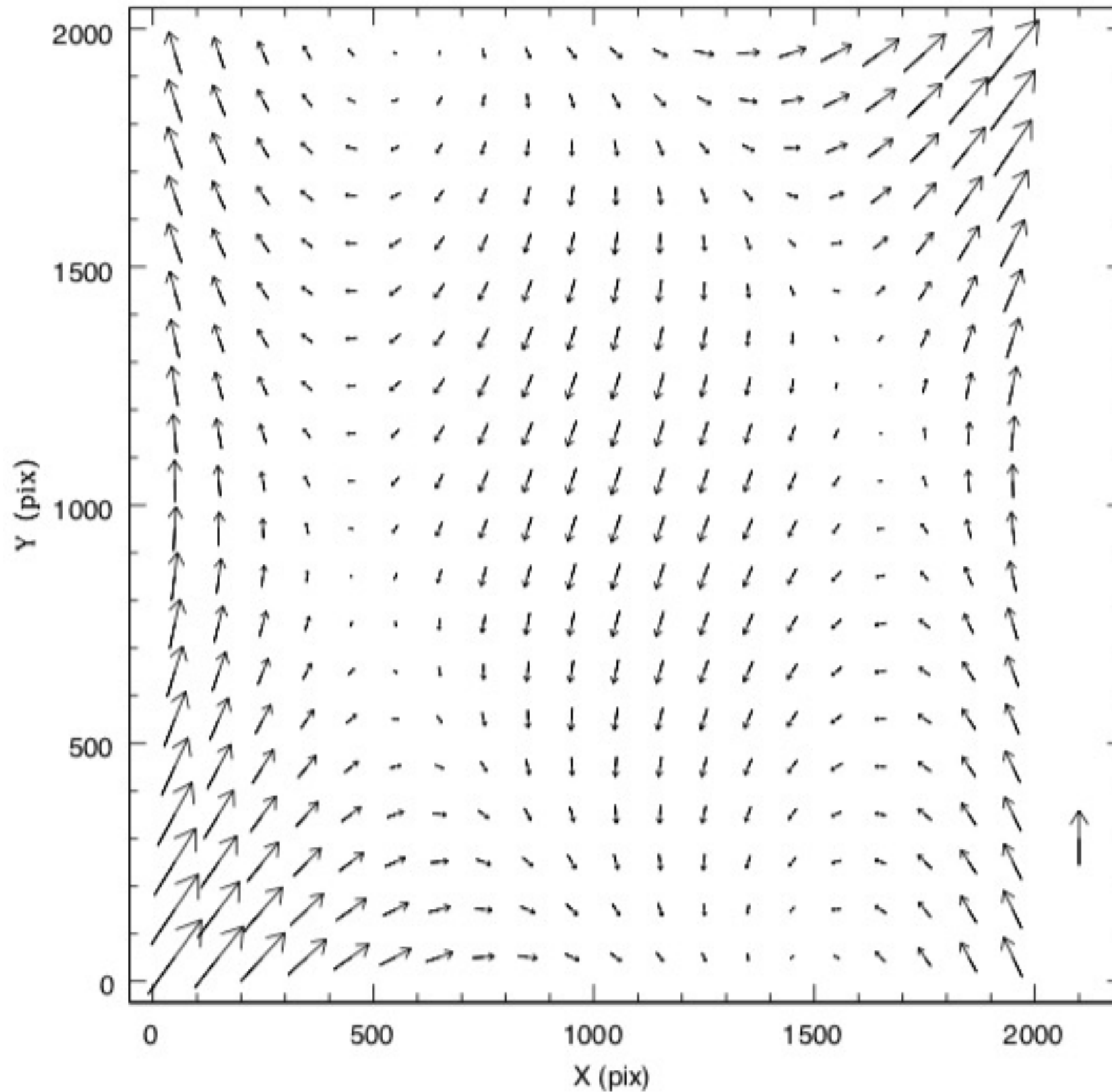
Fig. 1. Representación de los errores sistemáticos entre catálogos AGK3 y FK4 al promediar por zonas de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ las posiciones de las estrellas obtenidas en la reducción del área 1a.

Patrones de distorsión (=parte no-lineal)



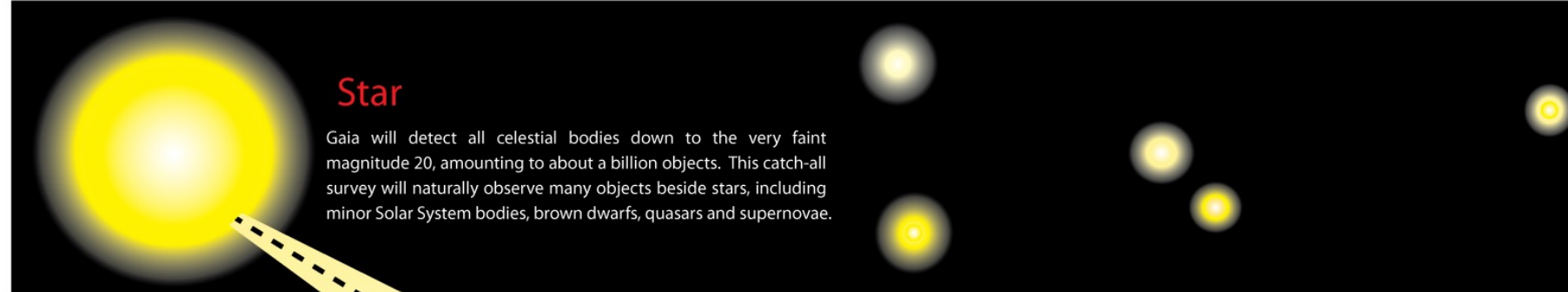
distorsión de barril

Patrones de distorsión (=parte no-lineal)



Catálogos estelares anteriores

- Catálogos estelares sin movimientos propios de las estrellas:
 - [USNO-SA2.0](#), 54 millones de objetos, extraído del catálogo USNO-A2.0, de estrellas entre mag. 16 y 19 con colores solares. Se distribuye en un CD.
 - [USNO-A2.0](#) completo, mas de 526 millones de objetos. Ocupa 10 CDs. Se puede bajar por ftp.
 - [Hubble Space Telescope's Guide Star Catalogue \(GSC\)](#), contiene cerca de 18 millones de objetos. Mala precisión astrométrica.
- Catálogos estelares con movimientos propios de las estrellas, mejor precisión astrométrica que los anteriores, pero mucho menor número de estrellas:
 - [Tycho 2](#) contiene 2.5 millones de estrellas.
 - [ACT Reference Catalog](#) contiene 988758 estrellas.
 - [UCAC 4 \(U.S.N.O. CCD Astrograph Catalog\)](#) contiene 48 millones de estrellas hasta magnitud $R = 16$, cubre el hemisferio sur y parte del norte.
 - [USNO-B1.0](#) contiene mas de 1000 millones de estrellas. Ocupa 80 GB y es de distribución limitada.

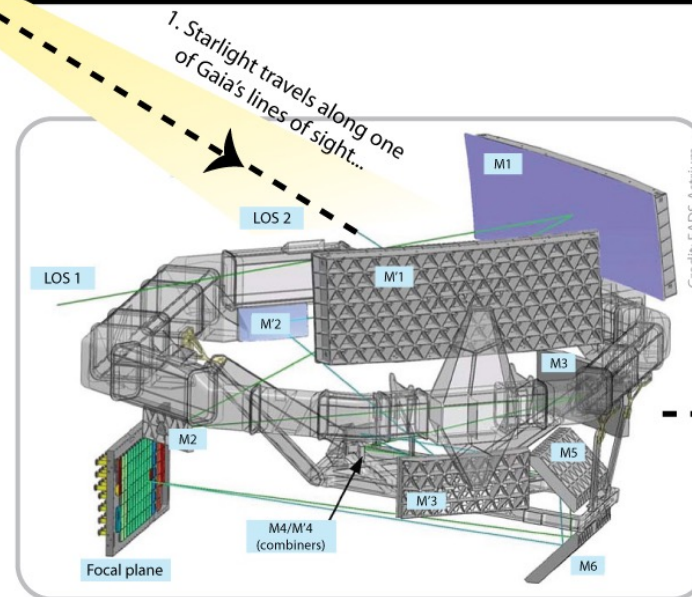


Star

Gaia will detect all celestial bodies down to the very faint magnitude 20, amounting to about a billion objects. This catch-all survey will naturally observe many objects beside stars, including minor Solar System bodies, brown dwarfs, quasars and supernovae.

Payload

Light from a celestial object enters Gaia's payload arrangement through one of the two viewing apertures, striking the large primary mirror opposite (M1 in the case pictured). The light is bounced by a series of mirrors along a total focal length of 35m. The light paths from the two viewing directions meet at the M4/M'4 beam combiner before finally reaching the shared focal plane.

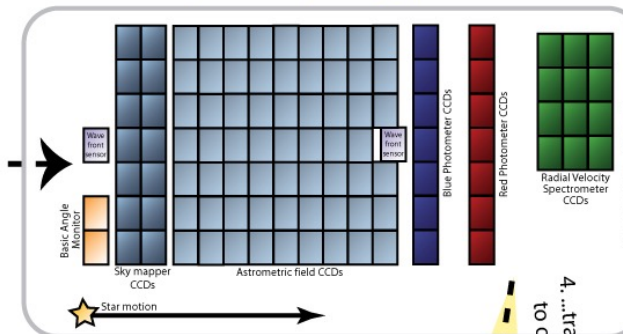


1. Starlight travels along one of Gaia's lines of sight...

2. ...enters Gaia's instruments, and is reflected along a 35m focal length to hit...

Focal plane

At the focal plane is a large mosaic of sophisticated charge-coupled devices (CCDs). Containing 106 of these light detectors, the focal plane assembly comprises a total of nearly one billion pixels - a 'gigapixel'.



3. ...the CCDs of the focal plane assembly, thereby being detected before...

4. ...transmission by low gain antenna to one of Gaia's ground stations...

2



Data Processing Centres

Following the preliminary processing, the data passes to Gaia's Data Processing Centres (DPCs). Data processing is the task of DPAC, the Data Processing and Analysis Consortium. DPAC draws its membership of about 450 scientists and developers from all over Europe; the processing itself takes place at these six DPCs.

6. ...and processed by DPAC into the final...

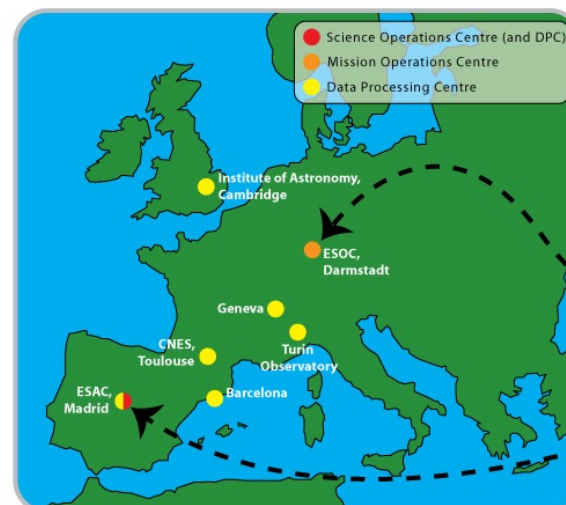
Gaia Catalogue

The final Gaia Catalogue, containing the precise astrometric, photometric and spectroscopic details of about a billion celestial objects, is scheduled for publication in 2022. Gaia's processed data will then immediately be freely available for investigation by the world's scientific community.



Science Operations Centre

Gaia's Science Operations Centre is based at ESA's European Space Astronomy Centre (ESAC) in Spain. ESAC receives all of Gaia's science telemetry for preliminary processing in the Initial Data Treatment. Also carried out here is Detailed First Look processing, Gaia's regular science 'health check'.



5. ...the telemetry is then transmitted onto the Mission and Science Operation Centres...

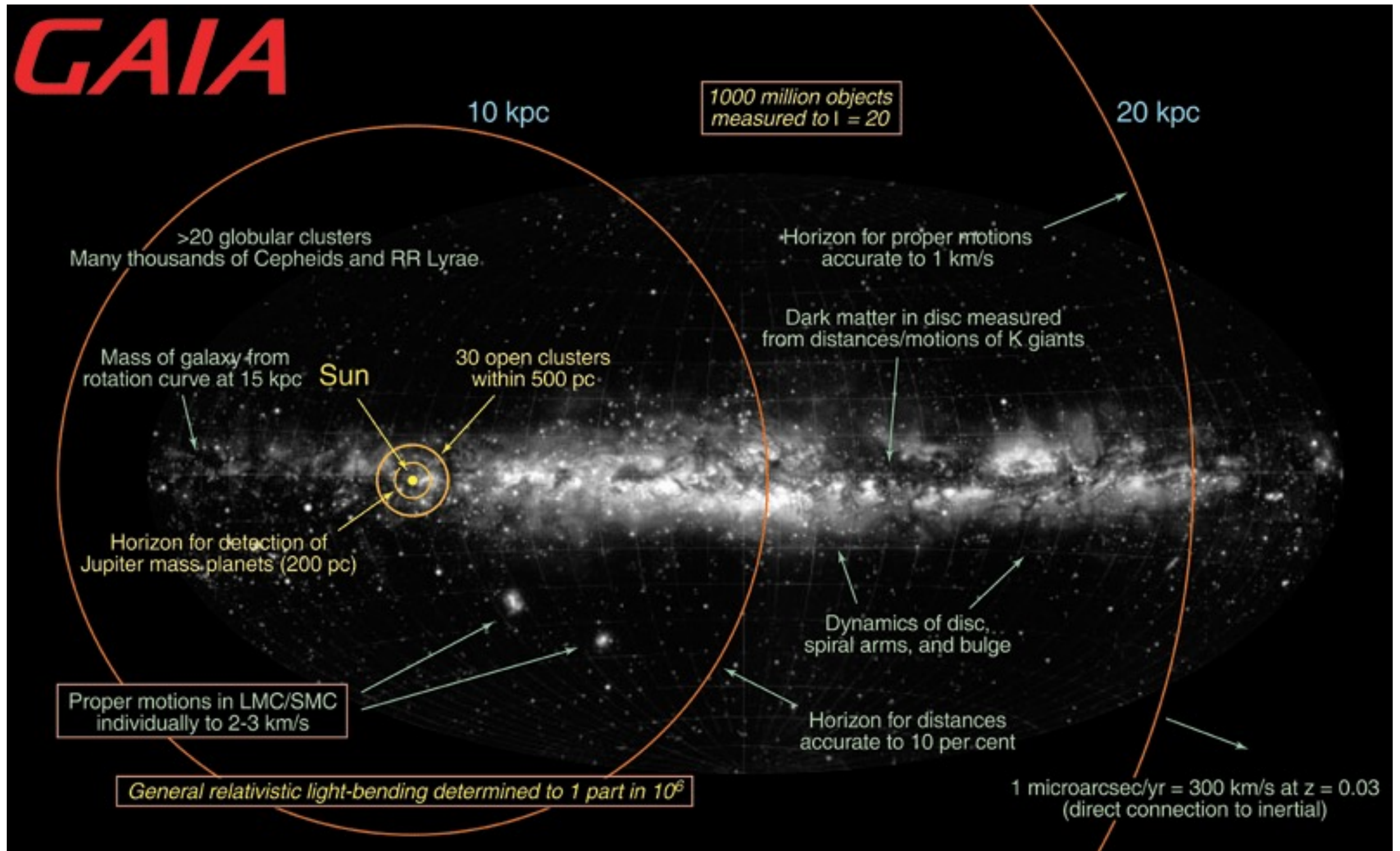


Ground station

Gaia will be making use of three ground stations, each with 35m deep space dish antennae: Cebreros in Spain, New Norcia in Australia and Malargüe in Argentina.

Catálogos estelares actuales

Gaia DR2 (ESA)



Transmission curves of Gaia filters

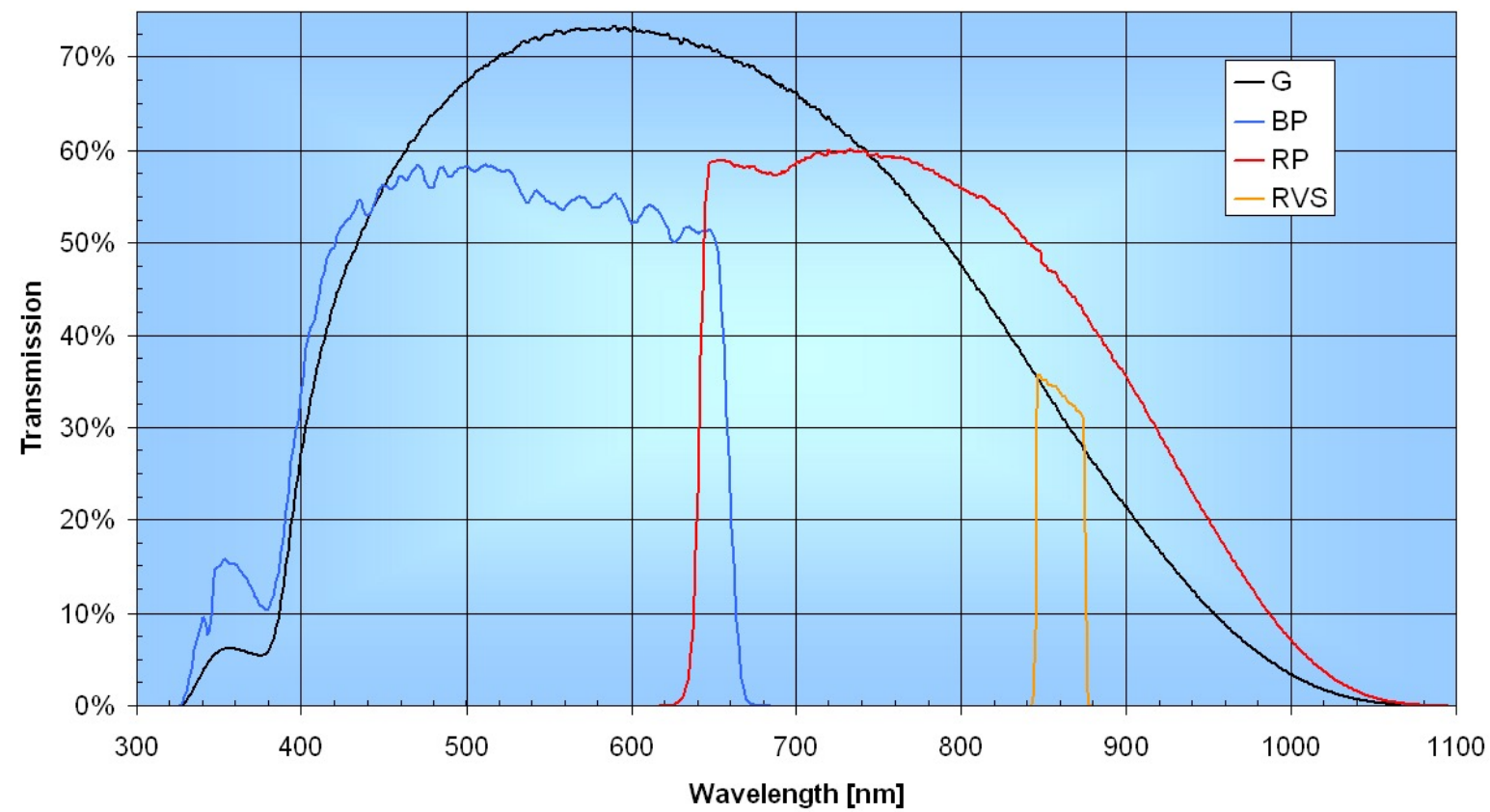
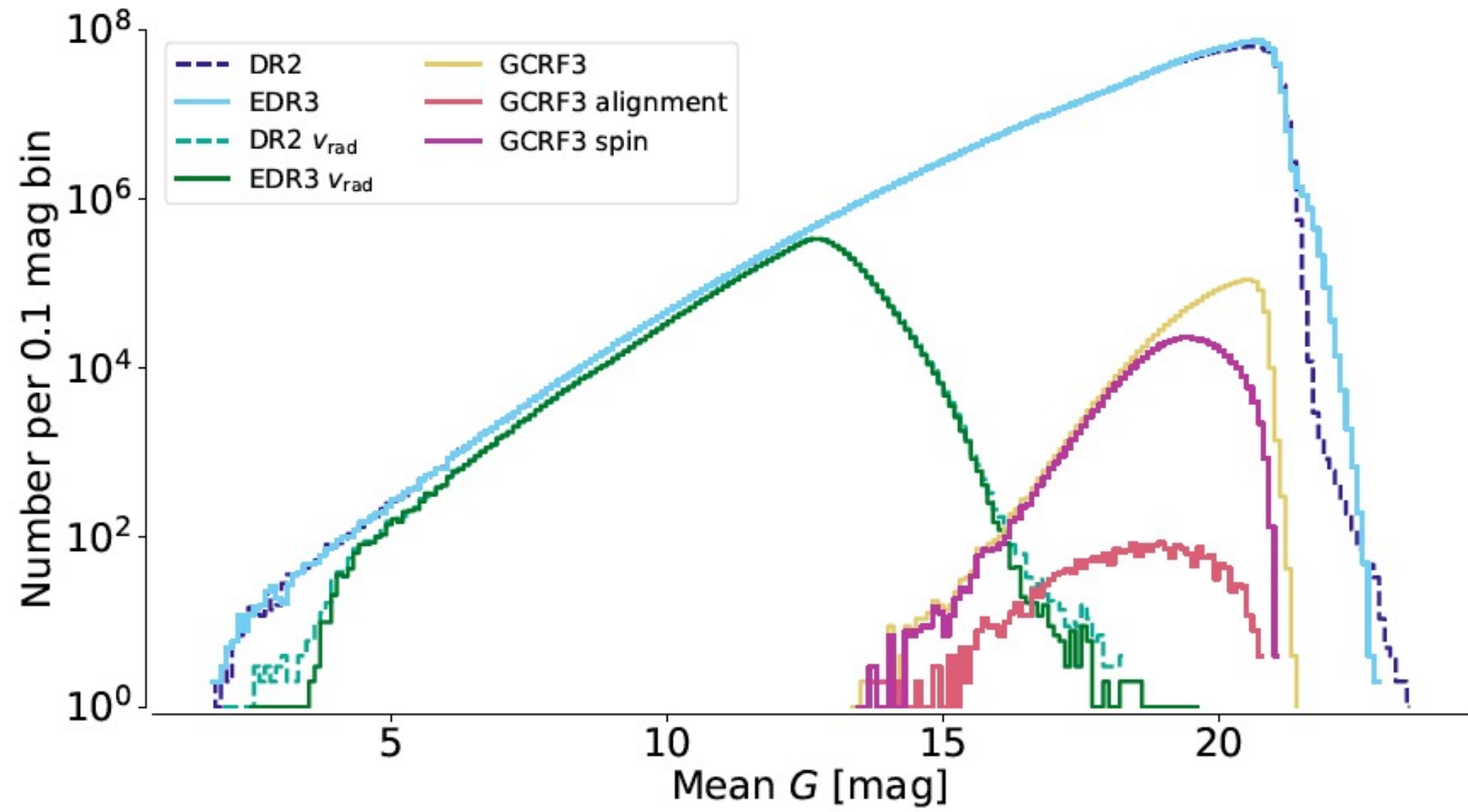


Fig. 1. Distribution of the mean values of G for all *Gaia* EDR3 sources shown as histograms with 0.1 mag wide bins. The distribution of the *Gaia* DR2 sources (dashed lines, for the full catalogue and for the radial velocity sample) is included for comparison. The other histograms are for the main *Gaia* EDR3 components as indicated in the legend.



GAIA EARLY DATA RELEASE 3



1 811 709 771
stellar positions

1 806 254 432
brightness
in white light

1 542 033 472
brightness
in blue light

1 540 770 489
colour

1 467 744 818
parallax and
proper motions

1 614 173
extragalactic
sources

1 554 997 939
brightness
in red light

#SpaceCare #ExploreFarther



Comparación de los Gaia DR



GAIA EARLY DATA RELEASE 3 (GAIA EDR3)

Gaia Data Release 3 *is split* into two installments: the early release called [Gaia Early Data Release 3](#) (Gaia EDR3) and the full Gaia Data Release 3 (Gaia DR3). Gaia EDR3 was released [on 3 December 2020 at 12:00 CET](#). The full Gaia Data Release 3 (Gaia DR3) [is planned for the first half of 2022](#).

As for previous releases, the Gaia (E)DR3 data is made available through the [Gaia Archive](#) and partner data centres. A description of the contents of Gaia Early DR3 is given below. [An overview page for Gaia Early Data Release 3](#) helps to find all relevant information for the Gaia EDR3 release. More detailed information on the expected contents for the full Gaia DR3 release will follow later.

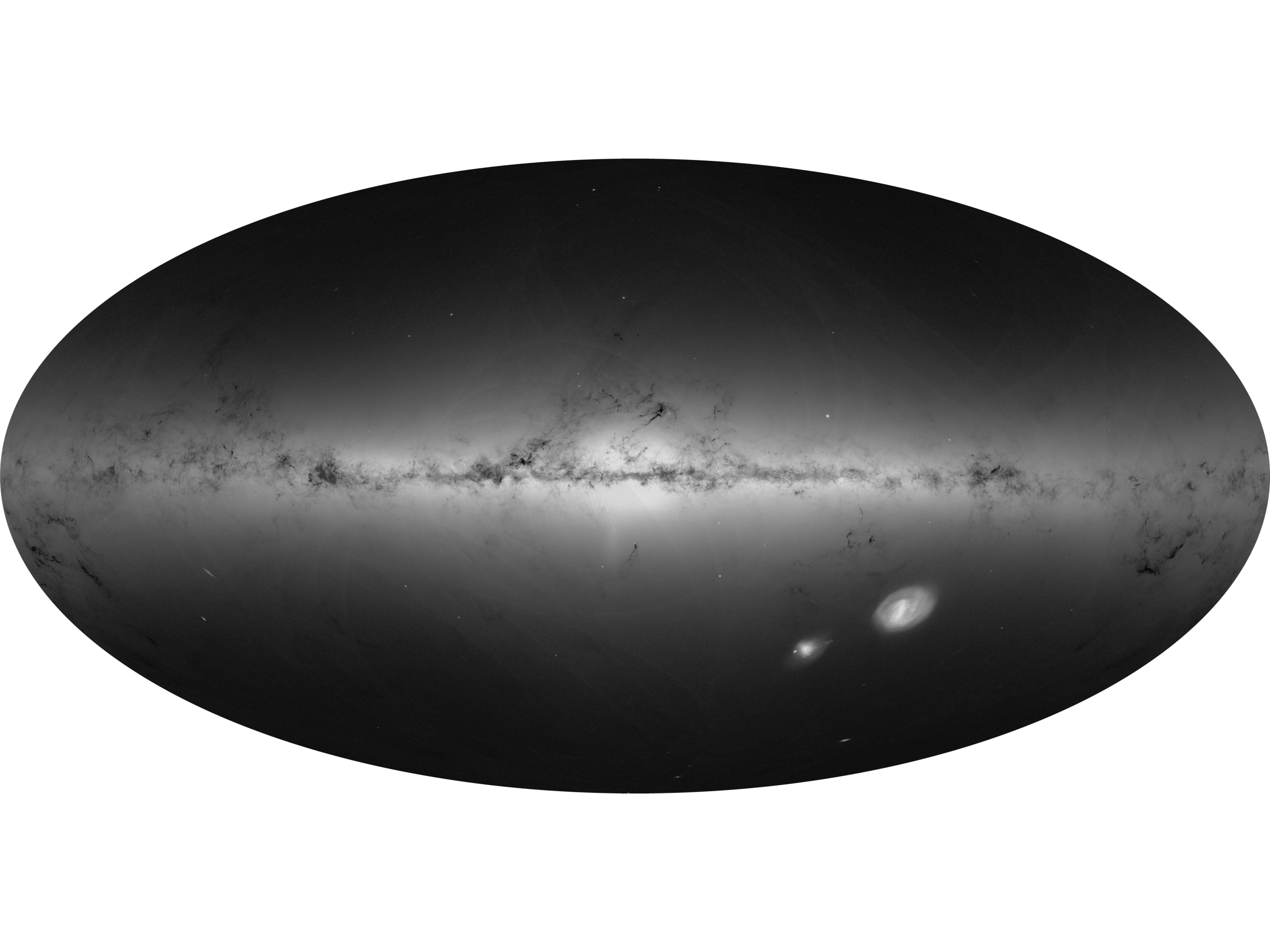
CONTENTS OF GAIA EDR3

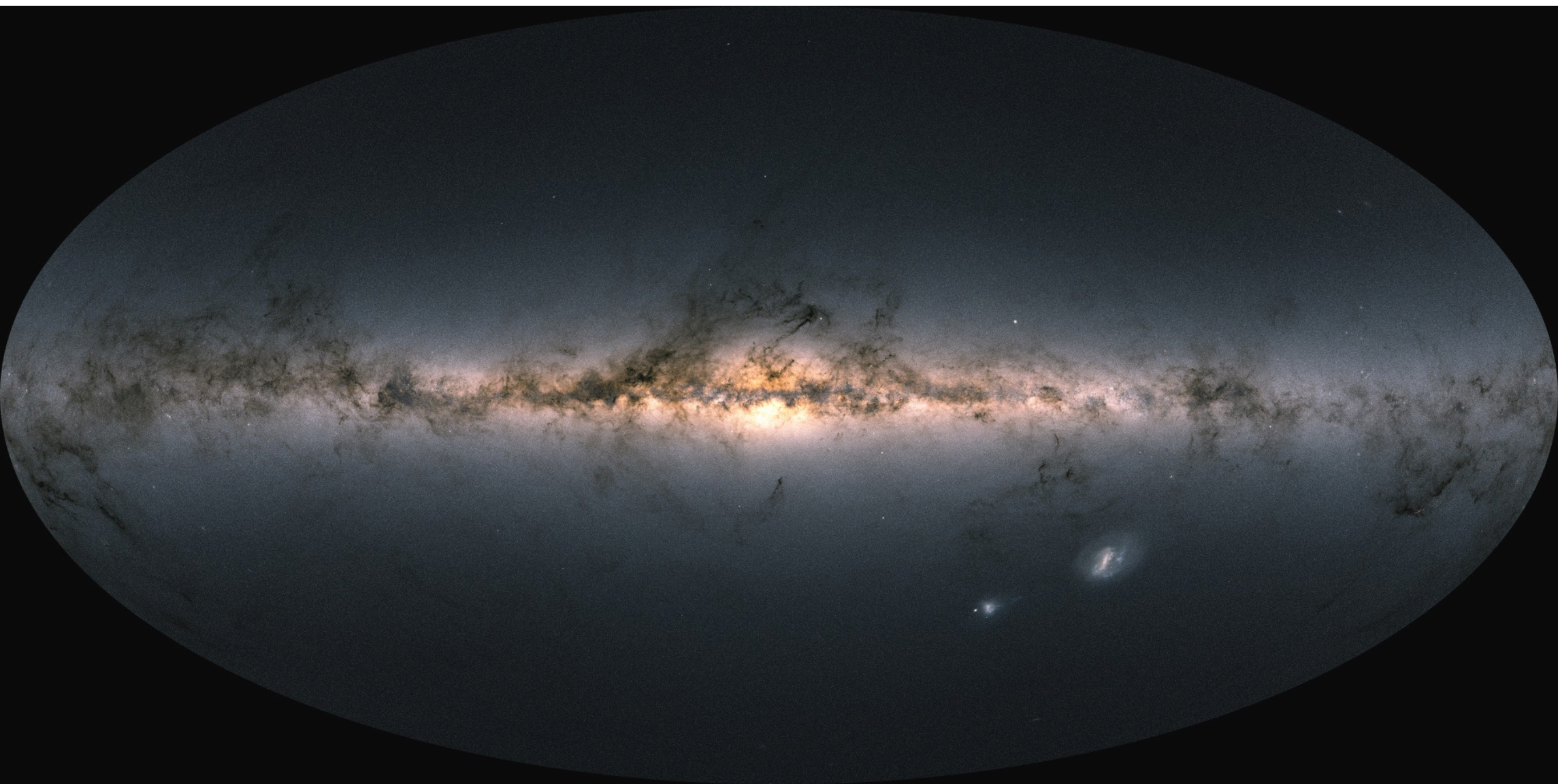
- The full astrometric solution (5 parameters) - positions on the sky (α , δ), parallaxes, and proper motions - for around 1.468 billion ($1.468 \cdot 10^9$) sources, with a limiting magnitude of about $G \approx 21$ and a bright limit of about $G \approx 3$. The astrometric solution wil be accompanied with some new quality indicators, like RUWE, and source image descriptors.
- The full astrometric solution has been done as 5-parameter solution for 585 million sources and as 6-parameter solution for 882 million sources. In the 6-parameter solution, the additional fitted quantity is the so-called pseudo-colour that had to be included for sources without high-quality colour information.
- In addition, two-parameters solutions - positions on the sky (α , δ) - for around 344 million additional sources.
- G magnitudes for around 1.806 billion sources.
- G_{BP} and G_{RP} magnitudes for around 1.542 billion and 1.555 billion sources, respectively.
- Please be aware that the photometric system for the G , G_{BP} , and G_{RP} bands in Gaia EDR3 is different from the photometric system as used in Gaia DR2 and Gaia DR1.
- Full passband definitions for G , G_{BP} , and G_{RP} . More information is available [here](#).
- About 1.614 million celestial reference frame (Gaia-CRF3) sources.
- Cross-matches between Gaia EDR3 sources on the one hand and Hipparcos-2, Tycho-2 + TDSC merged, 2MASS PSC (merged with 2MASX), SDSS DR13, Pan-STARRS1 DR1, SkyMapper DR2, GSC 2.3, APASS DR9, RAVE DR5, allWISE, and URAT-1 data on the other hand.
- Additionally, a Gaia DR2 to Gaia EDR3 match table.
- Simulated data from Gaia Object Generator (GOG) and Gaia Universe Model Snapshot (GUMS).
- The commanded scan law covering the Gaia EDR3 data collection period. Also the major periods where data was not sent to the ground or could not be processed are identified.

To ease the use of the data, the Gaia EDR3 source table in the Gaia Archive is complemented with a set of (cleaned) Gaia DR2 radial velocities.

The below table gives an overview of Gaia Early Data Release 3 in numbers:

	# sources in Gaia EDR3	# sources in Gaia DR2	# sources in Gaia DR1
Total number of sources	1,811,709,771	1,692,919,135	1,142,679,769
Number of 5-parameter sources	585,416,709		
Number of 6-parameter sources	882,328,109	1,331,909,727	2,057,050
Number of 2-parameter sources	343,964,953	361,009,408	1,140,622,719
Sources with mean G magnitude	1,806,254,432	1,692,919,135	1,142,679,769
Sources with mean G _{BP} -band photometry	1,542,033,472	1,381,964,755	-
Sources with mean G _{RP} -band photometry	1,554,997,939	1,383,551,713	-
Gaia-CRF sources	1,614,173	556,869	2,191
Sources with radial velocities	7,209,831 (Gaia DR2)	7,224,631	-
Variable sources	expected with Gaia DR3 / see Gaia DR2	550,737	3,194
Known asteroids with epoch data	expected with Gaia DR3 / see Gaia DR2	14,099	-
Effective temperatures (T _{eff})	expected with Gaia DR3 / see Gaia DR2	161,497,595	-
Extinction (A _G) and reddening (E(G _{BP} -G _{RP}))	expected with Gaia DR3 / see Gaia DR2	87,733,672	-
Sources with radius and luminosity	expected with Gaia DR3 / see Gaia DR2	76,956,778	-
and more...	expected with Gaia DR3	-	-





Elaboración del reporte

Algunos programas de reducciones astrométricas los elaboran automáticamente en el formato deseado por el Minor Planet Center.

Recomendaciones:

Guide to Minor Body Astrometry

<http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/Astrometry.html>

IMPORTANTE:

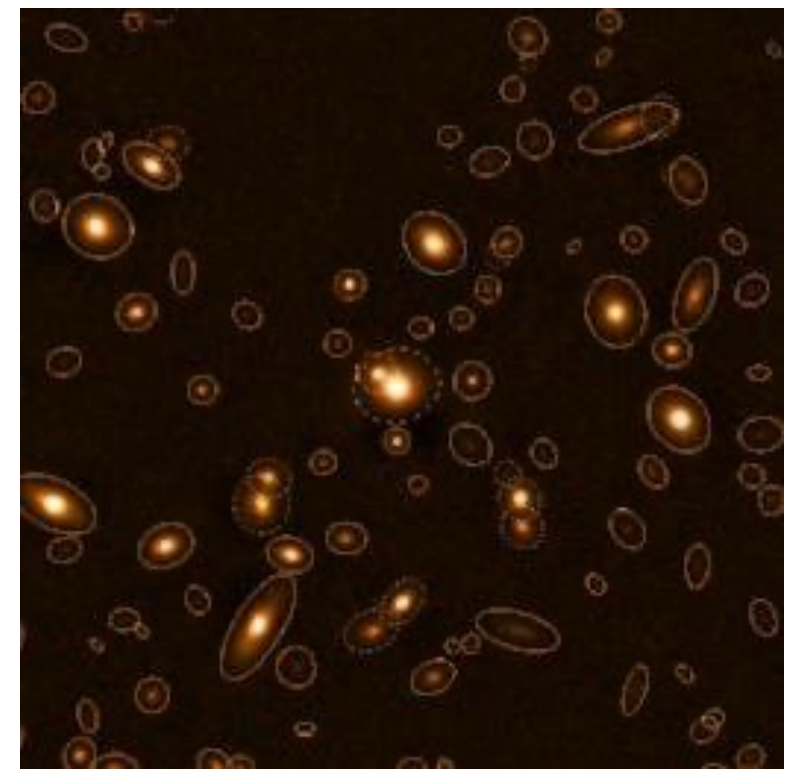
[“The observation format requires an observatory code. I don't have a code. How do I get one?”](#)

Extracción de fuentes: SExtractor

- SExtractor is a program that builds a catalogue of objects from an astronomical image. Although it is particularly oriented towards reduction of large scale galaxy-survey data, it can perform reasonably well on moderately crowded star fields.

(Author: E. Bertin)

- <https://www.astromatic.net/software/sextractor>
- The most recent version of manual can be found here: [SExtractor v2.5](#)
- A cookbook by [Benne Holwerda](#): [Source Extractor for Dummies](#)
- Source Extractor Wrapper for Python
- <https://sewpy.readthedocs.io/en/latest/>



Automatización

- Multiplataforma
 - Combinación de:
 - astropy – manejo de fits files
 - pyraf o photutils – reduccion fotometrica
 - swepy (sextractor py) – extracción de fuentes
 - API astrometry.net – astrometría
- Windows
 - Astrometrica (Herbert Raab)
 - PinPoint (Bob Denny)

Automatización

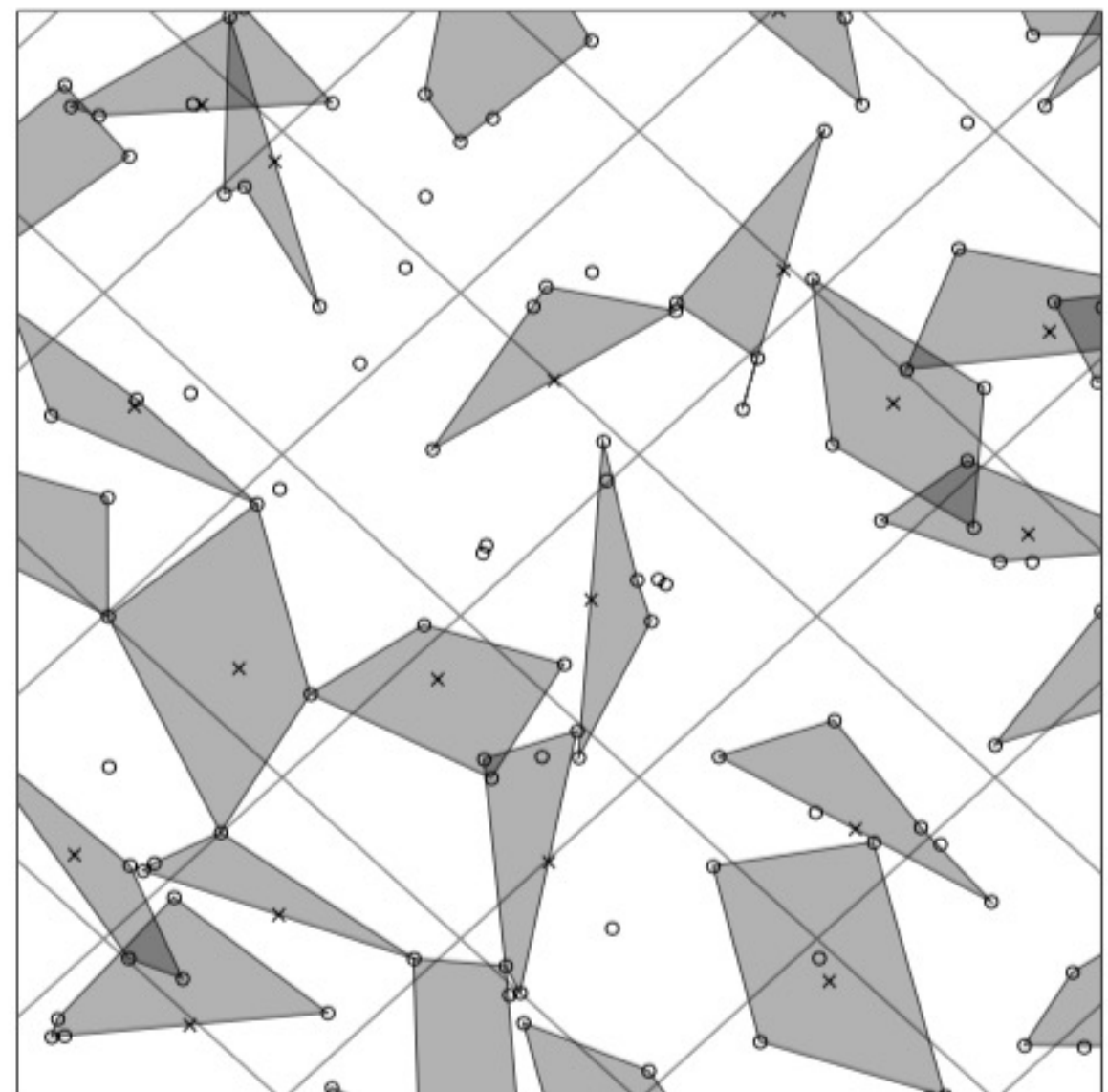
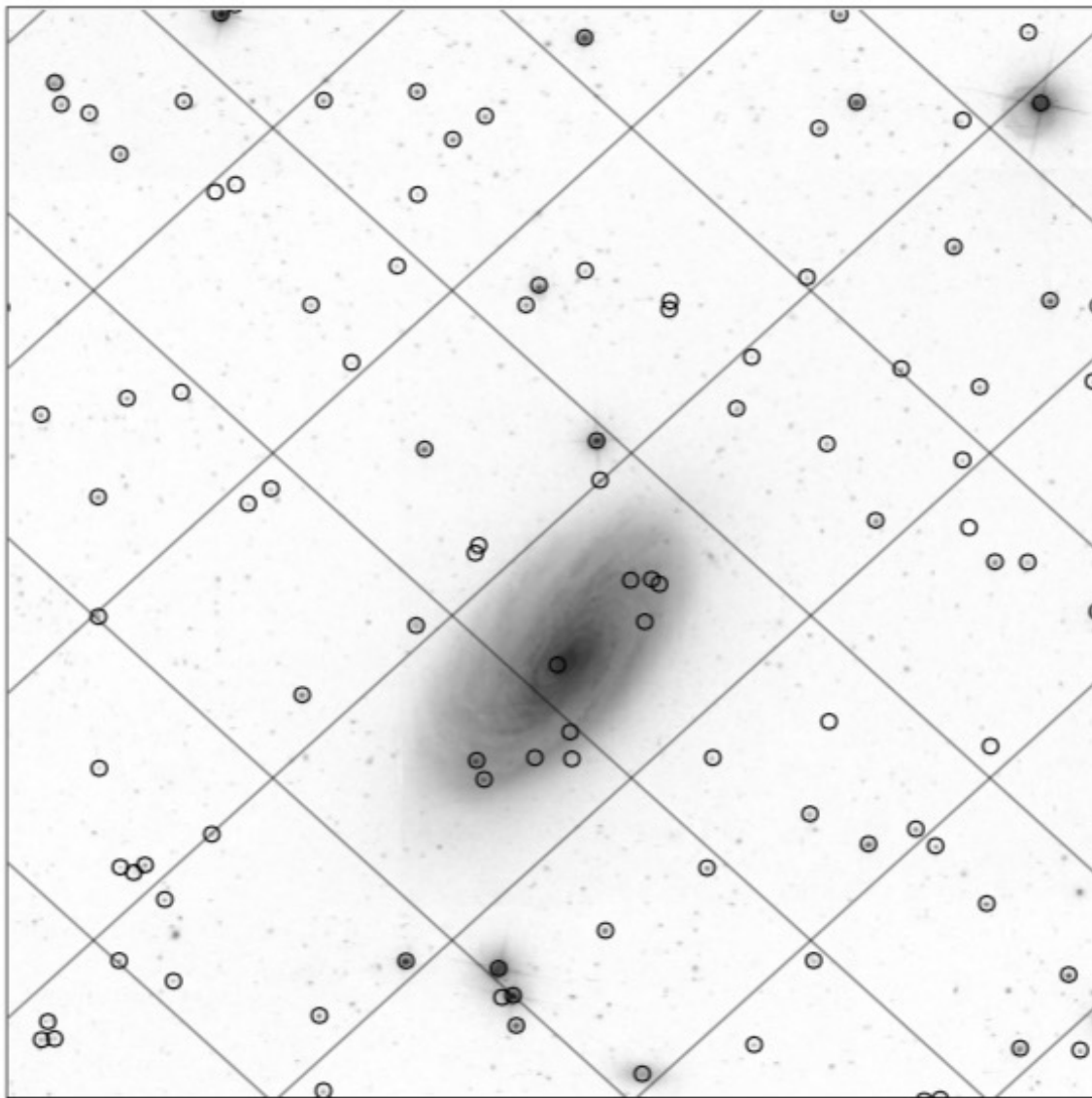
- Muchos programas que calculan la solución astrométrica (constantes de placa) piden como entrada una identificación cruzada de algunas estrellas de referencia
- Esta identificación se puede hacer “a mano” si son pocas imágenes a reducir (que es “pocas”? unas decenas... tal vez unos cientos)
- La automatización radica en hacer esta identificación cruzada “a ciegas”:
 - se detectan los objetos en la imagen, e.g. con SExtractor (Bertin, 2000?)
 - con el centro del campo, escala y tamaño se “corta” un catálogo de referencia en el área aproximada del campo
 - se hace la identificación cruzada con algún algoritmo o figura de mérito estadística <— — — **éste es el paso demandante**, escala como N^n hay que hacerlo inteligentemente

Ejemplo: astrometry.net

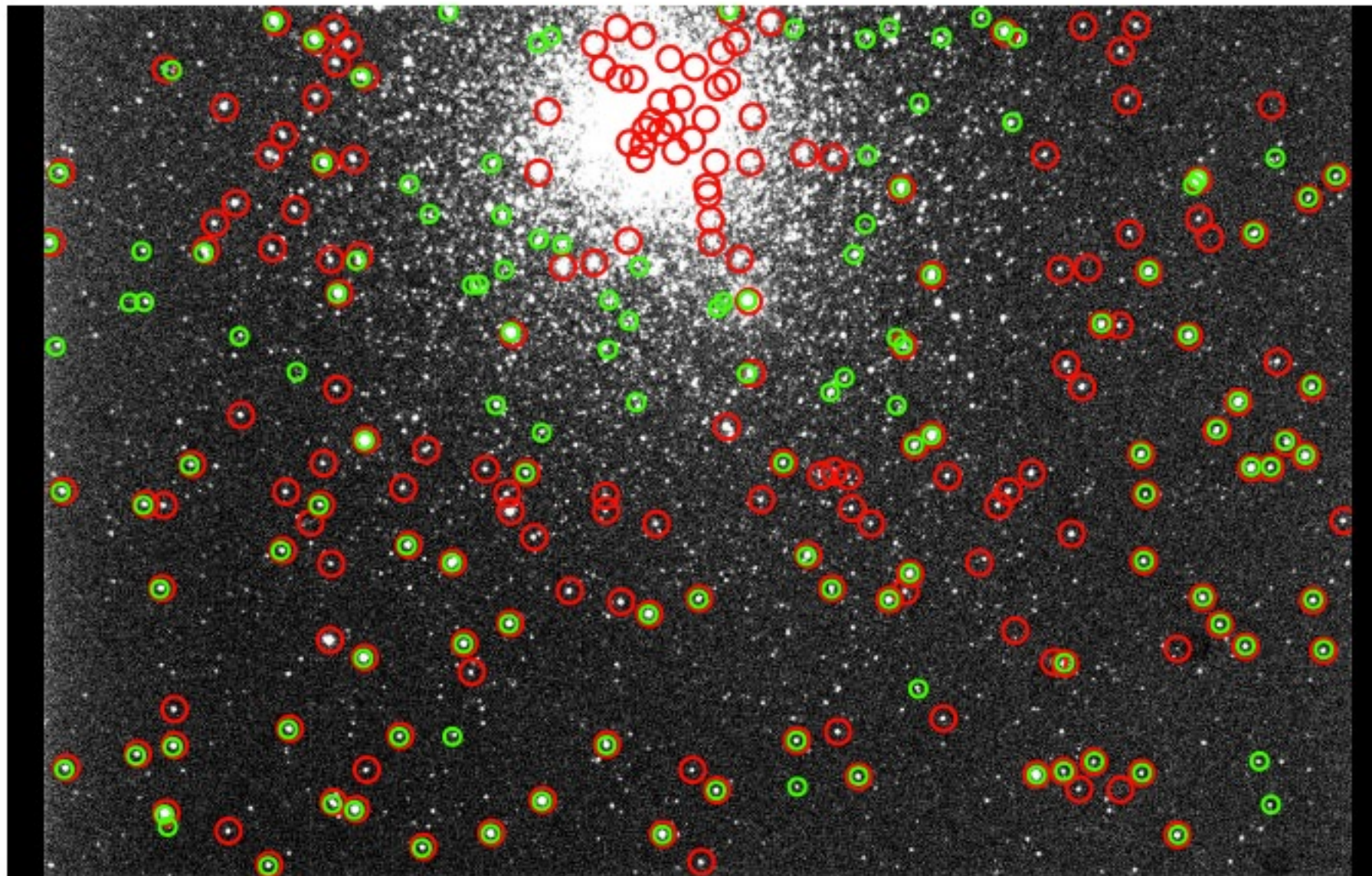
Astrometry.net:

Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images

Dustin Lang^{1,2,3}, David W. Hogg^{4,5}, Keir Mierle^{1,6}, Michael Blanton⁴, Sam Roweis^{1,6,7}



Astrometría a ciegas con astrometry.net

[Home](#)[Explore](#)[Dashboard](#)[Upload](#)[API](#)[Support](#) [Search](#)[Images](#) > [ngc6752_10s.fit](#)[Edit Image](#)

Submitted by (13006)
on 2018-10-12T13:35:45Z
as "ngc6752_10s.fit" (Submission
2305882)
under [Attribution-NonCommercial 3.0](#)
[Unported](#)

publicly visible: [yes](#) | [no](#)

Job Status

Job 2842422:
[Success](#)

Calibration

Center (RA, Dec):	(287.698, -60.093)
Center (RA, hms):	19 ^h 10 ^m 47.488 ^s
Center (Dec, dms):	-60° 05' 33.237"
Size:	26.6 x 17.7 arcmin
Radius:	0.266 deg
Pixel scale:	1.04 arcsec/pixel
Orientation:	Up is 177 degrees E of N
WCS file:	wcs.fits
New FITS image:	new-image.fits
Reference stars nearby (RA, Dec):	rdls.fits

astrometry.net: salidas

archivo con información sólo del
wcs (constantes de placa + SIP)
imagen con cabecera WCS

AR,DEC estrellas de referencia cercanas

x,y de * detectadas en la imagen

correspondencias x,y,AR,DEC de estrellas
detectadas y de referencia

Calibration

Center (RA, Dec):	(287.698, -60.093)
Center (RA, hms):	19 ^h 10 ^m 47.488 ^s
Center (Dec, dms):	-60° 05' 33.237"
Size:	26.6 x 17.7 arcmin
Radius:	0.266 deg
Pixel scale:	1.04 arcsec/pixel
Orientation:	Up is 177 degrees E of N
WCS file:	wcs.fits
New FITS image:	new-image.fits
Reference stars nearby (RA,Dec table):	rdls.fits
Stars detected in your images (x,y table):	axy.fits
Correspondences between image and reference stars (table):	corr.fits
KMZ (Google Sky):	image.kmz
World Wide Telescope:	view in WorldWideTelescope

astrometry.net: salidas

archivo con información sólo del
wcs (constantes de placa + SIP)
imagen con cabecera WCS

AR,DEC estrellas de referencia cercanas

x,y de * detectadas en la imagen

correspondencias x,y,AR,DEC de estrellas
detectadas y de referencia

Calibration

Center (RA, Dec):	(287.698, -60.093)
Center (RA, hms):	19 ^h 10 ^m 47.488 ^s
Center (Dec, dms):	-60° 05' 33.237"
Size:	26.6 x 17.7 arcmin
Radius:	0.266 deg
Pixel scale:	1.04 arcsec/pixel
Orientation:	Up is 177 degrees E of N
WCS file:	wcs.fits
New FITS image:	new-image.fits
Reference stars nearby (RA,Dec table):	rdls.fits
Stars detected in your images (x y table):	axy.fits
Correspondences between image and reference stars (table):	corr.fits
KMZ (Google Sky):	image.kmz
World Wide Telescope:	view in WorldWideTelescope

astrometry.net: corr.fits

field* -> **estrellas detectadas en la imagen**

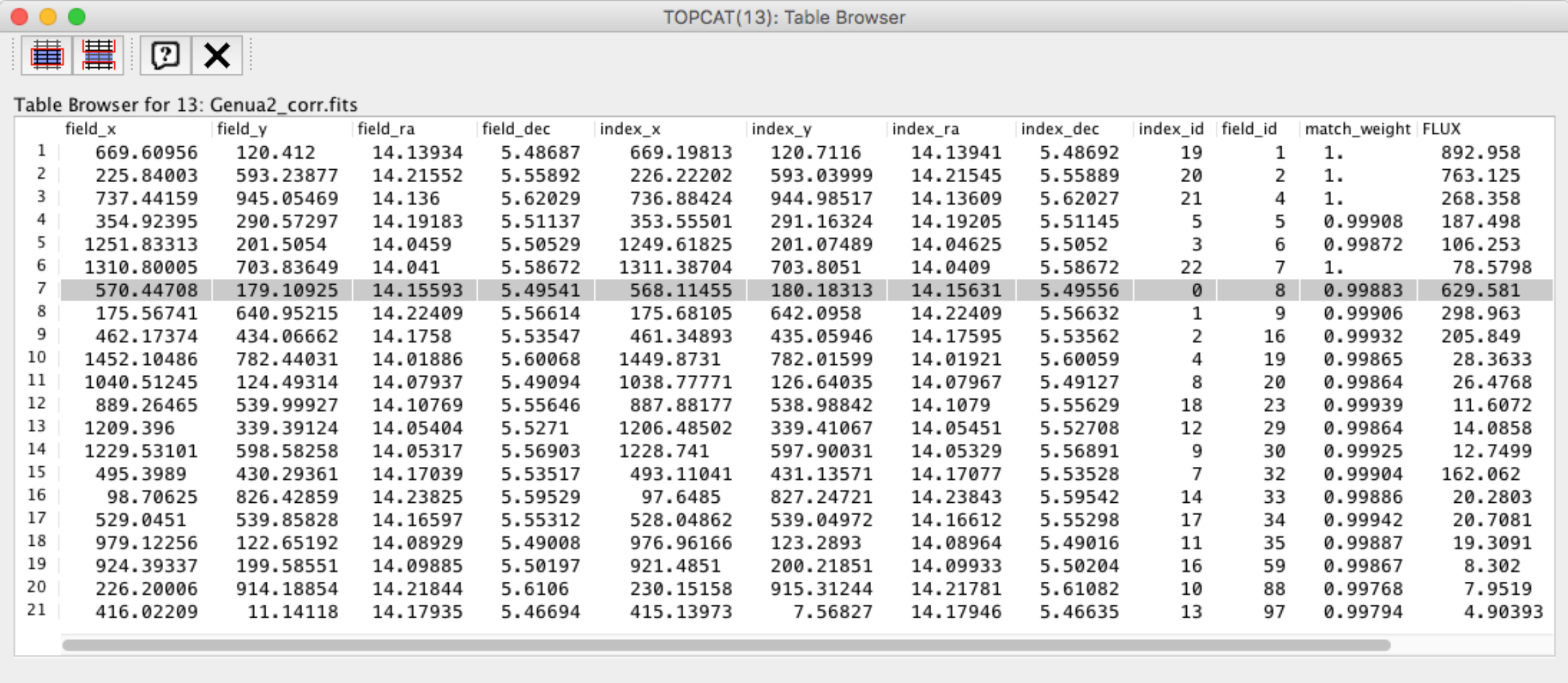
field_x,y = coordenadas x,y de las estrellas en la imagen con contraparte identificada en el catálogo

field_ra,dec = AR,DEC obtenida al aplicar soluc. astrométrica a field_x/y

index* -> **estrellas de referencia**

index_ra/dec = coords de catálogo de referencia (USNO-B1)

index_x/y = x,y resultante de aplicar soluc. astrométrica obtenida a index_ra/dec



TOPCAT(13): Table Browser

Table Browser for 13: Genua2_corr.fits

	field_x	field_y	field_ra	field_dec	index_x	index_y	index_ra	index_dec	index_id	field_id	match_weight	FLUX
1	669.60956	120.412	14.13934	5.48687	669.19813	120.7116	14.13941	5.48692	19	1	1.	892.958
2	225.84003	593.23877	14.21552	5.55892	226.22202	593.03999	14.21545	5.55889	20	2	1.	763.125
3	737.44159	945.05469	14.136	5.62029	736.88424	944.98517	14.13609	5.62027	21	4	1.	268.358
4	354.92395	290.57297	14.19183	5.51137	353.55501	291.16324	14.19205	5.51145	5	5	0.99908	187.498
5	1251.83313	201.5054	14.0459	5.50529	1249.61825	201.07489	14.04625	5.5052	3	6	0.99872	106.253
6	1310.80005	703.83649	14.041	5.58672	1311.38704	703.8051	14.0409	5.58672	22	7	1.	78.5798
7	570.44708	179.10925	14.15593	5.49541	568.11455	180.18313	14.15631	5.49556	0	8	0.99883	629.581
8	175.56741	640.95215	14.22409	5.56614	175.68105	642.0958	14.22409	5.56632	1	9	0.99906	298.963
9	462.17374	434.06662	14.1758	5.53547	461.34893	435.05946	14.17595	5.53562	2	16	0.99932	205.849
10	1452.10486	782.44031	14.01886	5.60068	1449.8731	782.01599	14.01921	5.60059	4	19	0.99865	28.3633
11	1040.51245	124.49314	14.07937	5.49094	1038.77771	126.64035	14.07967	5.49127	8	20	0.99864	26.4768
12	889.26465	539.99927	14.10769	5.55646	887.88177	538.98842	14.1079	5.55629	18	23	0.99939	11.6072
13	1209.396	339.39124	14.05404	5.5271	1206.48502	339.41067	14.05451	5.52708	12	29	0.99864	14.0858
14	1229.53101	598.58258	14.05317	5.56903	1228.741	597.90031	14.05329	5.56891	9	30	0.99925	12.7499
15	495.3989	430.29361	14.17039	5.53517	493.11041	431.13571	14.17077	5.53528	7	32	0.99904	162.062
16	98.70625	826.42859	14.23825	5.59529	97.6485	827.24721	14.23843	5.59542	14	33	0.99886	20.2803
17	529.0451	539.85828	14.16597	5.55312	528.04862	539.04972	14.16612	5.55298	17	34	0.99942	20.7081
18	979.12256	122.65192	14.08929	5.49008	976.96166	123.2893	14.08964	5.49016	11	35	0.99887	19.3091
19	924.39337	199.58551	14.09885	5.50197	921.4851	200.21851	14.09933	5.50204	16	59	0.99867	8.302
20	226.20006	914.18854	14.21844	5.6106	230.15158	915.31244	14.21781	5.61082	10	88	0.99768	7.9519
21	416.02209	11.14118	14.17935	5.46694	415.13973	7.56827	14.17946	5.46635	13	97	0.99794	4.90393

CALIBRACIÓN ASTROMÉTRICA - EJEMPLO

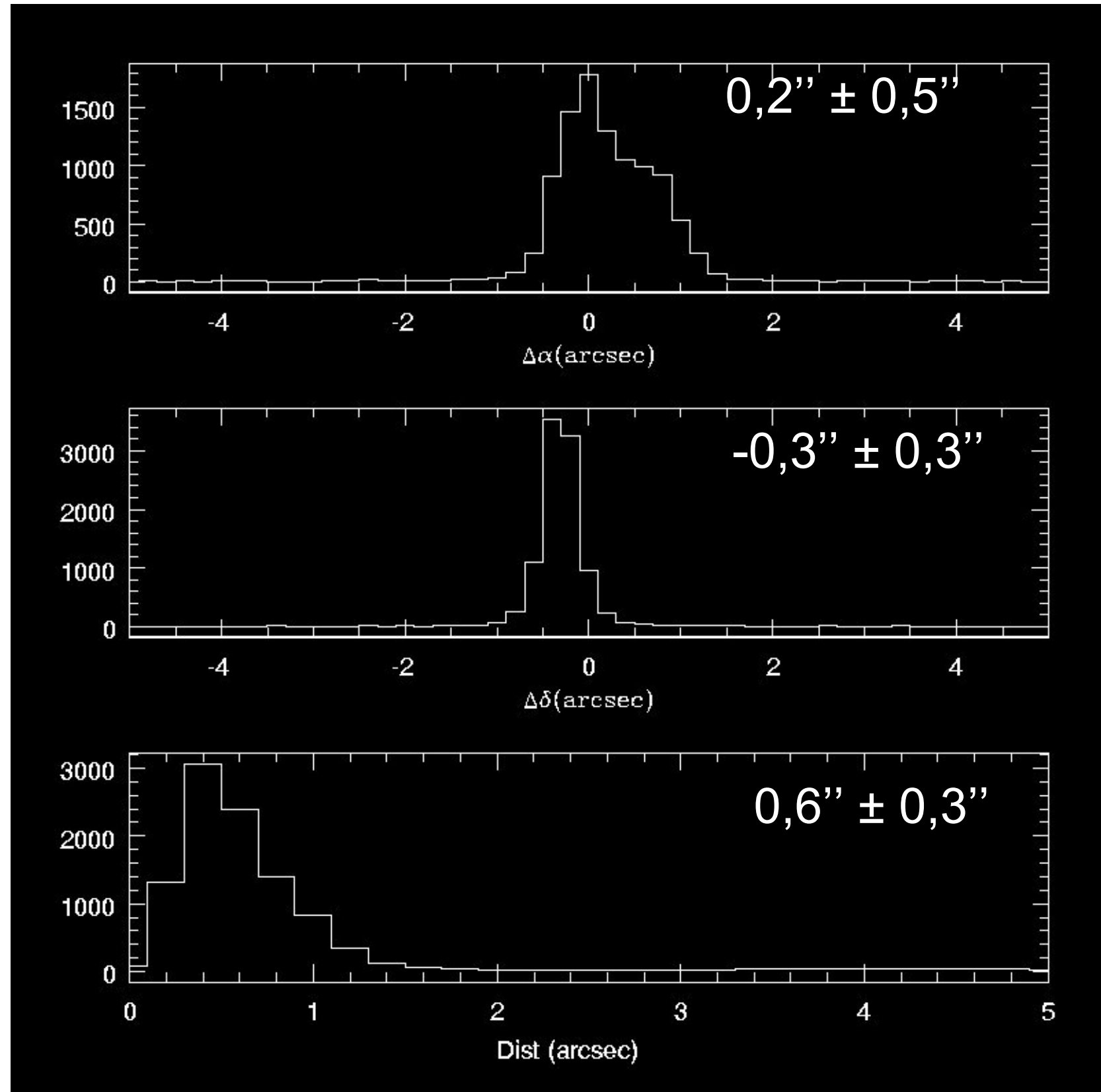
- Identificación astrométrica con catálogo de 2MASS
- Precisión interna obtenida $0,6''$

Objetos Detectados

- 94.568 en el filtro V
- 118.249 en el filtro R
- 53.617 en ambos filtros

Área cubierta

- $5,8 \text{ gd}^2$ en el filtro V
- $4,4 \text{ gd}^2$ en ambos filtros



Bibliografía

- The Handbook of astronomical image processing - Berry & Burnell (2005) —> muy recomendado para la solución astrométrica
- Stock 1981, RevMex, Vol. 6, 115, disponible en:
http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-data_query?bibcode=1981RMxAA...6..115S&link_type=ARTICLE&db_key=AST&high=
- Para buscar artículos NASA ADS en http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html o la versión nueva NASA ADS-Bumblebee en <https://ui.adsabs.harvard.edu/#>