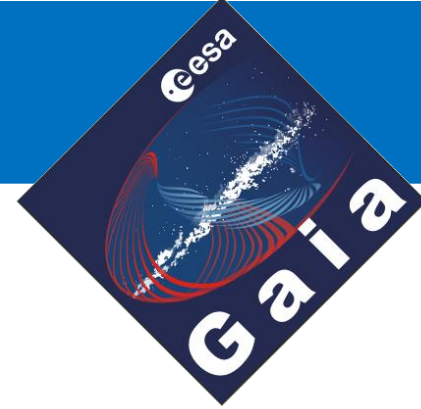


Le satellite Gaïa



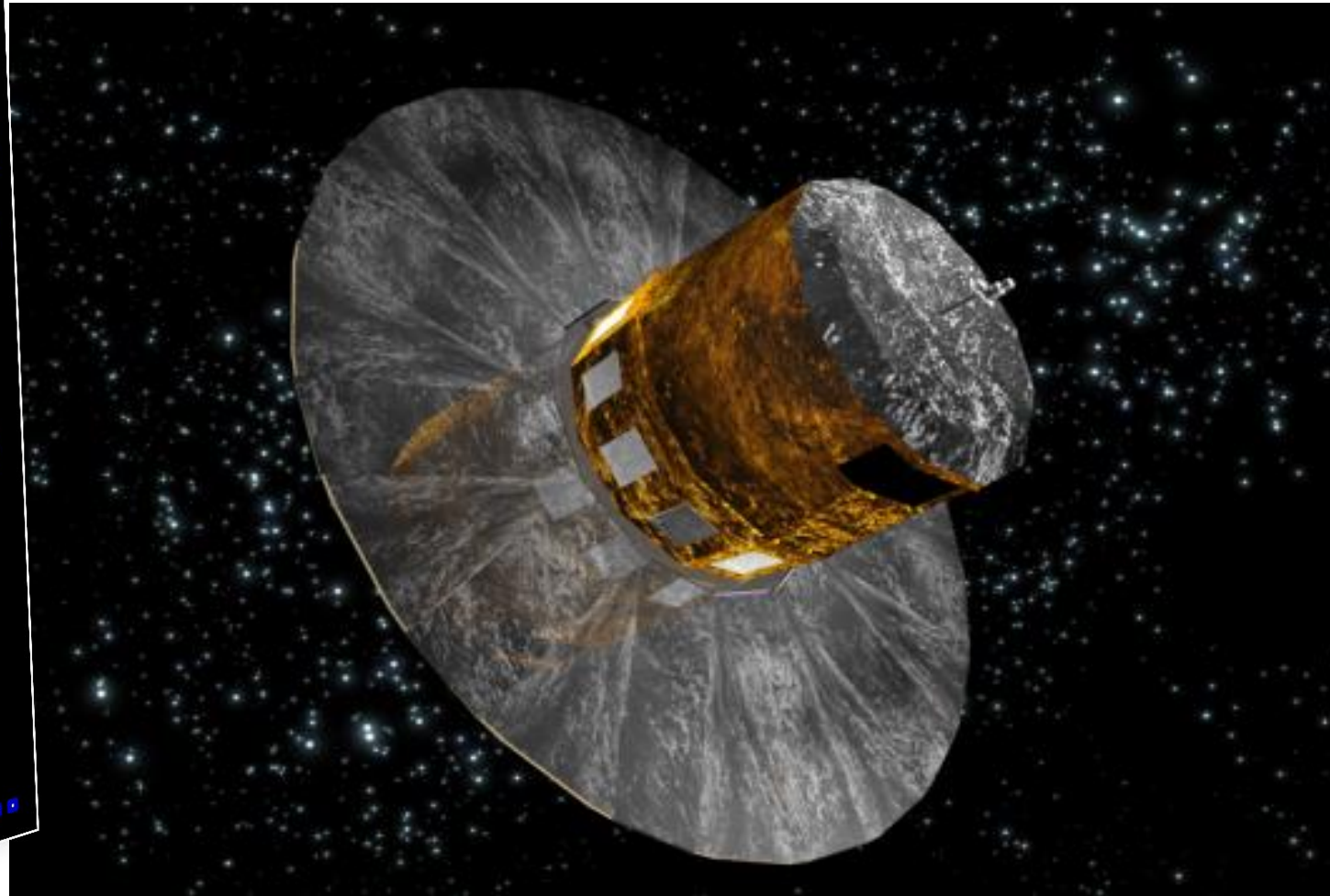
Brigitte Rocca-Volmerange
Professeur Université Paris-SUD
Institut d'Astrophysique de Paris
Membre du DPAC, rocca@iap.fr

La Voie
Lactée
en 3D

Un milliard
de sources

étoiles
astéroïdes
quasars
galaxies

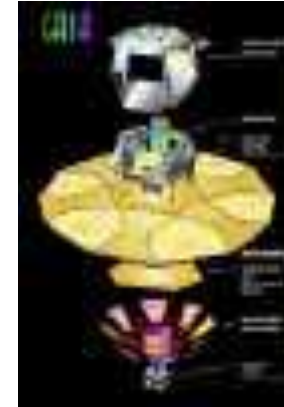
et
l'imprévu...



D'Hipparcos à Gaia



Deux missions de
l'Agence Spatiale
Européenne...
soutenues par le CNRS



Acceptée par l'ESA en 1980
Première mission spatiale d'astrométrie

Lancée par Ariane le 8 Août 1989
Pas sur une orbite géostationnaire ...

Des données scientifiques obtenues pendant
37 mois, de Novembre 1989 à Mars 1993

Précisions obtenues : 1 mas = deux fois
meilleures que les spécifications

Catalogue publié en juin 1997

Pierre Angulaire N°6 du programme Horizon
2000+

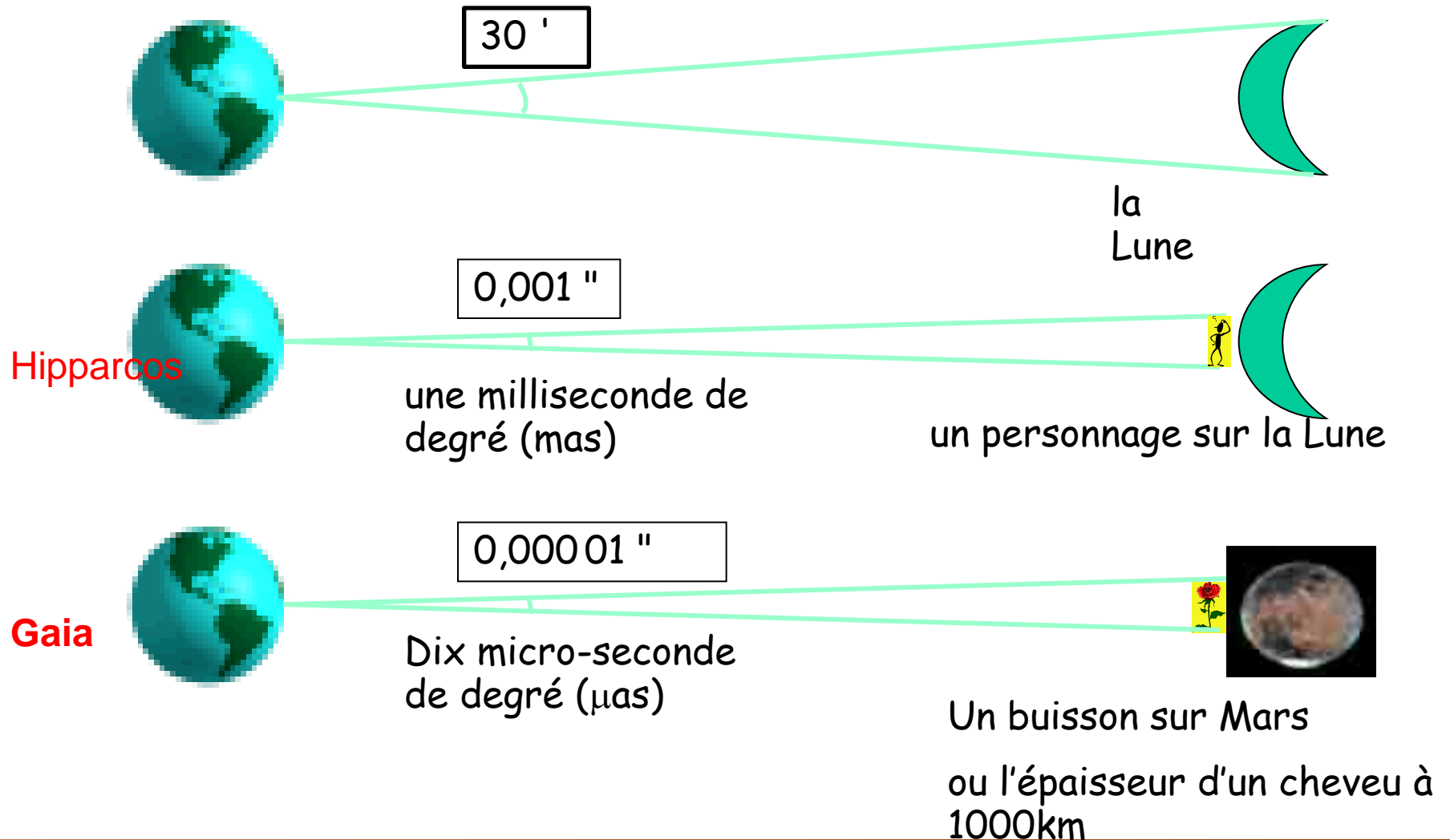
Lancement fin 2013

Soyouz-Fregat depuis Kourou,
Orbite: L2 Soleil - Terre, mission de 5 ans

Spécifications: précision de $7 \mu\text{as}$ à $V = 13$

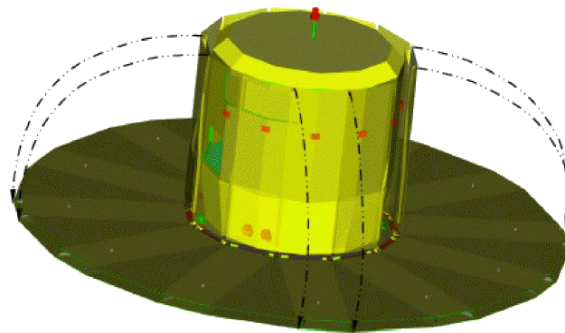
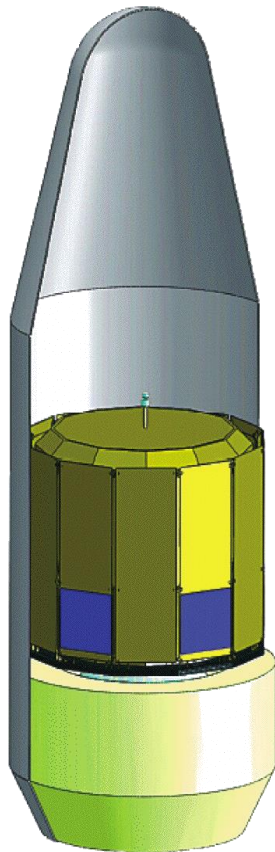
Des performances décuplées par des facteurs
100 à 10 000

Ordres de grandeur



Lancement et déploiement

- Date: 20 dec 2013
- Durée: >5 ans
- Lanceur: Soyouz-Fregat
- Orbite: point L2
- Débit: 4(30mn)-8.2(385mn) Mbps



Bouclier $\varnothing = 9.5\text{m}$

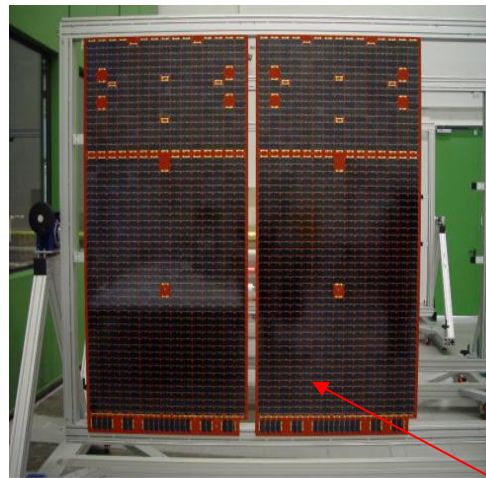
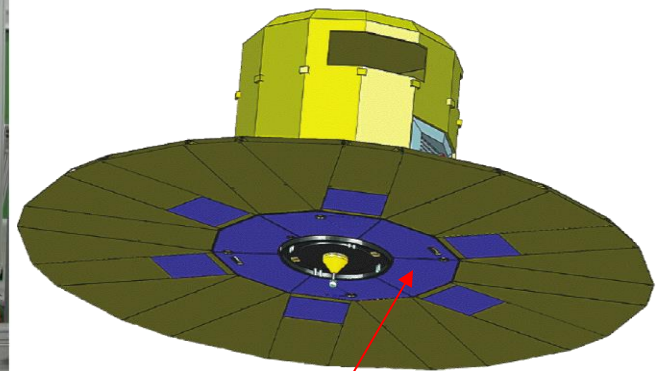


Figure 8.7.3/A: Solar Array

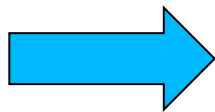


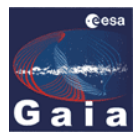
Panneaux solaires

- Masse: 2 tonnes
- Puissance: 1900 W
- Hauteur instrument: 3m

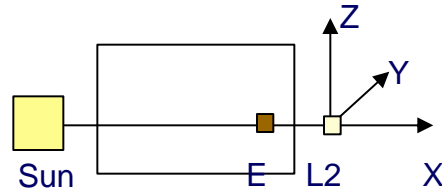


**Déploiement et Lancement
Prévu par l'ESA
le 20 Décembre 2013**





GAIA orbite au point L2 around Sun/Earth L2

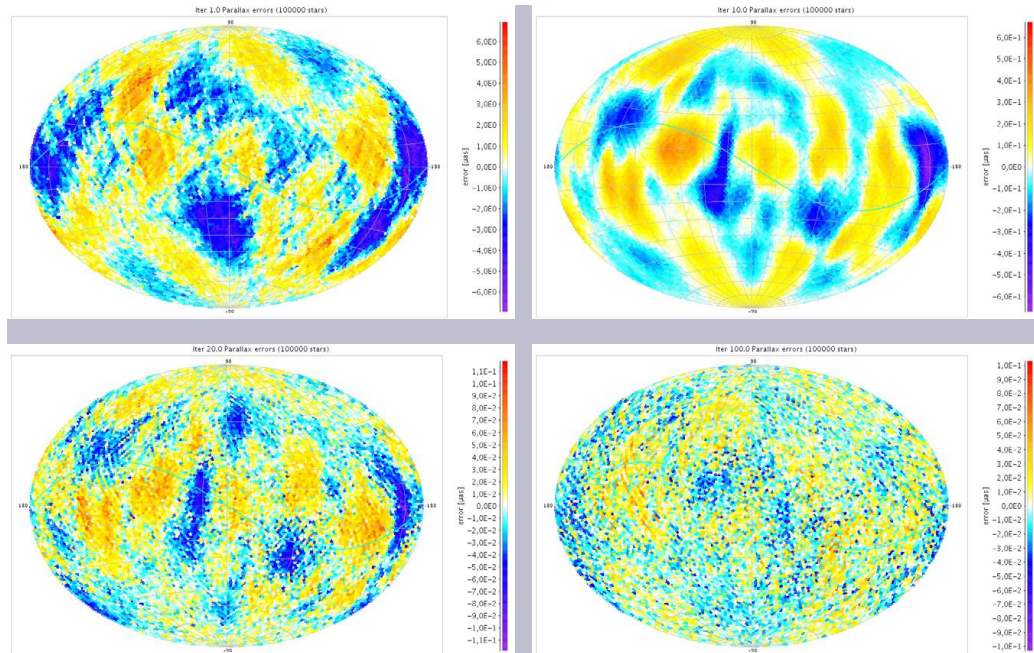
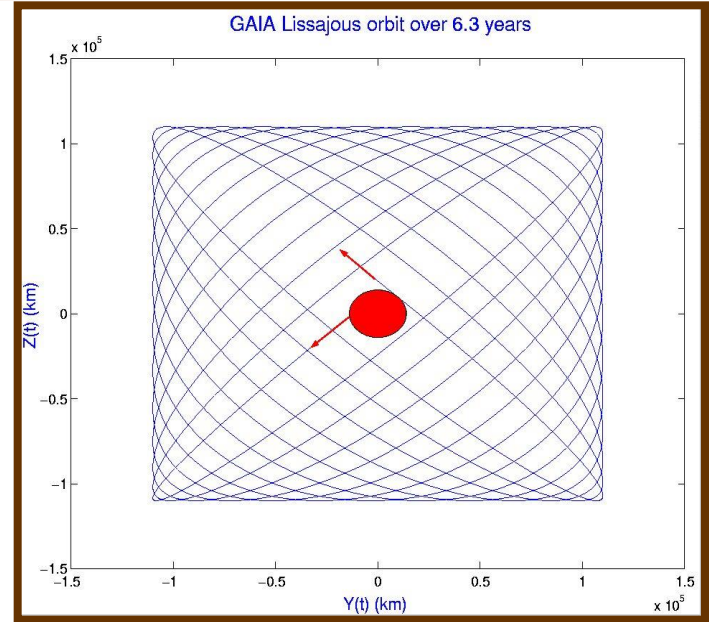


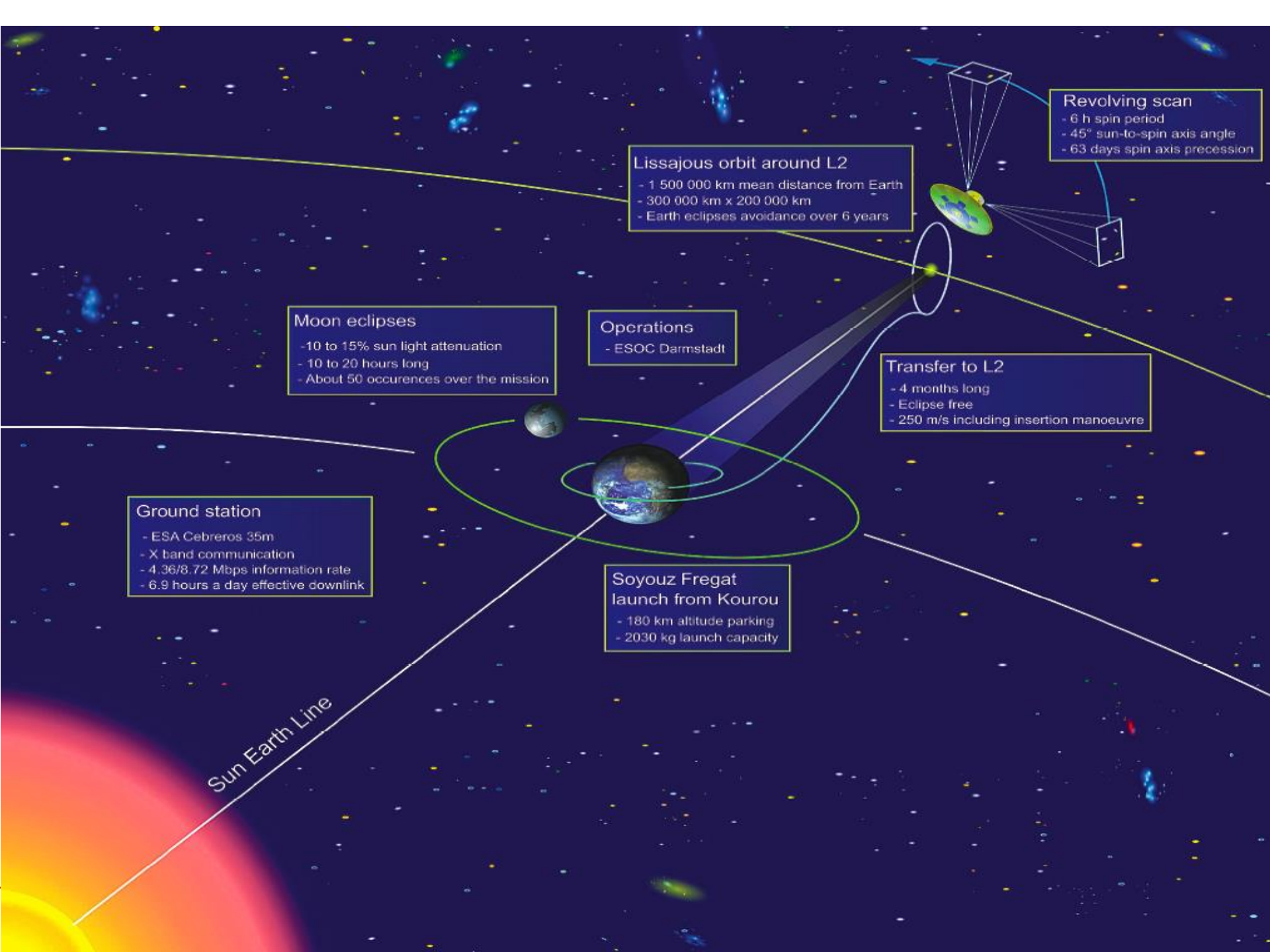
Le point L2 est instable, donc pas de corps naturels, et bon pour les missions spatiales. Son exposition par rapport au soleil et à la terre reste constante (ce qui n'est pas le cas des orbites terrestres). Donc corrections faciles. Herschel, Planck et WMAP s'y trouve déjà.

Mesures de distance dans un système de référence Barycentrique (BCRS) basé sur les équations Einstein-Infeld-Hoffman
Si les effets relativistes ne sont pas pris en compte d'énormes différences (plusieurs kms

Les mesures Doppler de suivi correspondent à une bonne précision en distance radiale -> 150m

Cela demande une précision de 1mm/s sur la vitesse de GAIA et permet de contraindre les aberrations.





Revolving scan
- 6 h spin period
- 45° sun-to-spin axis angle
- 63 days spin axis precession

Lissajous orbit around L2
- 1 500 000 km mean distance from Earth
- 300 000 km x 200 000 km
- Earth eclipses avoidance over 6 years

Moon eclipses
- 10 to 15% sun light attenuation
- 10 to 20 hours long
- About 50 occurrences over the mission

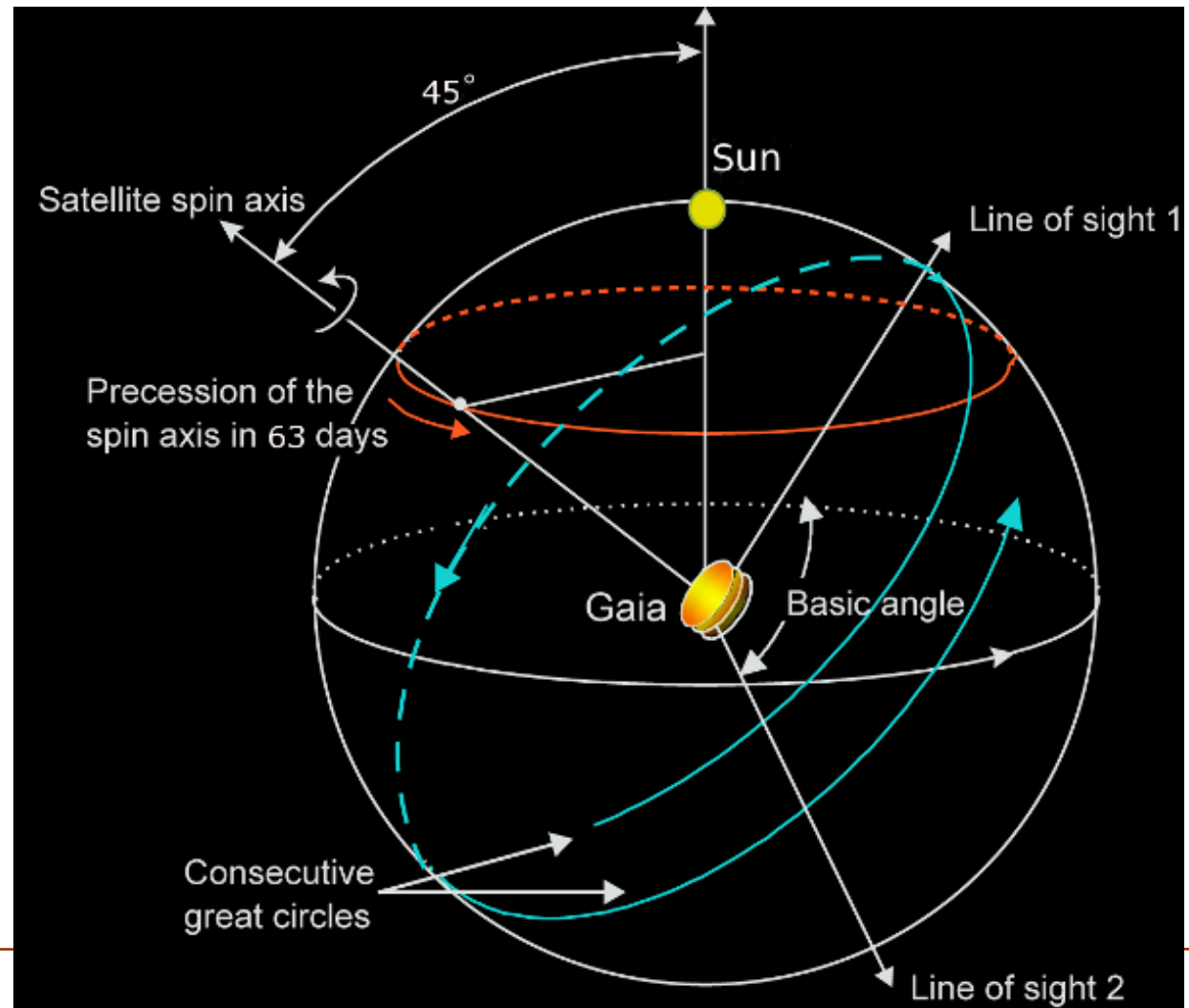
Operations
- ESOC Darmstadt

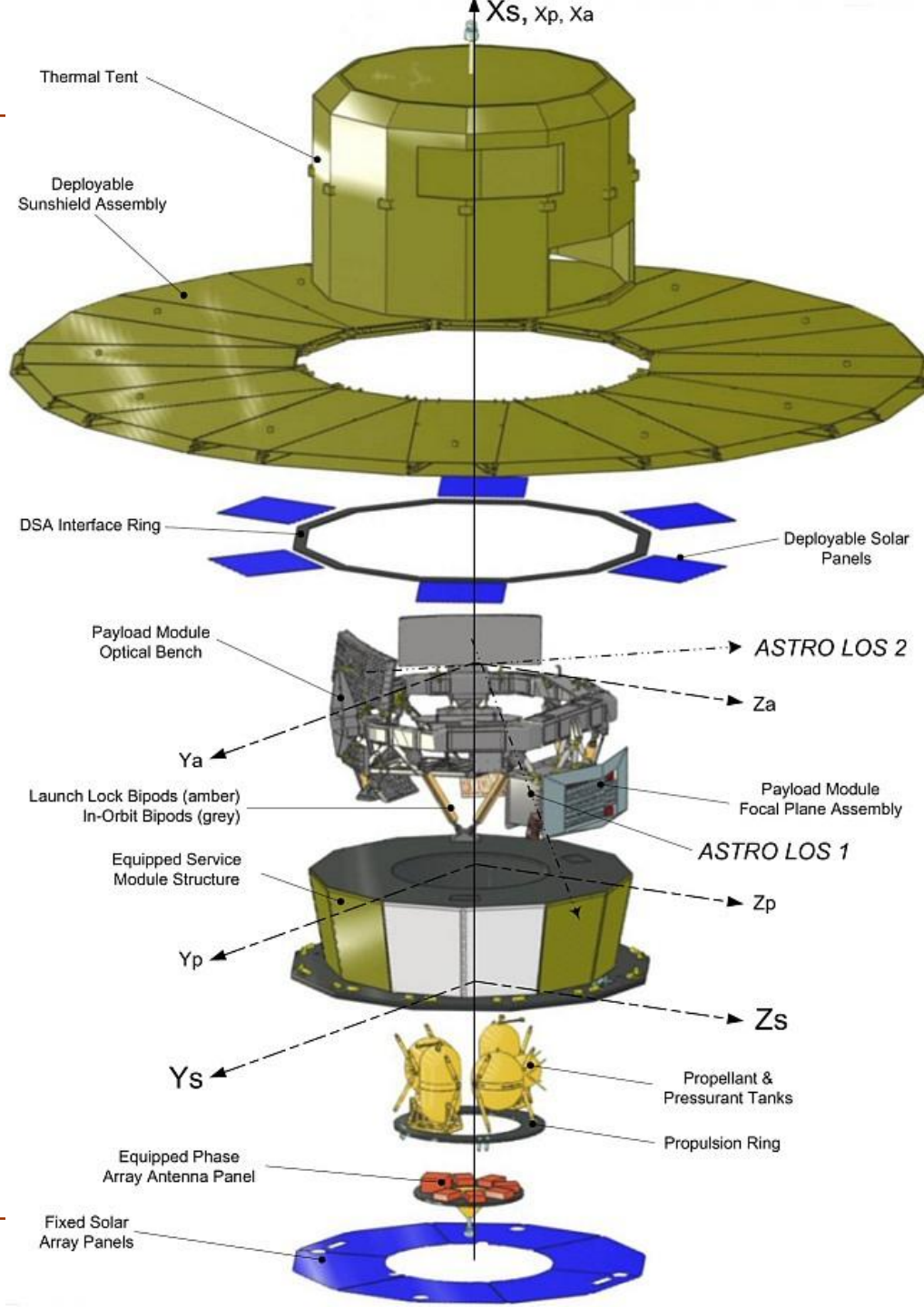
Transfer to L2
- 4 months long
- Eclipse free
- 250 m/s including insertion manoeuvre

Ground station
- ESA Cebreros 35m
- X band communication
- 4.36/8.72 Mbps information rate
- 6.9 hours a day effective downlink

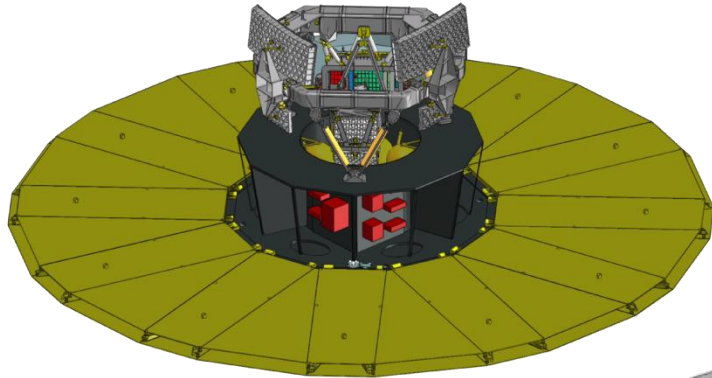
Soyouz Fregat launch from Kourou
- 180 km altitude parking
- 2030 kg launch capacity

Sun Earth Line

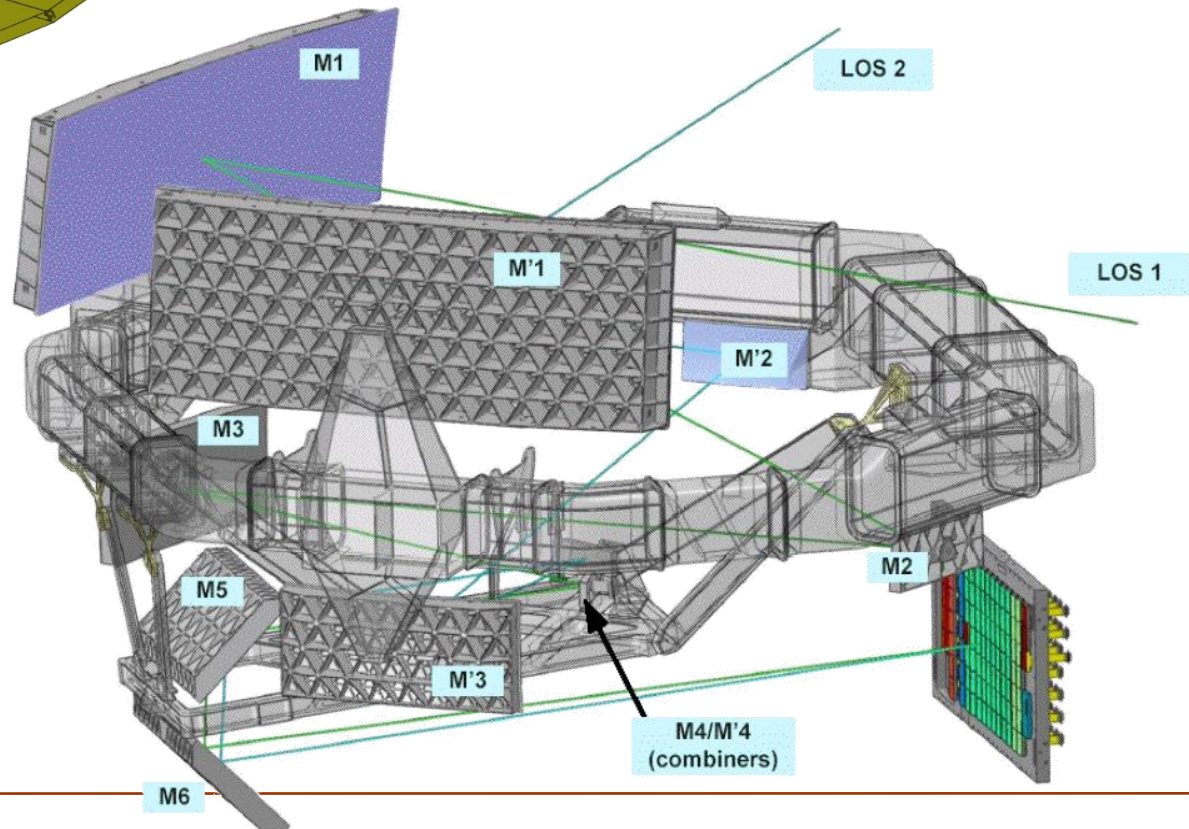




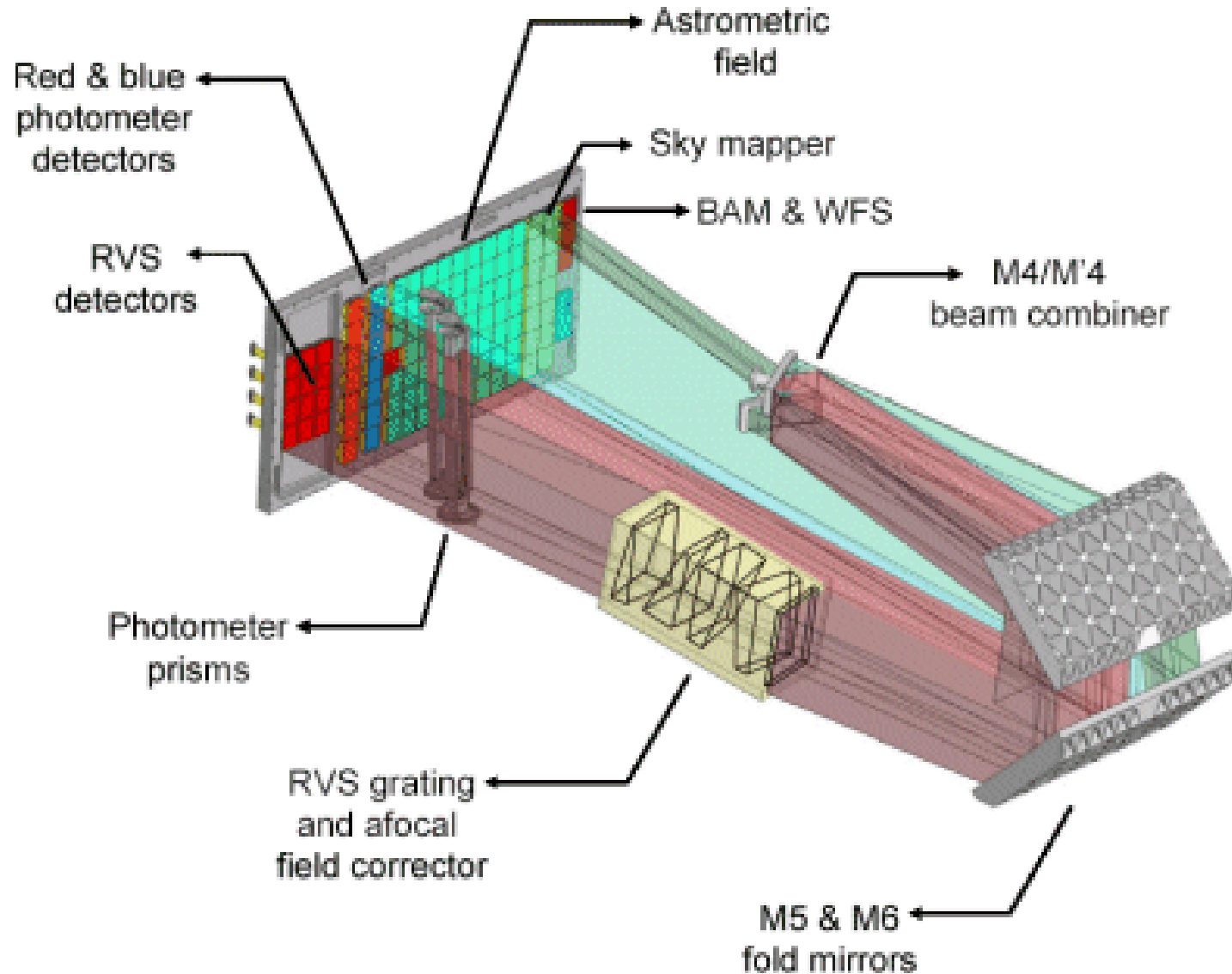
Optique

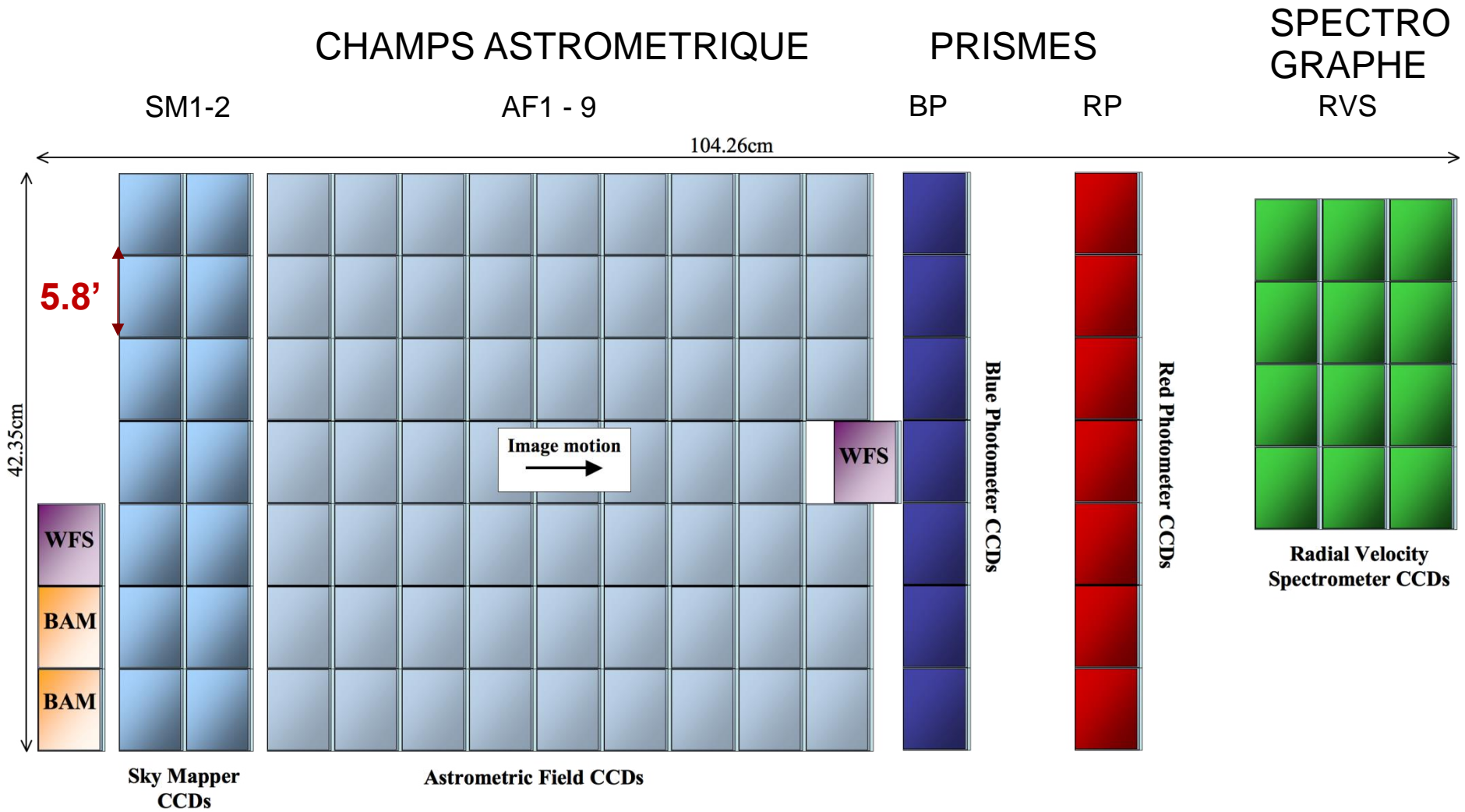


- pupille: 1.45 x 0.5 m
- longueur focale 35 m
- angle de base: 106.5°
- plan focal T = 170° K



INSTRUMENTS: Blue-Red Prisms et RVS detecteur: 847/874 nm resolution $\Delta\lambda/\lambda = 11500$, focale=35m

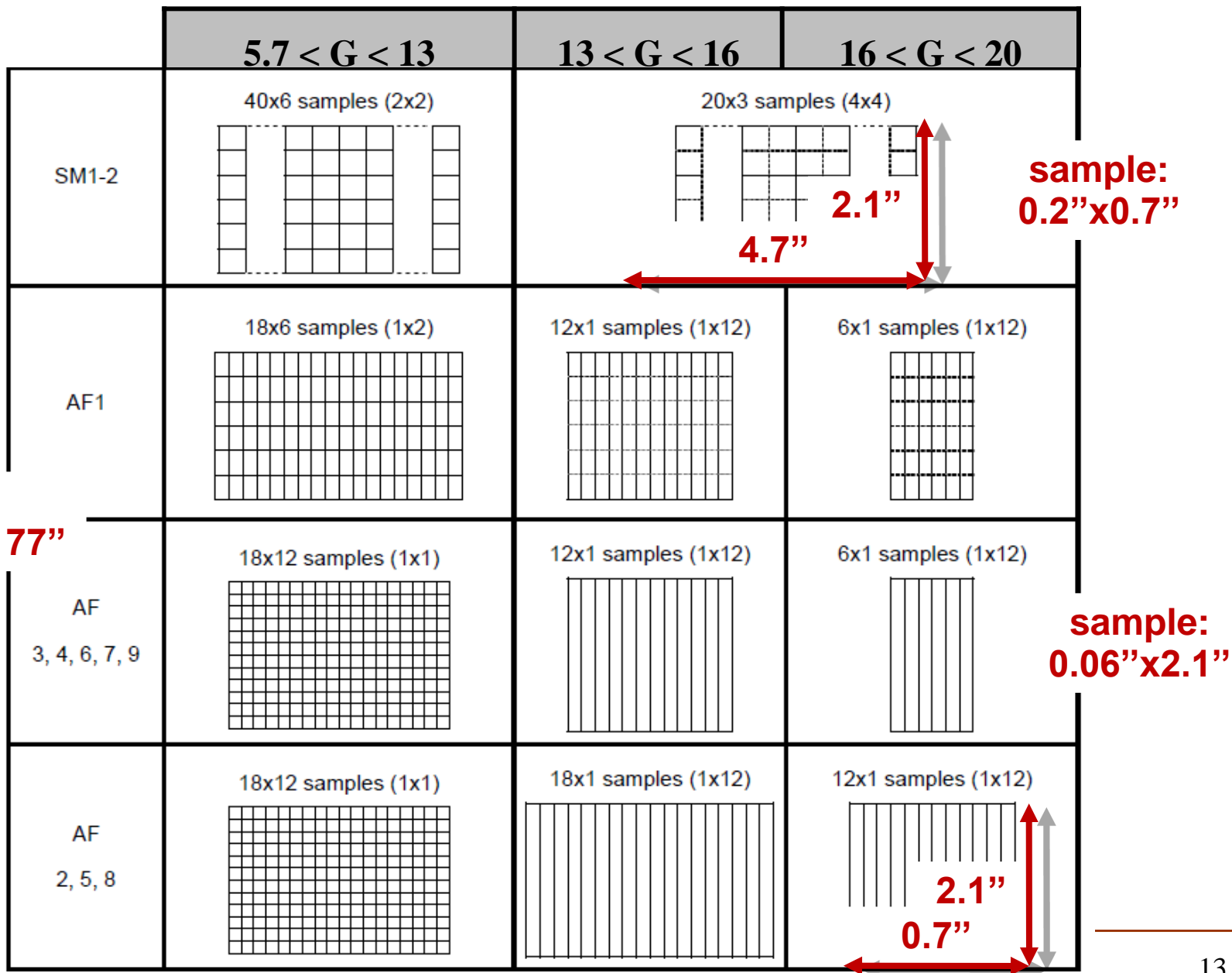


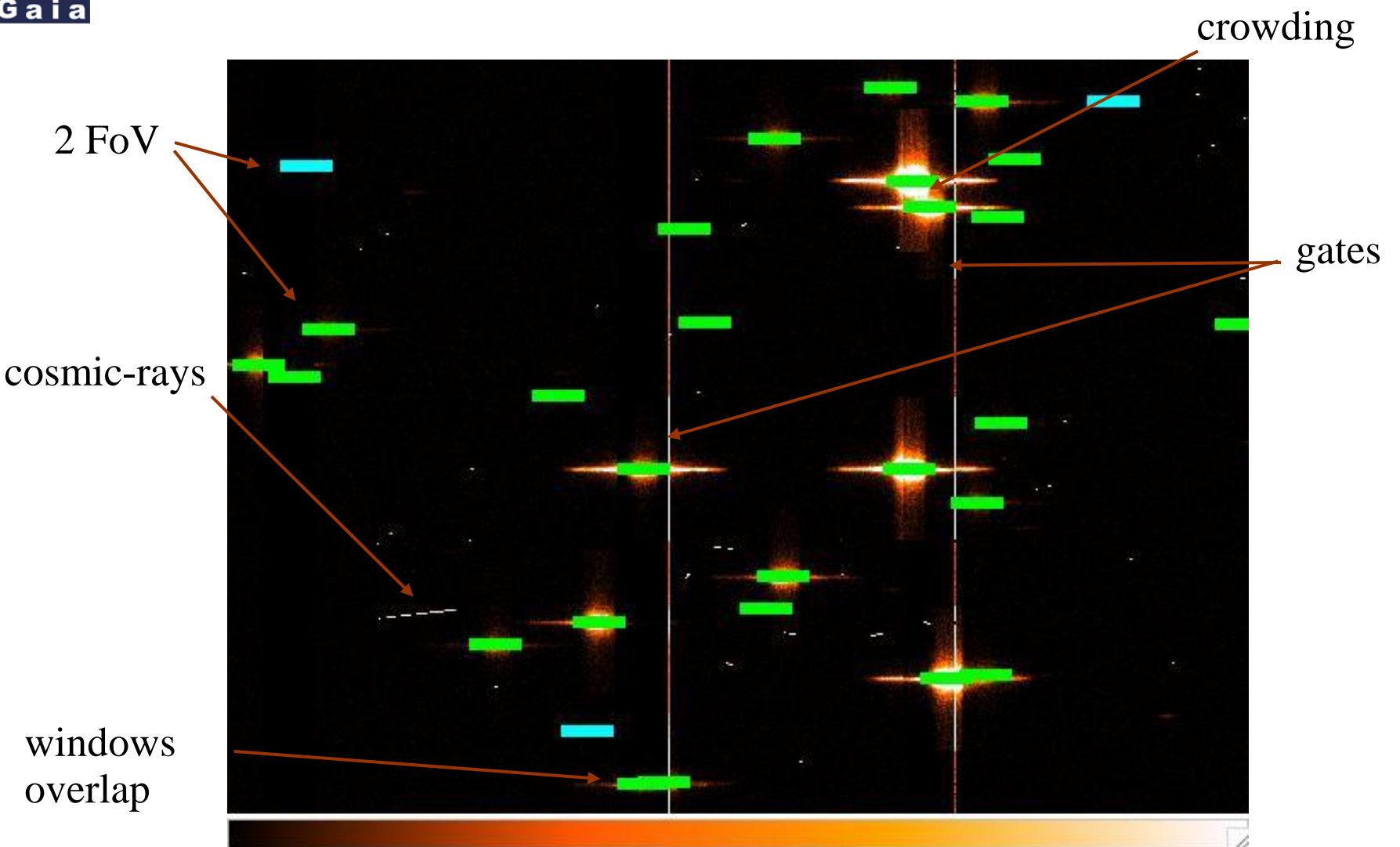


Echantillonnage astrométrique transmis

half exptime:
2.85s

pixel:
0.059" x 0.177"





Observation de l'amas ouvert ngc6231 avec les prismes BP/RP

Mais problème de surpopulation « crowding » : exemple un amas globulaire



Expected astrometric accuracies

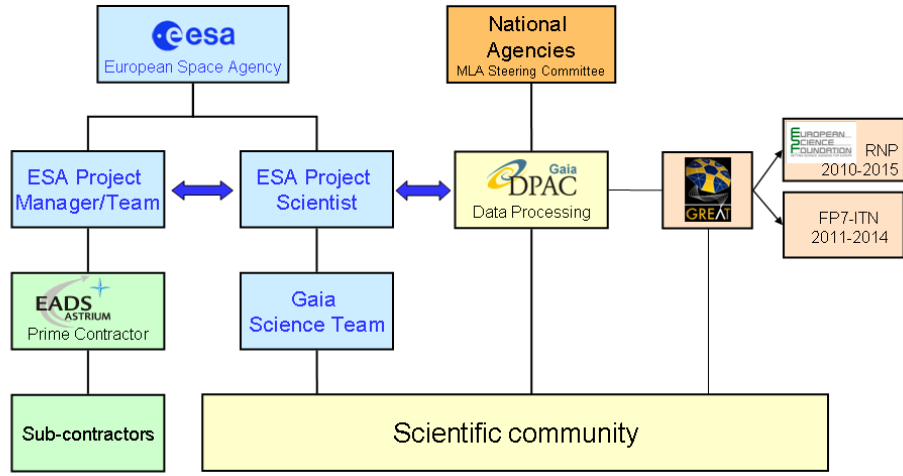
Sky-averaged standard errors for G0V stars (single stars, no extinction)

V magnitude	6 - 13	14	15	16	17	18	19	20	mag
Parallax	8	13	21	34	55	90	155	275	μas
Proper motion	5	7	11	18	30	50	80	145	$\mu\text{as} / \text{an}$
Position @2015	6	10	16	25	40	70	115	205	μas

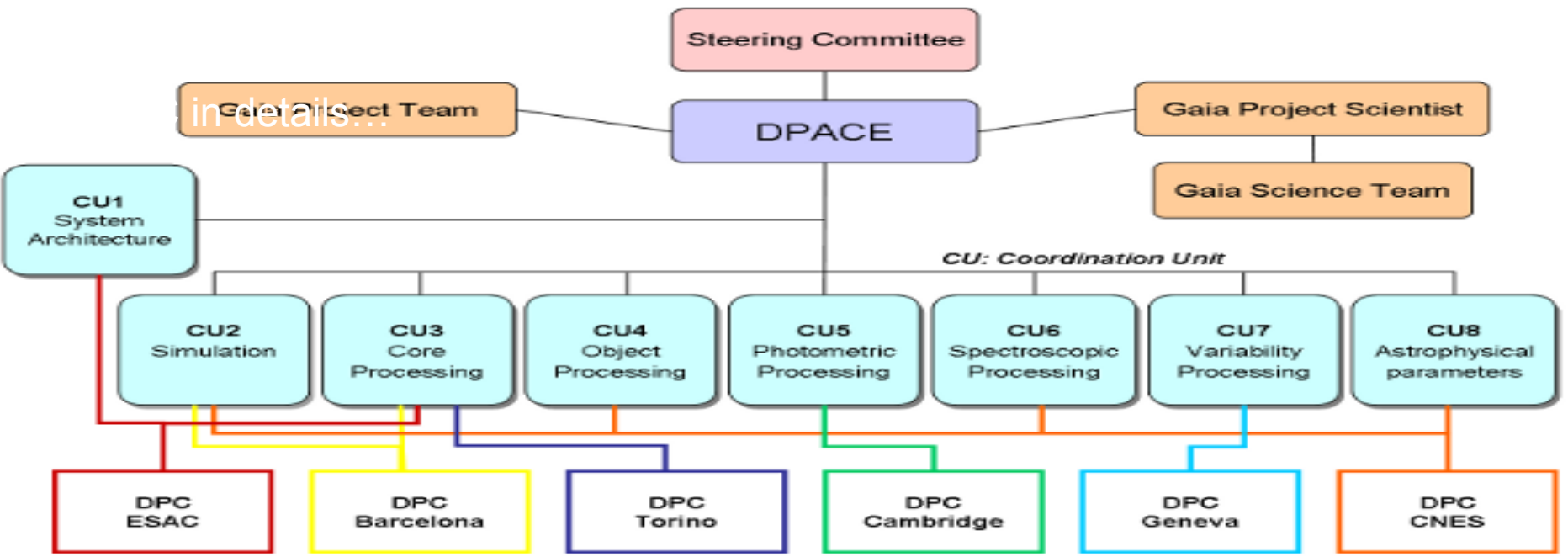
Notes:

- Estimates calculated with the Gaia Accuracy Tool (J. de Bruijne, ESA)
- Radiation-damage effects on CCDs not fully taken into account
- Estimates include a 20% margin (factor 1.2) for unmodelled errors

LE « DPAC consortium » pour traiter les données



in details...



DPC: Data Processing Centre

Pourquoi le satellite Gaia?

Un satellite

Hors atmosphère

Astrométrie (positions

Et mouvements)

→ distance des étoiles

Parallaxe → luminosité intrinsèque.

Relevé du ciel complet

Continuité, toutes sources

Les objets faibles

fonction de luminosité des étoiles faibles,

échantillons non biaisés.

Nombre et évolution d'objets

Phases d'évolution les plus rapides: SN, novae, variables,...

Pour échantillonner notre Galaxie

, etc.

PRECISION EXCEPTIONNELLE
ASTROMETRIQUE : CHAQUE OBJET
SERA VU ~70 fois

STRUCTURE 3D De la voie lactée

GAIA donne
Les distances,
Les positions
Et les vitesses
Des étoiles,
Associations
D'étoiles OB,

Dans le disque, le
halo, près du bulbe,
Près du centre
galactique, SGA



GAIA

10 kpc

>1 milliard d'objets
à magnitude $I = 20$

20 kpc

Plus de 20 amas globulaires
Des milliers de Céphéïdes et de RR Lyrae

Mouvements propres
plus précis que 1 km/s

Masse de la galaxie d'après la
courbe de rotation à 15 kpc

Soleil

30 amas ouverts
à moins de 500 pc

Mesure de la matière noire dans le disque à
partir des distances/mouvements des géantes K

Détection de planètes
comme Jupiter (200 pc)

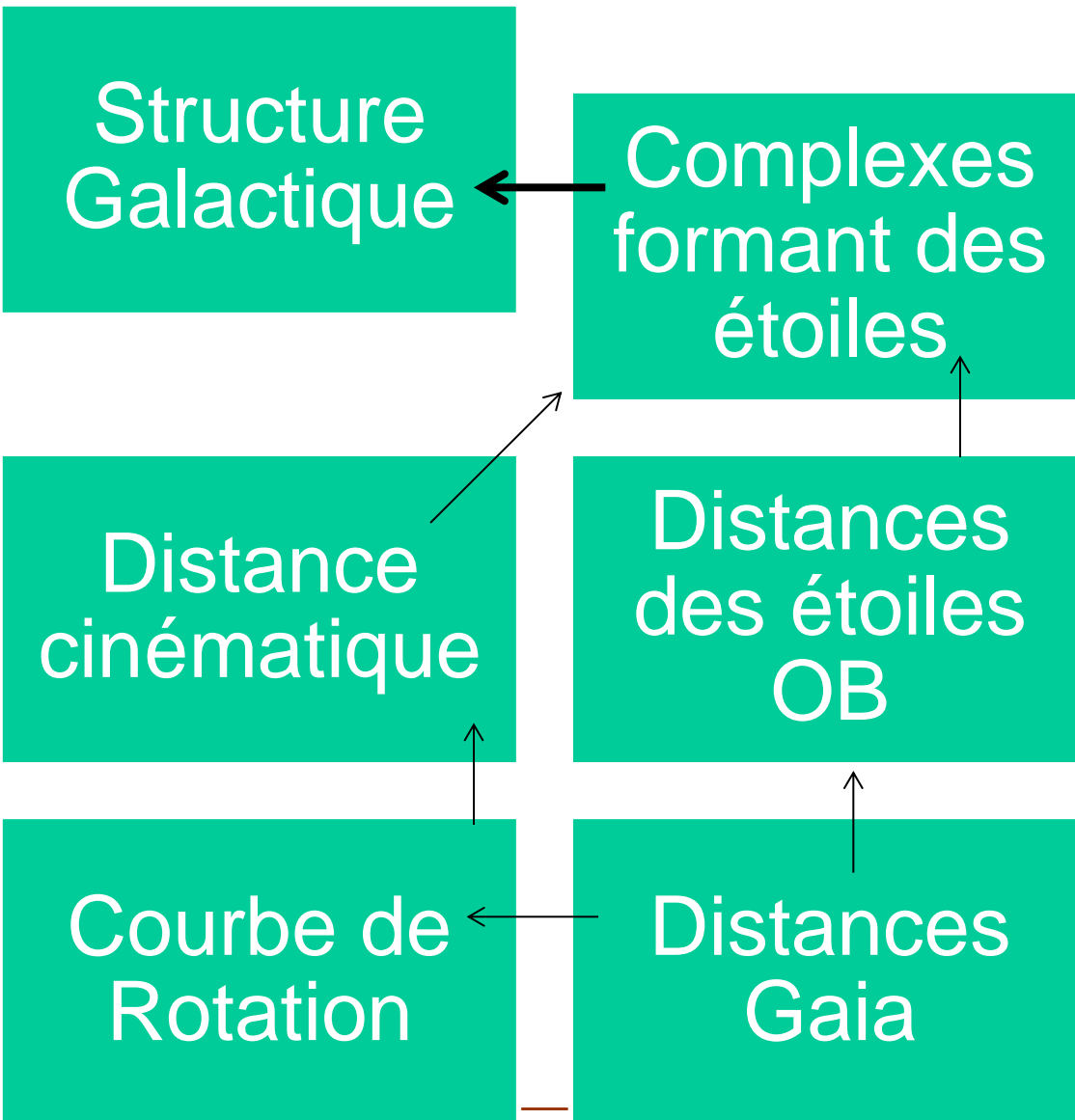
Mouvements propres des étoiles
des nuages de Magellan à 2-3 km/s

Cinématique du disque,
des bras spiraux et du bulbe

Distances plus
précises que 10%

Mesure de la courbure relativiste de la lumière précise à 10^{-6}

1 microarcsec/an = 300 km/s à $z = 0.03$
(raccordement direct à un référentiel inertiel)



One billion stars in 3-D will provide...

in our Galaxy...

the distance and velocity distributions of all stellar populations

the spatial and dynamic structure of the disk and halo

its formation history

a rigorous framework for stellar structure and evolution theories

a large-scale survey of extra-solar planets (~10–20,000)

a large-scale survey of Solar System bodies (~100,000)

support to developments such as VLT, JWST, etc

...and beyond

definitive distance standards out to the LMC/SMC

rapid reaction alerts for supernovae and burst sources (~20,000)

Intense star Formation regions relative to black holes in galaxies

QSO detection, redshifts, microlensing structure (~500,000)

fundamental quantities to unprecedented accuracy: γ to 10^{-6} - 10^{-7}

Adapted from Frédéric Arenou, Observatoire de Paris

Grand et Petit NUAGES de MAGELLAN

LMC



image width = 6°

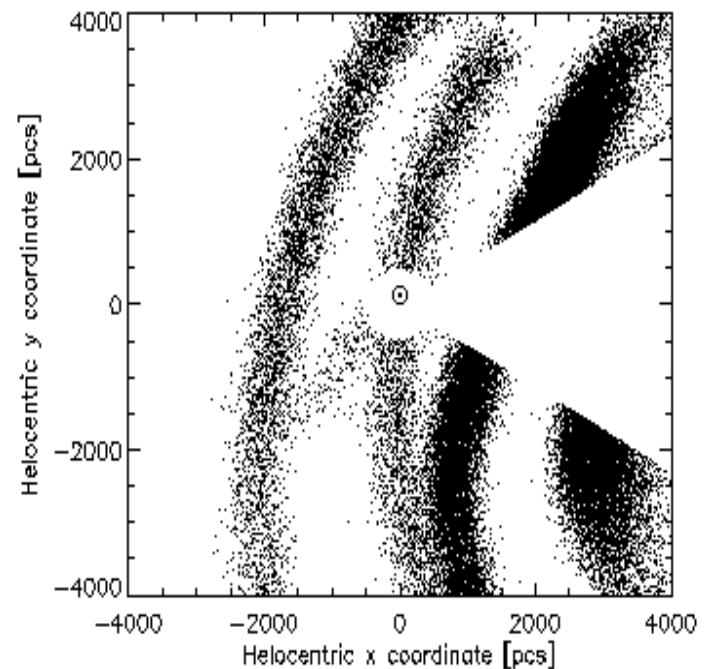
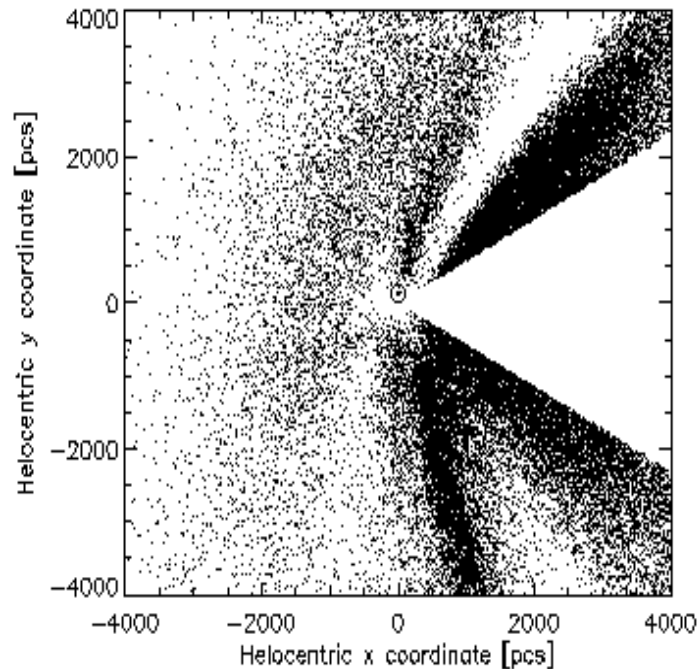
SMC



image width = 5.4°

Les bras spiraux vus par Gaia

Survey synthétique de 50 000 étoiles OB



distances photométriques

distances Gaia



LES QUASARS: Objets “Quasi-ponctuels”

Reconnaissance avec Gaia

Les objets les plus lumineux donc les plus lointains $z < 7$

$10^{11} - 10^{14} L_{\text{sun}}$; 1 to 1000 L_{galaxy} ; $M_B \sim -23 -30$; $10^{37}-10^{41} \text{ W}$

Radio loud (*quasars*) or radio quiet (QSO)

Variabilité sur des échelles de jours à mois

taille du coeur $< 0.1 \text{ pc}$

Paradigme relatif à leur structure

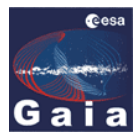
Luminosité d'Eddington \leftrightarrow Taux d'accrétion du SMBH

$$Mc^2 / 1 \text{ yr} = 2 \times 10^{47} \text{ J} / 3 \times 10^7 \text{ s} \sim 10^{40} \text{ W} = 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$$

RELATION FORMATION d'ETOILES – FORMATION DE TROUS NOIRS SUPERMASSIFS
en cours avec les radio galaxies lointaines : une clé pour la formation et l'évolution des galaxies

**AVEC Gaia: Detection avec SM pour $G < 20$ POINT SOURCES MAIS
DIFFICILES A IDENTIFIER DES ETOILES AVEC GAIA**

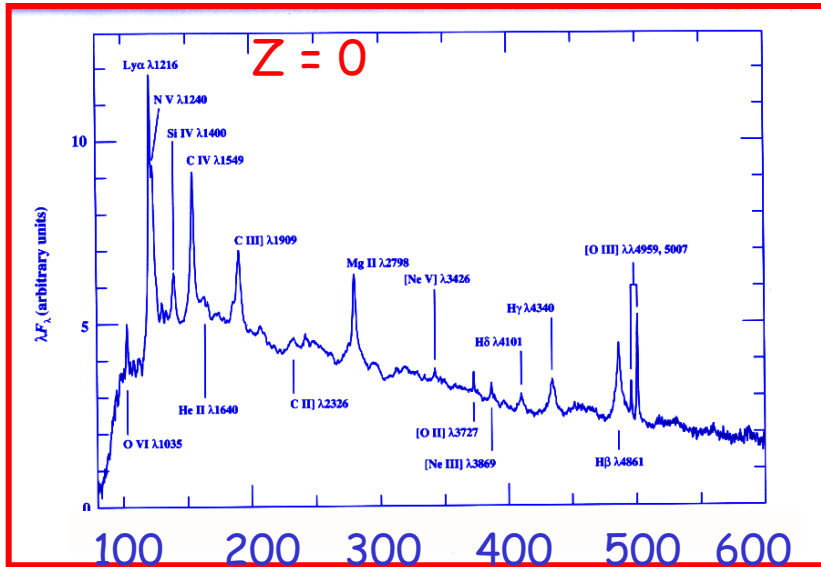
**“Blue bump” dans le spectre: Cette différence est un point-clé de
l'identification GAIA**



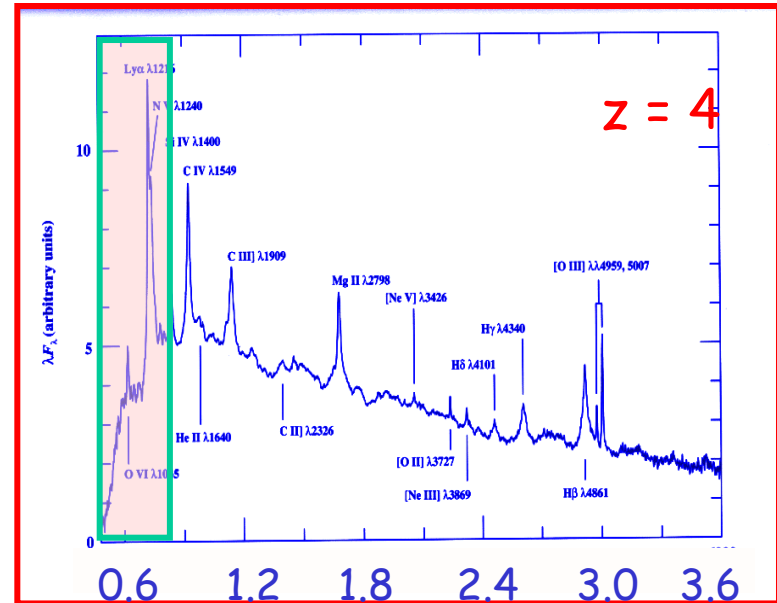
Reconnaissance des QSOs

- ~ 2/3 des QSOs du relevé Gaia survey seront nouveaux
- Ils seront identifiés par un processus “ built-in”
- La base de reconnaissance est une identification photométrique:
- Utilisation des images des prismes BP/RP
- Informations complémentaires: mouvements propres, parallaxes pour les non QSOs, galaxie hôte, données au sol

Distribution d'énergie spectrale

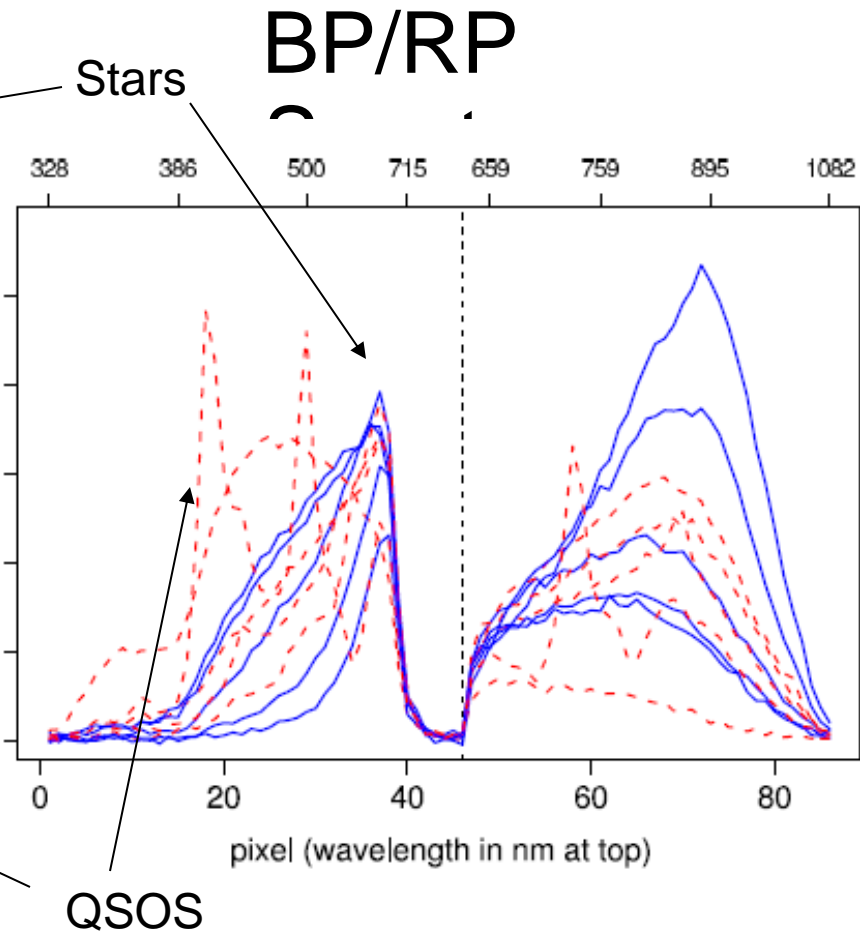
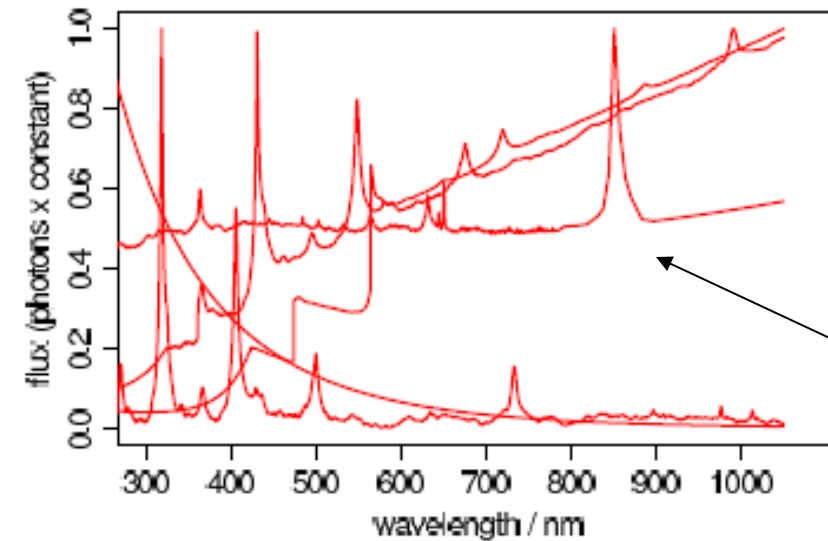
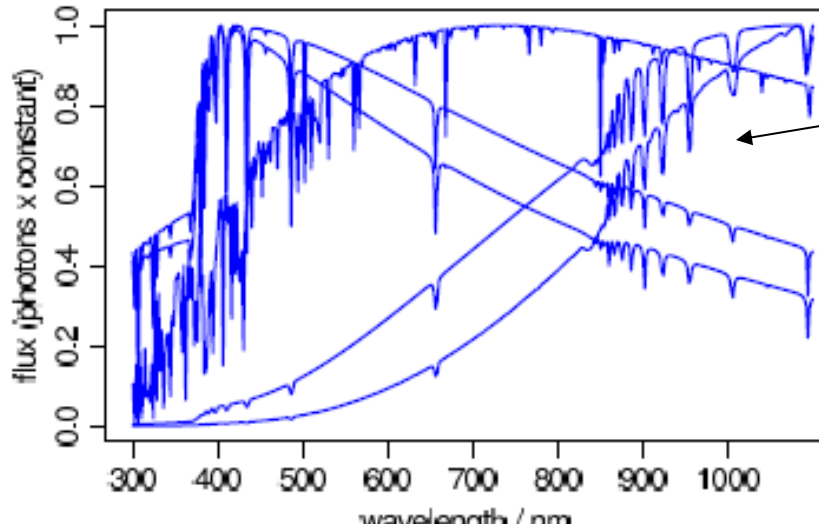


λ (nm)



λ (μ m)

QSOs avec Gaia RP/BP



C. Bailer-Jones et al., 2009

Résultats simulés de reconnaissance de QSOs avec Gaia

Méthodes de Classification très avancées J.F. Claeskens (Univ. of Liège), C. Bailer-Jones, K. Smith, (Heidelberg)

Probabilités de classification , résultats:

- Un relevé sur 100 deg^{-2} avec 1% d'erreur sur le test de sélection
 - 2000 quasars (max) et
 - 30 000 étoiles à $b = 0^\circ$ ==> efficacité de 3%
 - 3000 étoiles à $b = 60^\circ$ ==> efficacité de 40%

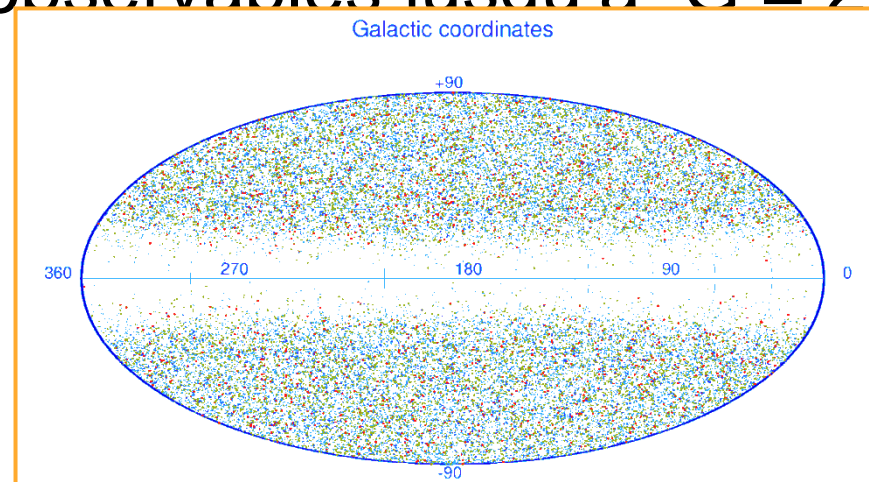
GAIA observera ~ 500 000 QSOs $G < 20$

- **~ 10^9 stars : un test de classification, $\sim 2 \times 10^{-3}$**

Distribution des QSOs avec Gaia

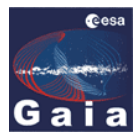
Basée sur la simulation utilisée dans le modèle d'Univers (DPAC)

Environ 600,000 observables jusqu'à $G = 20$



• $G < 18$ • $18 < G < 19$ • $19 < G < 20$

Slezak & Mignard, 2007



Classification des sources

CU8 resultats, K. Smith (MPIA Heidelberg) et le DPAC

~10⁹ étoiles avec binaires

Plusieurs centaines de milliers de Naines Blanches

500.000 à 1 million de galaxies non résolues

500.000 quasars

Nombreux objets du système solaire

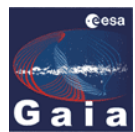
Objectif principal du traitement des données (DPAC) : → répartir les sources par classe (DSC)

Une classe est une catégorie de sources

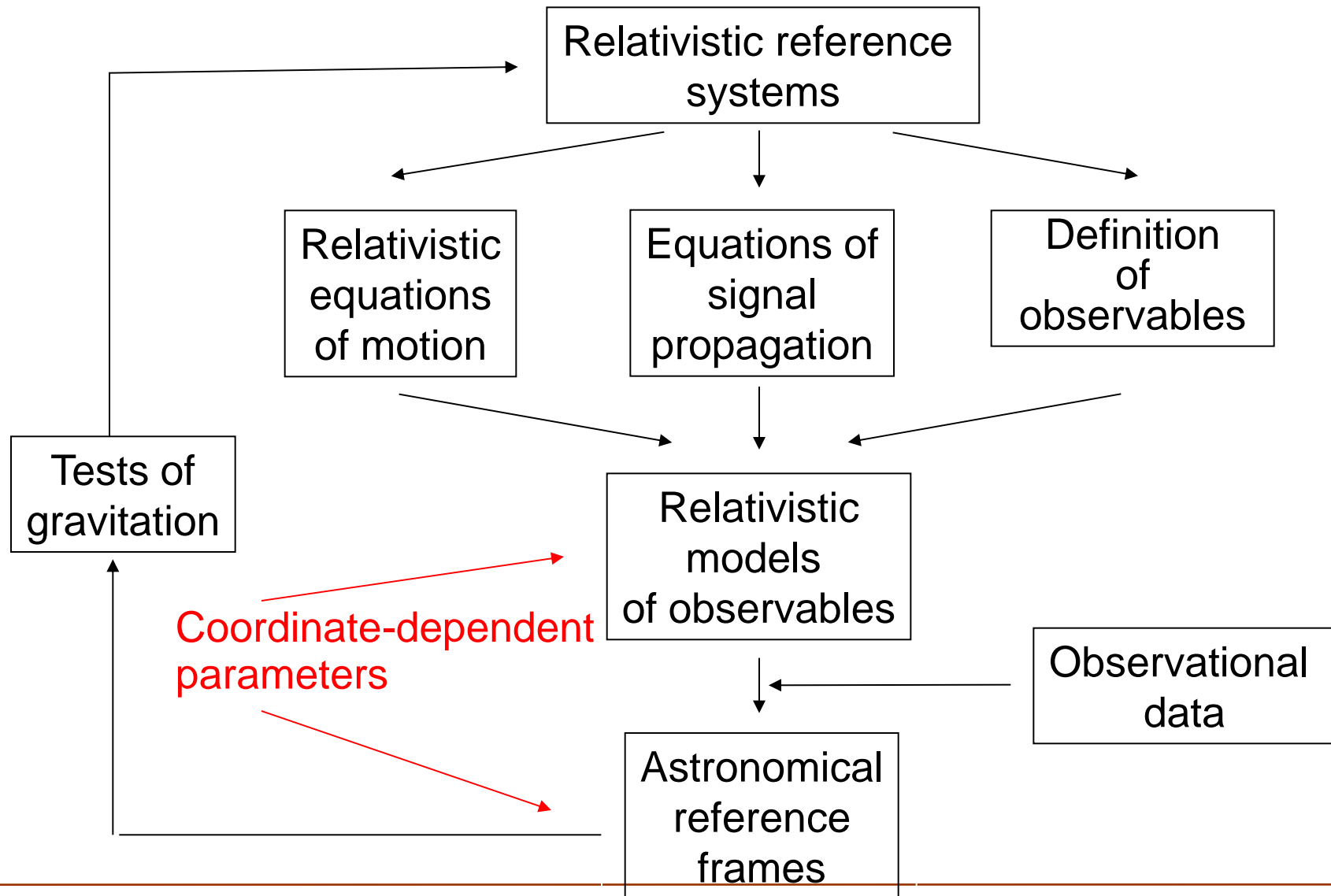
Un objet est rattaché à une classe de sources par une probabilité

Idéalement on aimerait $P(O \in \text{une classe}) = 1$

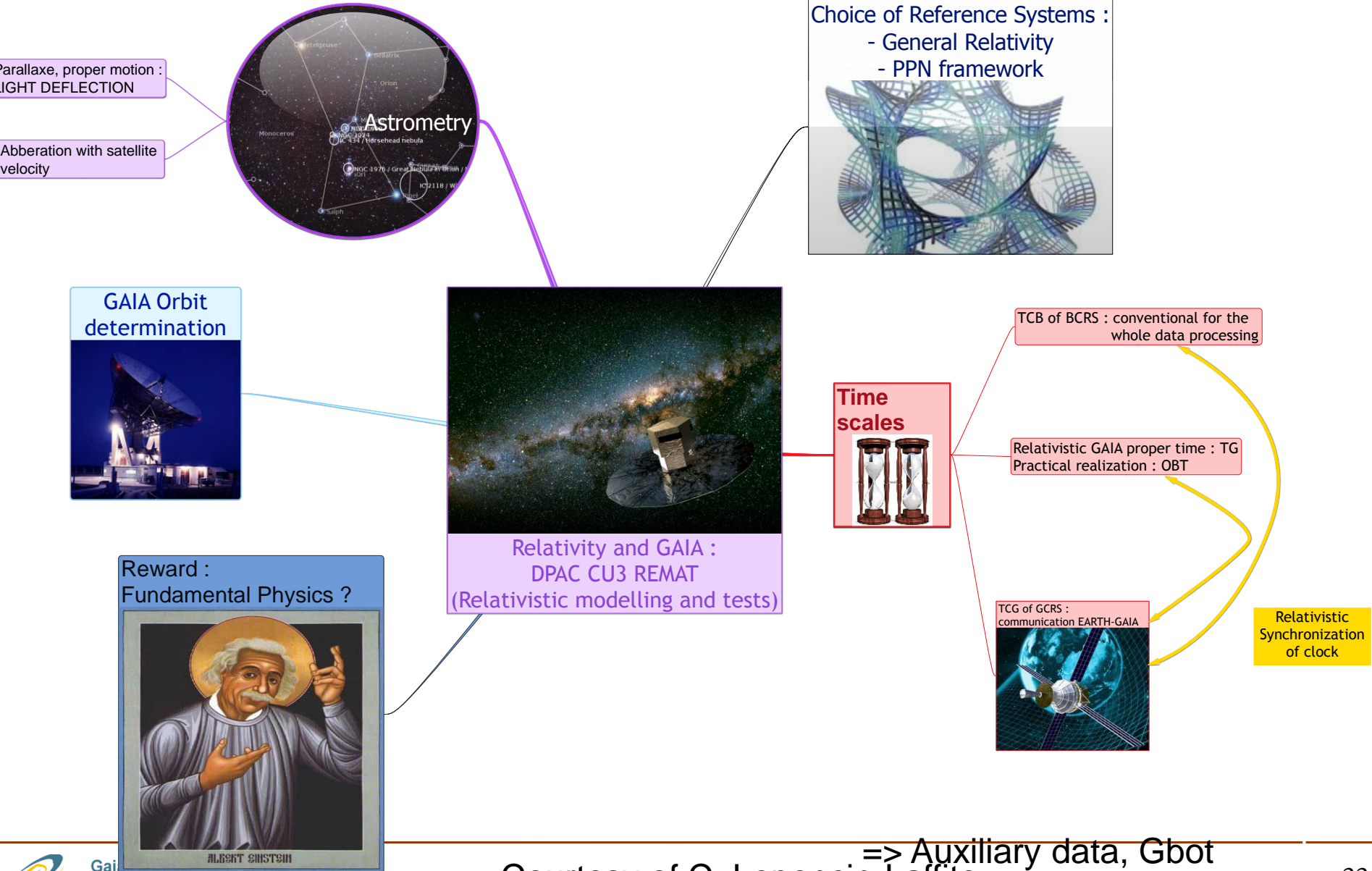
travaille comme un classificateur de sources. Les classes sont définies par ajustements externes



Les QSOs observables pour l'ASTRONOMIE RELATIVISTE: bases



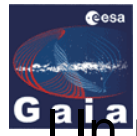
les multiples perspectives de Gaia en physique fondamentale



=> Auxiliary data, Gbot

Courtesy of C. Leponcin-Laffite

Reference systems theory

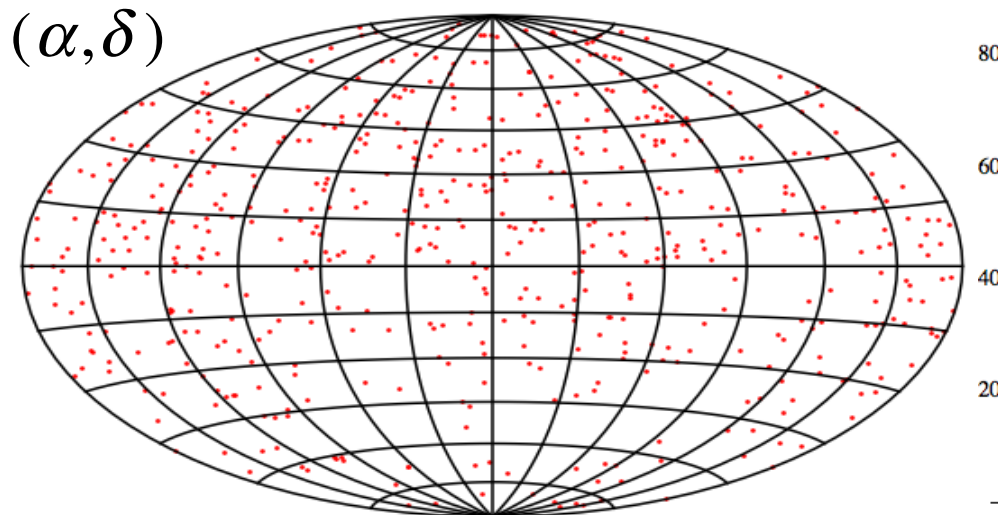
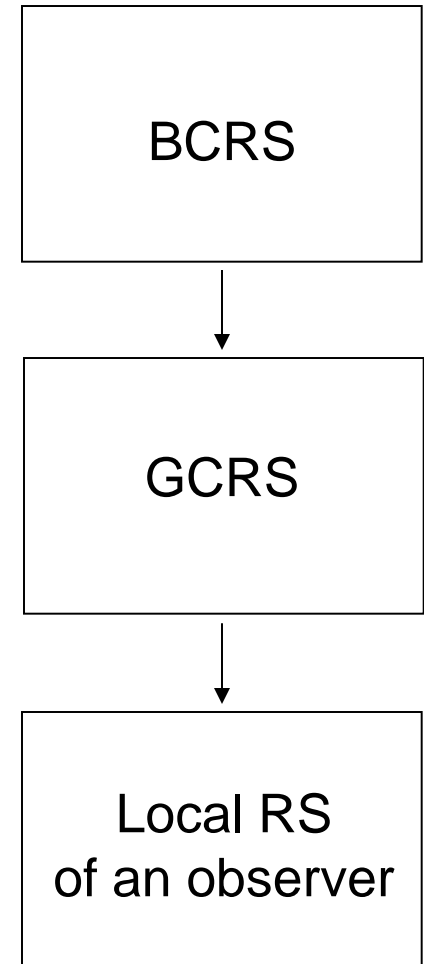


In relativistic astronomy the

- | **BCRS** (Barycentric Celestial Reference System)
- | **GCRS** (Geocentric Celestial Reference System)
- | **Local reference system of an observer**

play an important role.

All these reference systems are defined by
the form of the corresponding metric tensor.



Bini, 2003

Klioner, 2004

Gaia and relativistic timescales



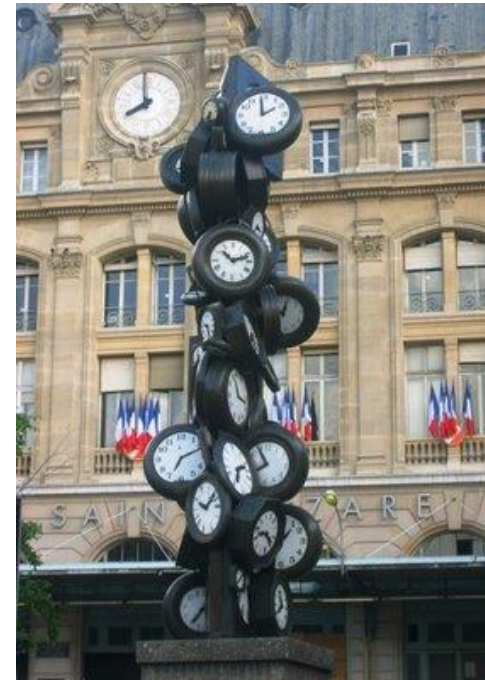
Two fundamentals relativistic time scales : TCB barycentric, TCG geocentric (c.f. relativistic reference system theory)

Many others for practical use :

- TDB, barycentric, for planetary ephemerides
- TT, UTC, TAI, terrestrial

And for Gaia ??

- Everything has to be done in BCRS, so time scale = TCB
- Usually ephemerides in TDB. But with IAU 2006, relation between TDB & TCB is a fixed linear function
- Proper time TG and TCB well known, idem for TCG & TCB (some integrals have to be calculated)
- OBT is the realization of TG. OBT & TCB have to be related: problem...



Courtesy of C. Leponcin-Laffite

Global test from light deflection

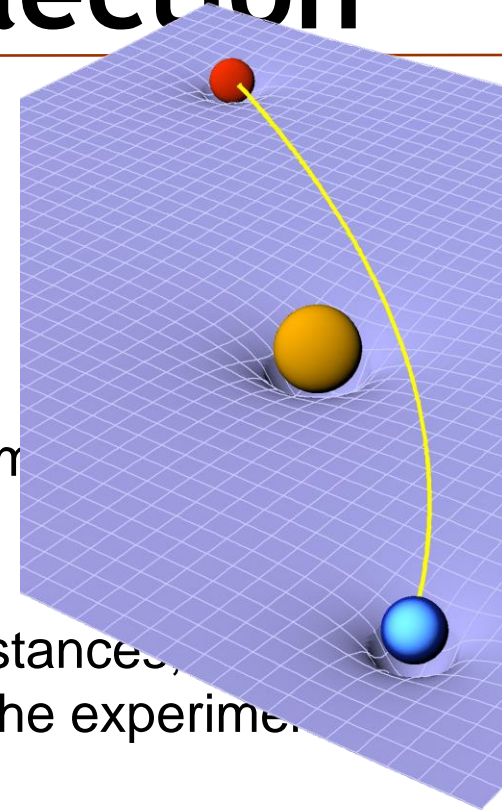
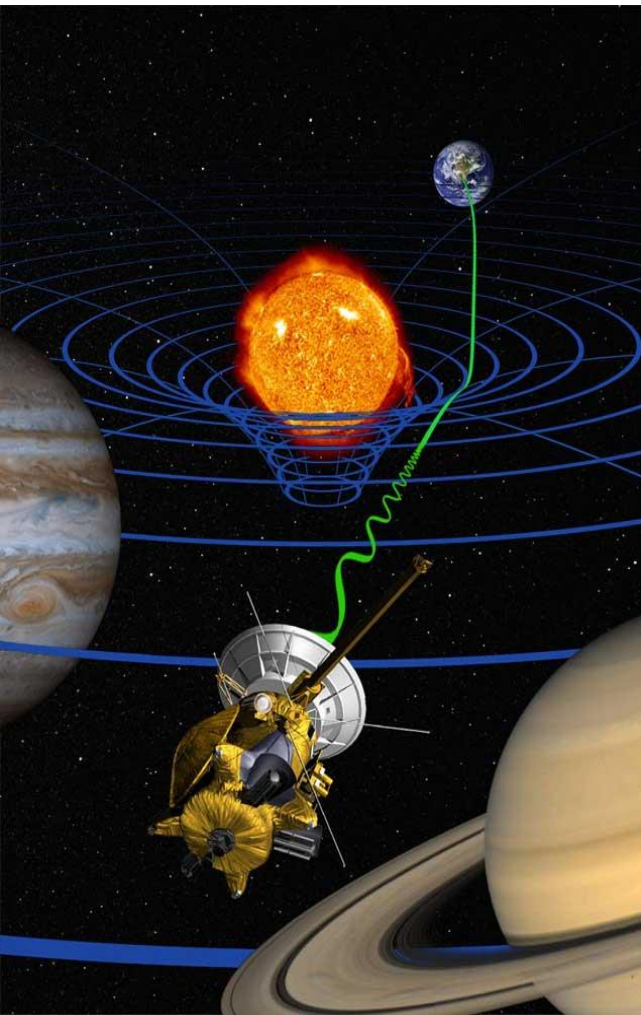
Gaia

- Most precise test possible with Gaia

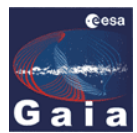
Preliminary analysis: ESA, 2000; Mignard, 2001;
Vecchiato et al., 2003, Hobbs 2010 :

$$\sigma_{\gamma} < 10^{-6}$$

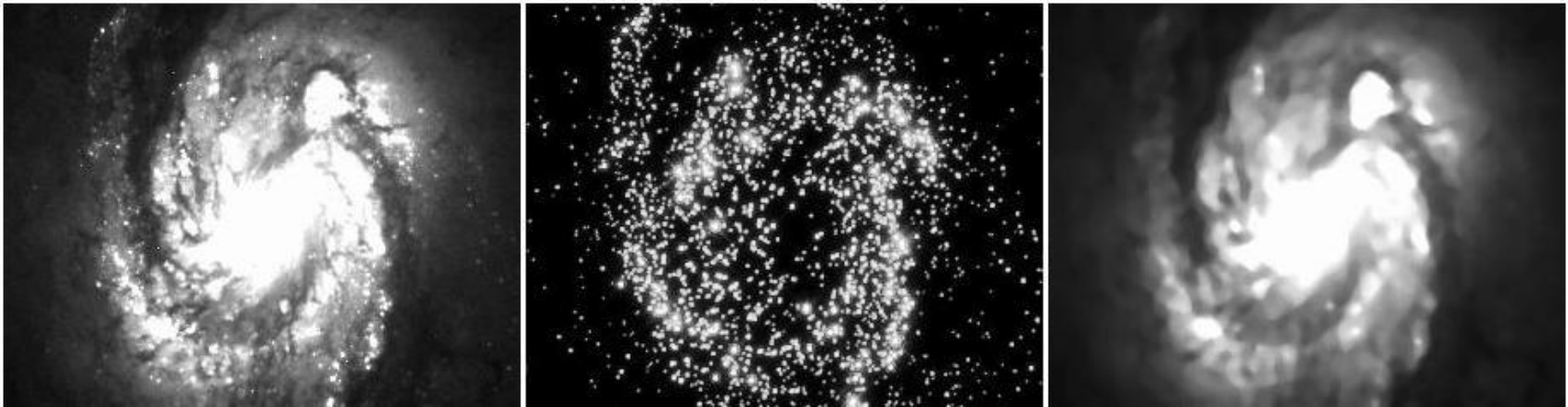
- Advantages of the Gaia experiment
 - optical,
 - deflection (not Shapiro),
 - wide range of angular distances,
 - full-scale simulations of the experiment.
- Problems with some of the *current best estimates* of gamma (Cassini, 10⁻⁵)
 1. special fits of the post-fit residuals of a standard solution (missed correlations lead to wrong estimates of the uncertainty);
 2. no special simulations with simulated data to check what kind of effects we are really sensitive to.



Courtesy of C. Leponcin-Laffite

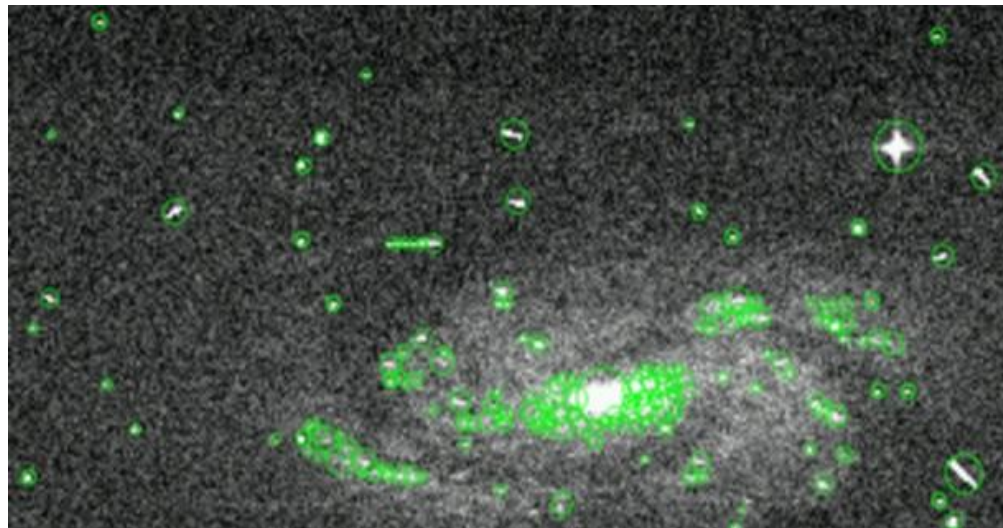


- Détection d'objets jusqu'à 0.2 arcsec
- Objets concernés:
 - « SSOs » (taille réelle + mouvement induit)
 - Galaxies
 - Binaires
 - Rayons Cosmiques
 - Régions HII
 - Amas globulaires Compacts
 - Supernovae explosions
 - ...



Deconvolution using StarFinder (Diolaiti et al. 2000)

M100



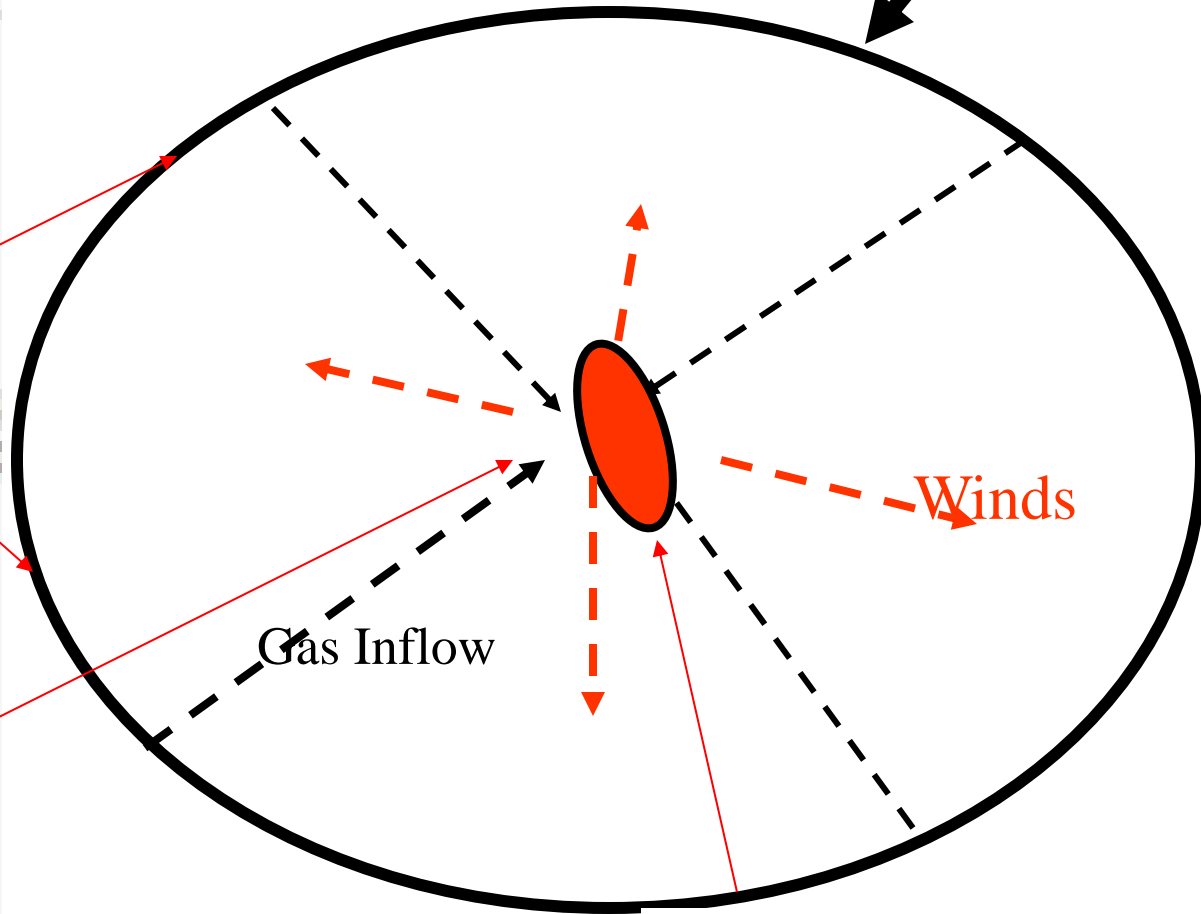
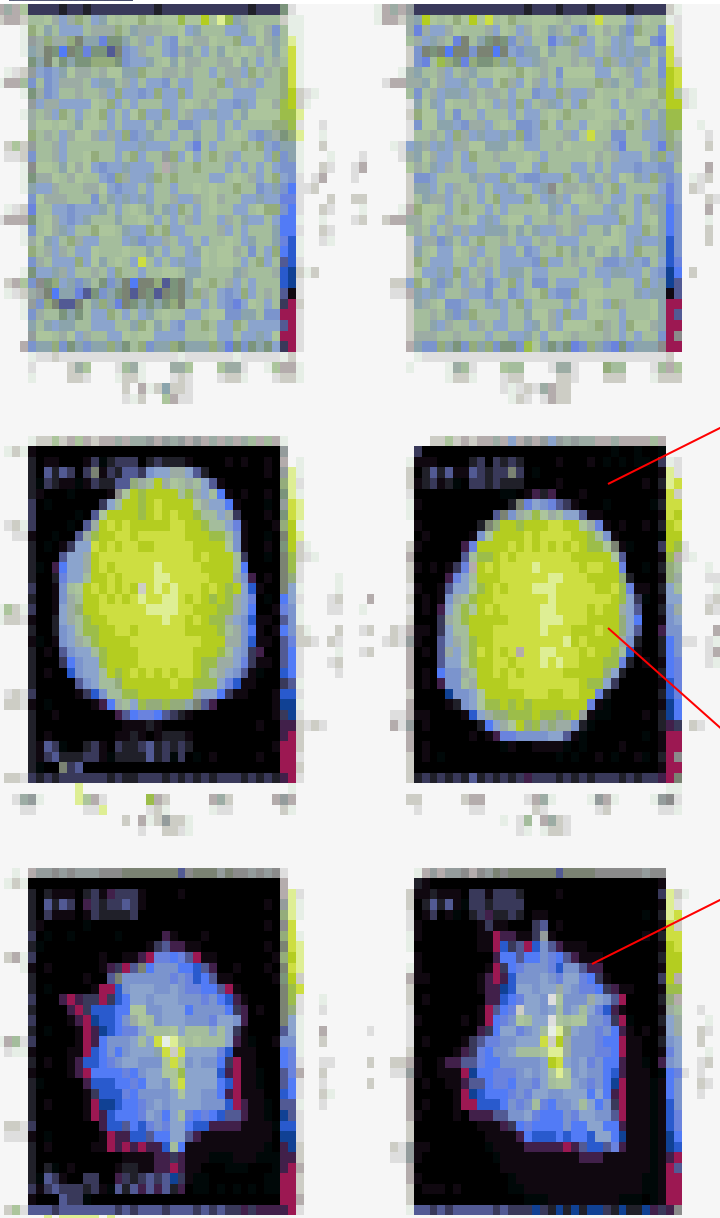
SM 32"x32"
from HST-PC

Gaia pour calibrer les simulations de galaxies synthétiques



AVEC LE CODE d'EVOLUTION
PEGASE
www2.iap.fr/pegase

M_{baryon} : initial gas
cloud (reservoir)



INFALL, WINDS= $f(t)$

Initial GAS RESERVOIR

Star Formation
SFR, IMF, Z_{init}

Evolutionary Tracks

Stellar evolution

Library of stellar spectra

Death of stars
SN, PN, gas enrichment

Nucleosynthesis

age

SYNTHETIC SPECTRAL
ENERGY DISTRIBUTION
AND COLORS = $f'(\text{age})$

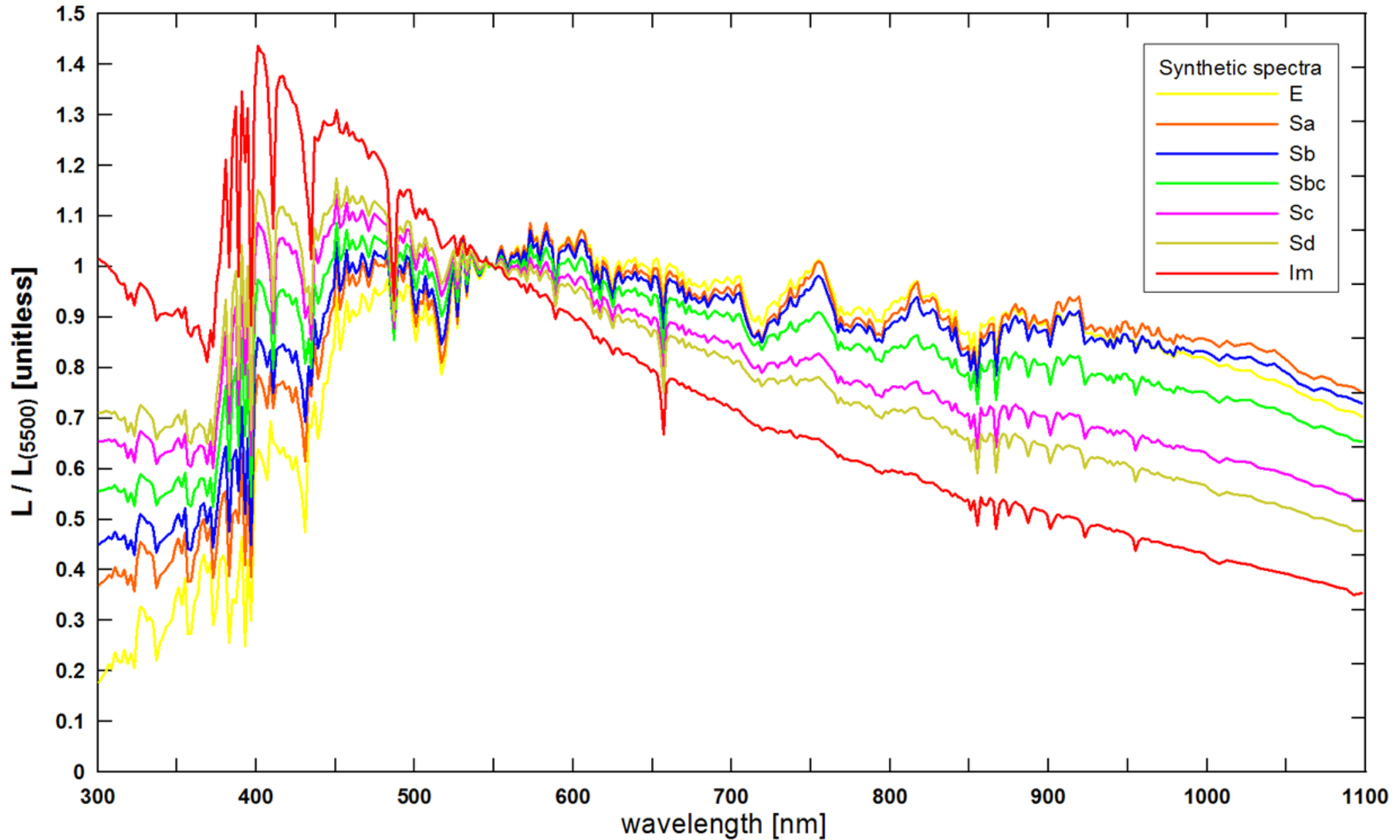
Metallicity $Z=f'(\text{age})$

Residual gas=
 $f'(\text{age})$

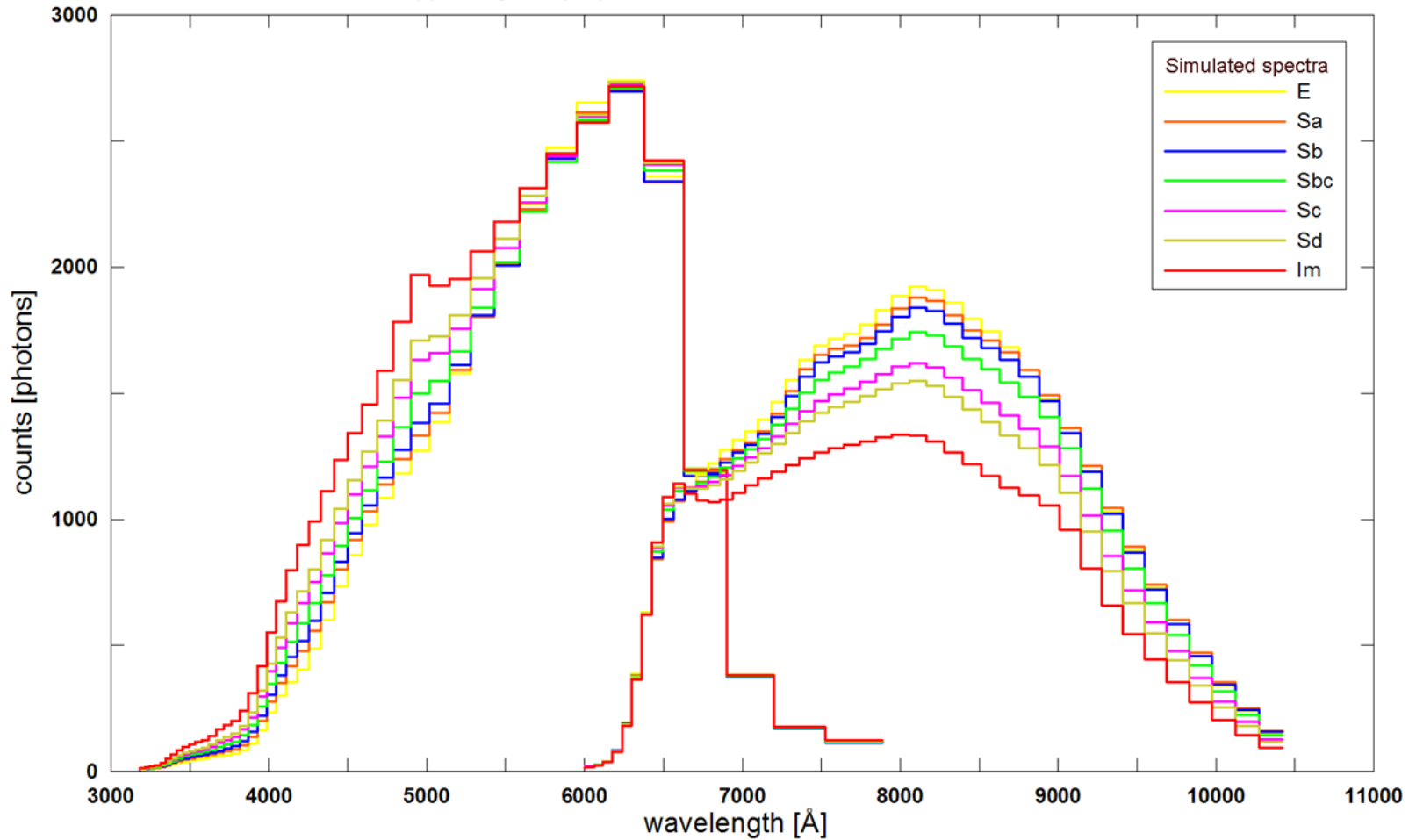
Mass of
Stars, Gas
Metals =
 $f'(\text{age})$

Dust mass = $f'(\text{age})$

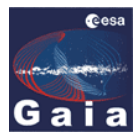
Typical galaxy spectra produced with Pegase.2



Typical galaxy spectra simulated for GAIA BP/RP



Distributions d'énergie par type de galaxies dispersées par les prismes bleu et rouge



Apprentissage d'une machine de reconnaissance à réseaux neuronaux : UNRESOLVED GALAXY CLASSIFIER (UGC)

Objectifs: A partir de paramètres physiques spécifiques aux sources observées, distribution d'énergie, températures, gravités, etc

Implémentation: sur les « pipelines » au sol des logiciels de traitement

et Gaia « MAIN DATA BASE »

Procédure:

données semi-théoriques ou simulées (magnitudes

→ contraintes instrumentales (bruits, efficacité, rendement de l'instrument)

→ Filtres instrumentaux de Gaia

→ UGC classifier

→ Gaia Main Data Base (pour reconnaissance on line)

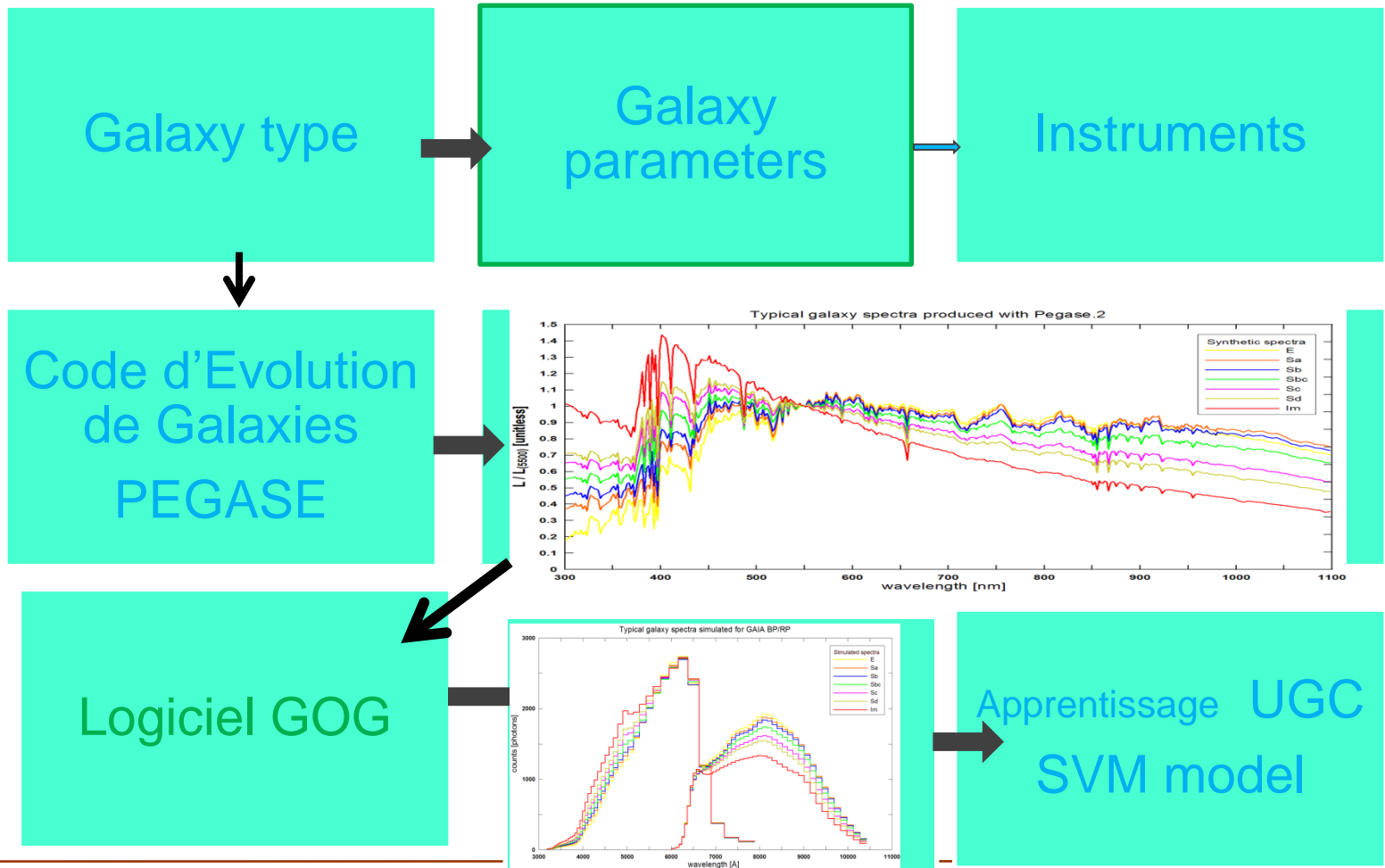
Apprentissage de l'UGC

A partir d'une « SUPPORT VECTOR MACHINE »

Paramètres (Galaxy type, SF, z, Ao, Gmagnitude, profil, density)

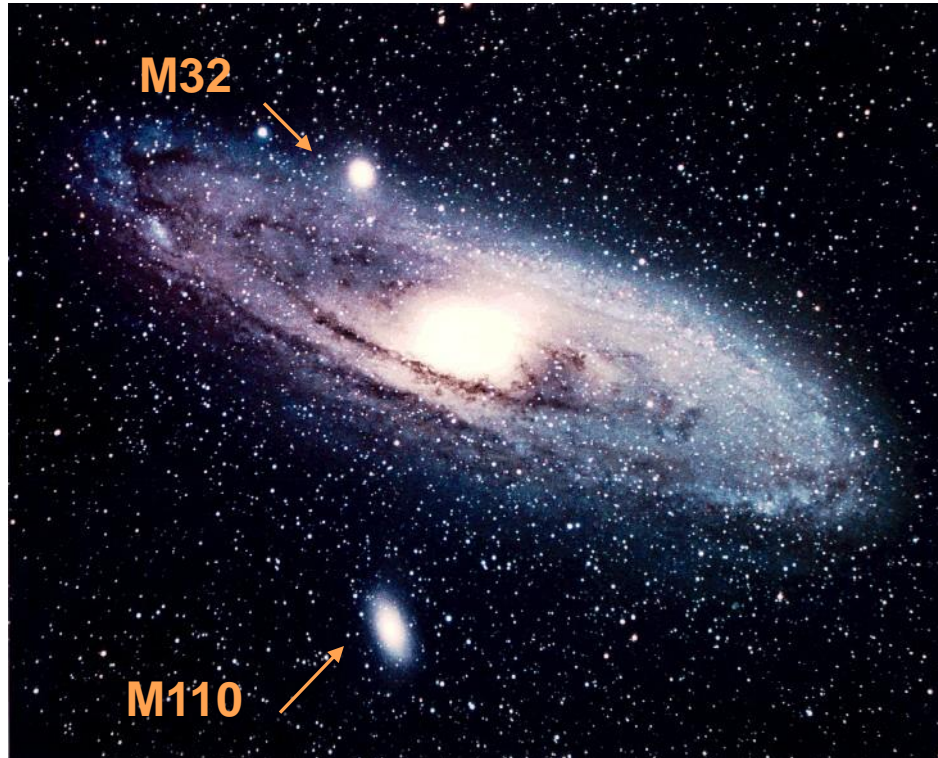
~ 6 millions de galaxies

Reconnaissance automatiques des objets PROCEDURE d'APPRENTISSAGE DU SVM (Support Vector Machine) pour les prismes BP/RP



Quelles cibles seront affectées par la surpopulation?

8'x6'



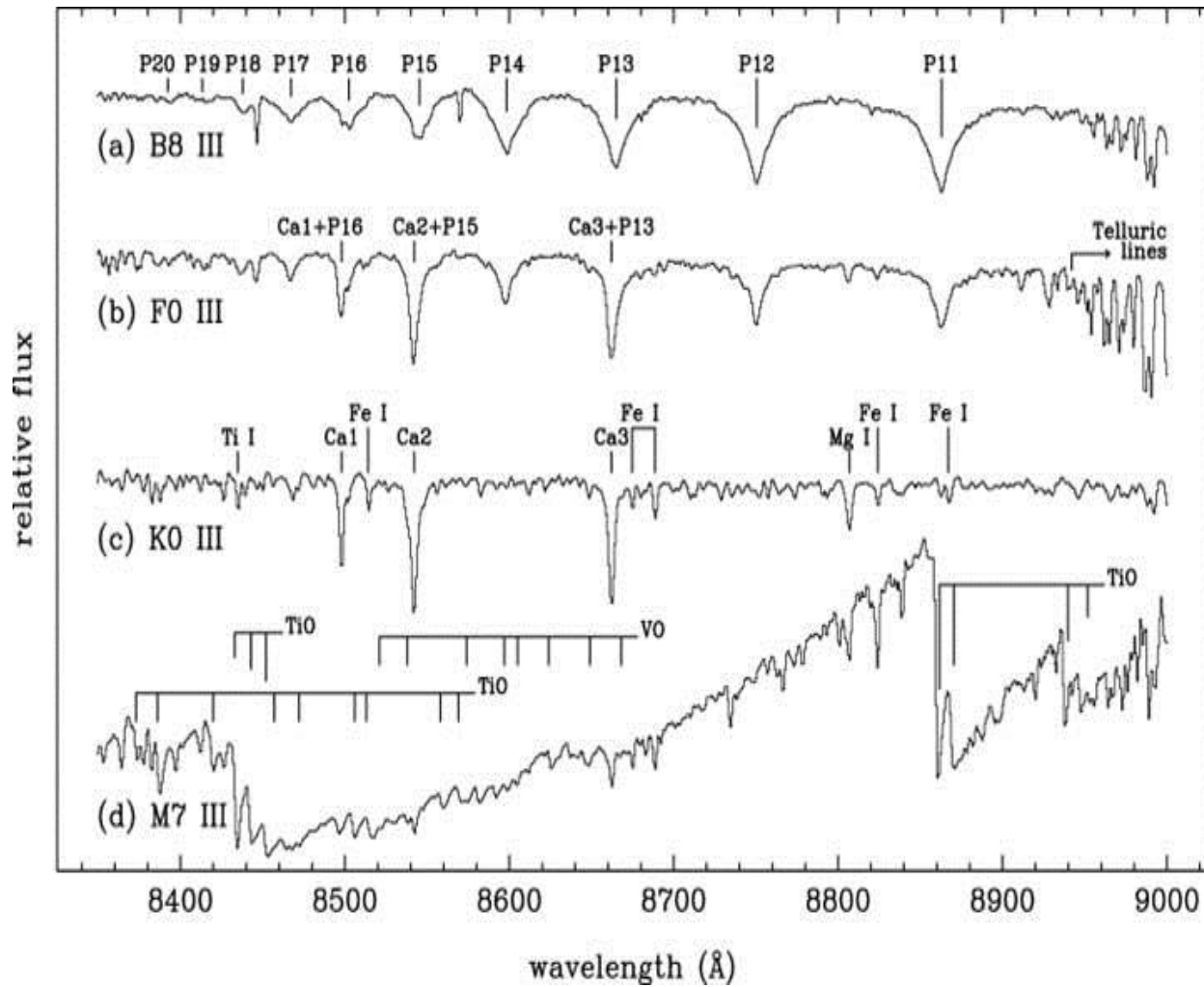
17'x10'

M31 ($3^\circ \times 1^\circ$)

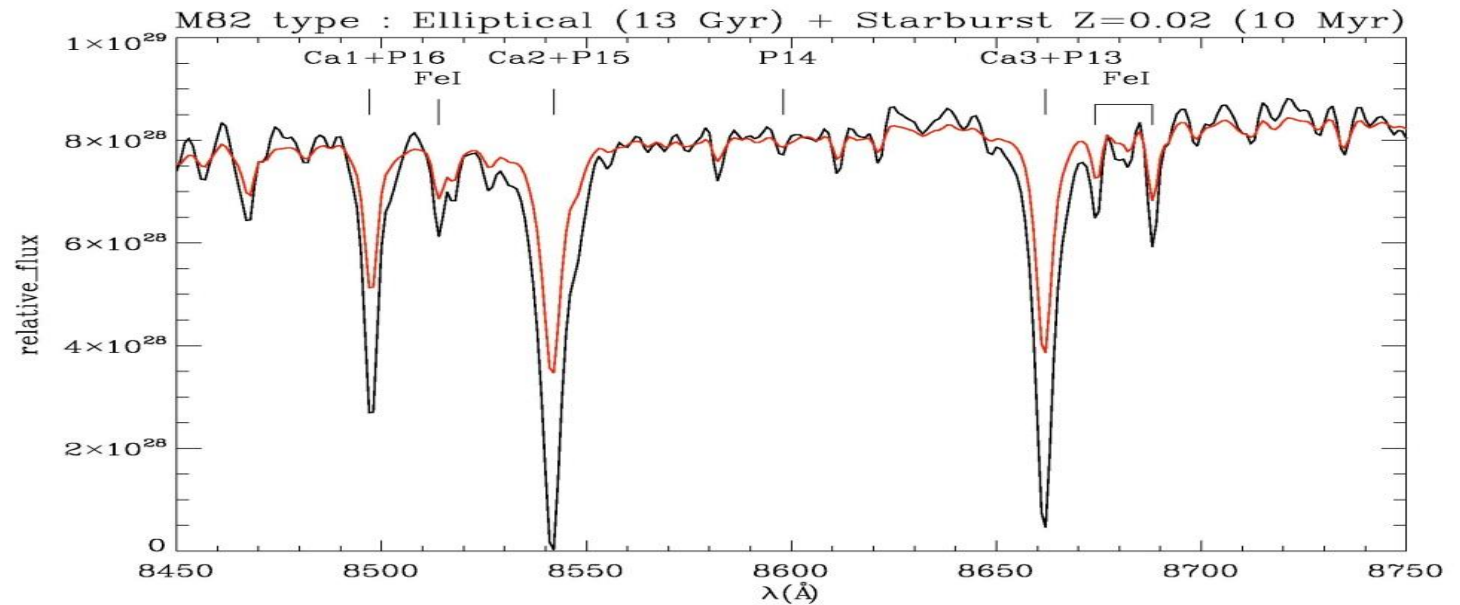


M33 (73'x45')

Reconnaissance des spectres avec le RVS: domaine de longueur d'ondes Hydrogène (raies Paschen), Ti, Fe, et surtout Triplet du Calcium CaT



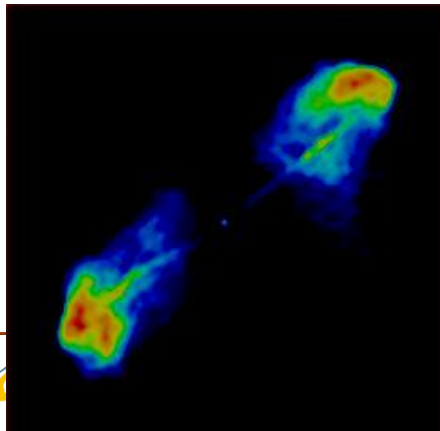
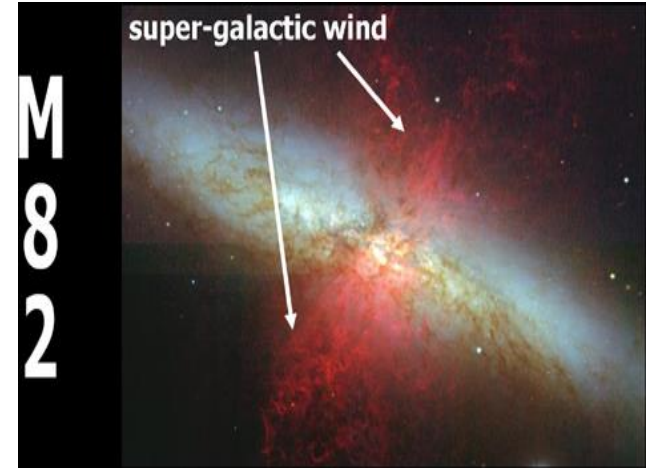
Synthèse des galaxies vues avec le RVS avec le code Pegase



Les galaxies les plus fascinantes avec Gaia: celles qui présentent les contrastes significatifs: INTERACTIONS, FORMATION D'ETOILES, hôtes de TROUS NOIRS ACTIFS, etc

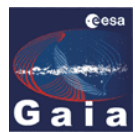


Les Antennes:



RADIO GALAXIES

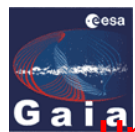




Et aussi Planètes mineures, planétésimaux et astéroïdes, troyens, météorites terrestres....

- Gaia donnera les positions et vitesses des astéroïdes, les densités de planétésimaux durant 5 ans avec une détermination et une précision remarquable des orbites ,
- Permettra de prévoir quand et où une observation par un petit corps sera observable
- De la position L2, le satellite donnera les positions de petits objets tournant autour du soleil à l'intérieur de l'orbite terrestre,

Il faudrait plus de temps pour parler des nombreuses performances dans ce domaine...



Conclusions sur la science avec Gaia

Une ASTROMETRIE EXCEPTIONNELLE ($\sim 10 \mu\text{as}$)

Des mesures de distances robustes

Une détection inhabituelle: contraste plutôt que seuil

Des conséquences innombrables et fondamentales

- Décryptage de la Galaxie (**populations stellaires: distances, cinématique et caractéristiques physiques; 1ères étoiles**)
- Physique stellaire (**classification, M, L, Log g, T_{eff} , [Fe/H], etc**)
- Échelle des distances (**géométriques 10 kpc, Céphéides, RR Lyr**)
- Dynamique de la Galaxie et du Groupe Local (**interactions, centre galactique, trou noir, micro quasars, matière noire**)
- Âge de l'Univers (**diagrammes d'amas globulaires, distances, luminosité**)
- Galaxies locales (**compactes, résolues en étoiles, non résolues,...**)
- Galaxies en activité: **AGNs, QSOs, radio sources, Seyferts, région HII,**
- Relation formation d'étoiles et de trous noirs
- Systèmes de référence (**Quasars, astrométrie**)
- Planètes extrasolaires (**$\sim M_J$, astrométrie et transits**)
- Physique fondamentale (**$\gamma \sim 5 \times 10^{-7}$, précession du périhélie des astéroïdes à $\sim 5 \times 10^{-4}$**)
- Système solaire (**Taxonomie, Masses, Orbites**)

ET TOUT CE QUI N'EST PAS PREVU: découvertes

Tout est prêt pour le lancement le 20 décembre

Remerciements à:

François Mignard, OCA

Frédéric Arénou, Observatoire de Paris, GEPI, Meudon

Christophe Leponcin-Laffite, Syrte, Observatoire de Paris

Carine Babusiaux, Observatoire de Paris, GEPI, Meudon

Pour leurs documents et conseils

MERCI