GRAVITY
Première science

Journée 2018 OCA/Collège de France

Guy Perrin

l'Observatoire de Paris — LESIA
Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

Lundi 14 mai 2018

Génèse du projet GRAVITY

- 2004 :
  - rapport de l'implementation committee du VLTI : *Reference missions for PRIMA*
  - F. Delplancke, M. Gai, **R.Genzel**, A. Glindemann, **F. Eisenhauer**, **T. Ott**, **T. Paumard**, **G. Perrin** (coordinateur), J.U. Pott, J. Surdej, O. Von der Lühe
  - Plusieurs sujets dont **GC** + **AGN**
- 2005 : réunion MPE-LESIA : décision de proposer un projet commun dimensionné pour le Centre Galactique
- 2006 : sélection de GRAVITY pour une phase A

Consortium GRAVITY

Le consortium GRAVITY

Frank Eisenhauer, Guy Perrin, Wolfgang Brandner, Christian Straubmeier , Karine Perraut , Antonio Amorim , Markus Schöller, Reinhard Genzel, Pierre Kervella , Myriam Benisty, Sebastian Fischer , Laurent Jocou, Paulo Garcia, Gerd Jakob, Stefan Gillessen, Yann Clénet , Armin Boehm, Constanza Araujo-Hauck, Jean-Philippe Berger, Jorge Lima, Roberto Abuter, Oliver Pfuhl, Thibaut Paumard, Casey P. Deen, Michael Wiest , Thibaut Moulin, Jaime Villate, Gerardo Avila, Marcus Haug, Sylvestre Lacour , Thomas Henning, Senol Yazici , Axelle Nolot , Pedro Carvas, Reinhold Dorn, Stefan Kellner, Eric Gendron, Stefan Hippler, Andreas Eckart , Sonia Anton, Yves Jung, Alexander Gräter, Élodie Choquet , Armin Huber, Narsireddy Anugu , Philippe Gitton, Eckhard Sturm, Frédéric Vincent , Sarah Kendrew, Stefan Ströbele, Clemens Kister, Pierre Fédou, Ralf Klein, Paul Jolley, Magdalena Lippa, Vincent Lapeyrère, Natalia Kudryavtseva, Christian Lucuix, Ekkehard Wieprecht, Frédéric Chapron, Werner Laun, Leander Mehrgan, Thomas Ott, Gérard Rousset , Rainer Lenzen, Marcos Suarez, Reiner Hofmann, Jean-Michel Reess, Vianak Naranjo, Pierre Haguenauer, Oliver Hans, Arnaud Sevin , Udo Neumann, Jean-Louis Lizon, Markus Thiel, Claude Collin , Jose Ricardo Ramos, Gert Finger, David Moch, Daniel Rouan, Ralf-Rainer Rohloff, Markus Wittkowski, Richard Davies, Denis Ziegler , Karl Wagner, Henri Bonnet, Katie Dodds-Eden, Frédéric Cassaing, Pengqian Yang, Florian Kerber, Sebastian Rabien, Nabih Azouaoui, Frederic Gonte, Josef Eder, Vartan Arslanyan, Willem-Jan de Wit, Frank Hausmann, Roderick Dembet, Luca Pasquini, Harald Weisz, Pierre Lena, Mark Casali, Bernard Lazareff, Zoltan Hubert, Jean-Baptiste Le Bouquin

MPE

l'Observatoire de Paris — LESIA
Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg — Max Planck Institute for Astronomy Heidelberg

I. Physikalisches Institut — ph1 — Universität zu Köln

IPAG — Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

SIM

ESO

ONERA — THE FRENCH AEROSPACE LAB

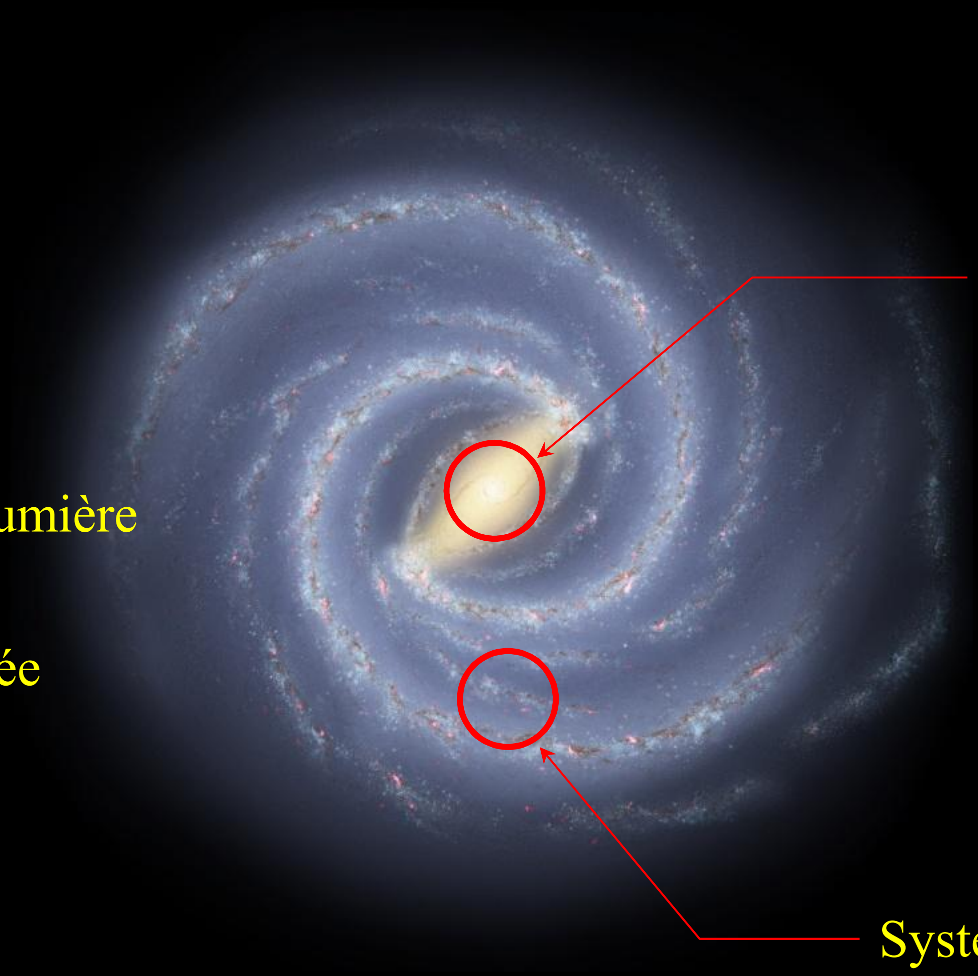
Le consortium GRAVITY

Frank Eisenhauer, Guy Perrin, Wolfgang Brandner, Christian Straubmeier , Karine Perraut , Antonio Amorim , Markus Schöller, Reinhard Genzel, Pierre Kervella , Myriam Benisty, Sebastian Fischer , Laurent Jocou, Paulo Garcia, Gerd Jakob, Stefan Gillessen, Yann Clénet , Armin Boehm, Constanza Araujo-Hauck, Jean-Philippe Berger, Jorge Lima, Roberto Abuter, Oliver Pfuhl, Thibaut Paumard, Casey P. Deen, Michael Wiest , Thibaut Moulin, Jaime Villate, Gerardo Avila, Marcus Haug, Sylvestre Lacour , Thomas Henning, Senol Yazici , Axelle Nolot , Pedro Carvas, Reinhold Dorn, Stefan Kellner, Eric Gendron, Stefan Hippler, Andreas Eckart , Sonia Anton, Yves Jung, Alexander Gräter, Élodie Choquet , Armin Huber, Narsireddy Anugu , Philippe Gitton, Eckhard Sturm, Frédéric Vincent , Sarah Kendrew, Stefan Ströbele, Clemens Kister, Pierre Fédou, Ralf Klein, Paul Jolley, Magdalena Lippa, Vincent Lapeyrère, Natalia Kudryavtseva, Christian Lucuix, Ekkehard Wieprecht, Frédéric Chapron, Werner Laun, Leander Mehrgan, Thomas Ott, Gérard Rousset , Rainer Lenzen, Marcos Suarez, Reiner Hofmann, Jean-Michel Reess, Vianak Naranjo, Pierre Haguenauer, Oliver Hans, Arnaud Sevin , Udo Neumann, Jean-Louis Lizon, Markus Thiel, Claude Collin , Jose Ricardo Ramos, Gert Finger, David Moch, Daniel Rouan, Ralf-Rainer Rohloff, Markus Wittkowski, Richard Davies, Denis Ziegler , Karl Wagner, Henri Bonnet, Katie Dodds-Eden, Frédéric Cassaing, Pengqian Yang, Florian Kerber, Sebastian Rabien, Nabih Azouaoui, Frederic Gonte, Josef Eder, Vartan Arslanyan, Willem-Jan de Wit, Frank Hausmann, Roderick Dembet, Luca Pasquini, Harald Weisz, Pierre Lena, Mark Casali, Bernard Lazareff, Zoltan Hubert, Jean-Baptiste Le Bouquin

La Voie Lactée, Sgr A* et le système solaire

diàmètre : 25 kpc
ou 80 000 années-lumière

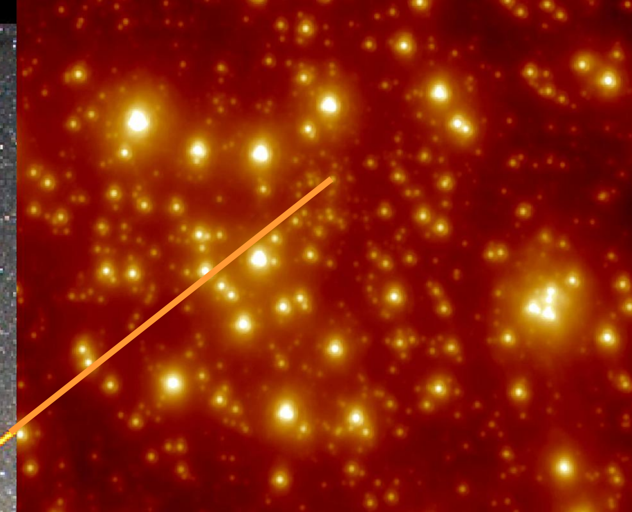
galaxie spirale barrée



Le centre de la Galaxie

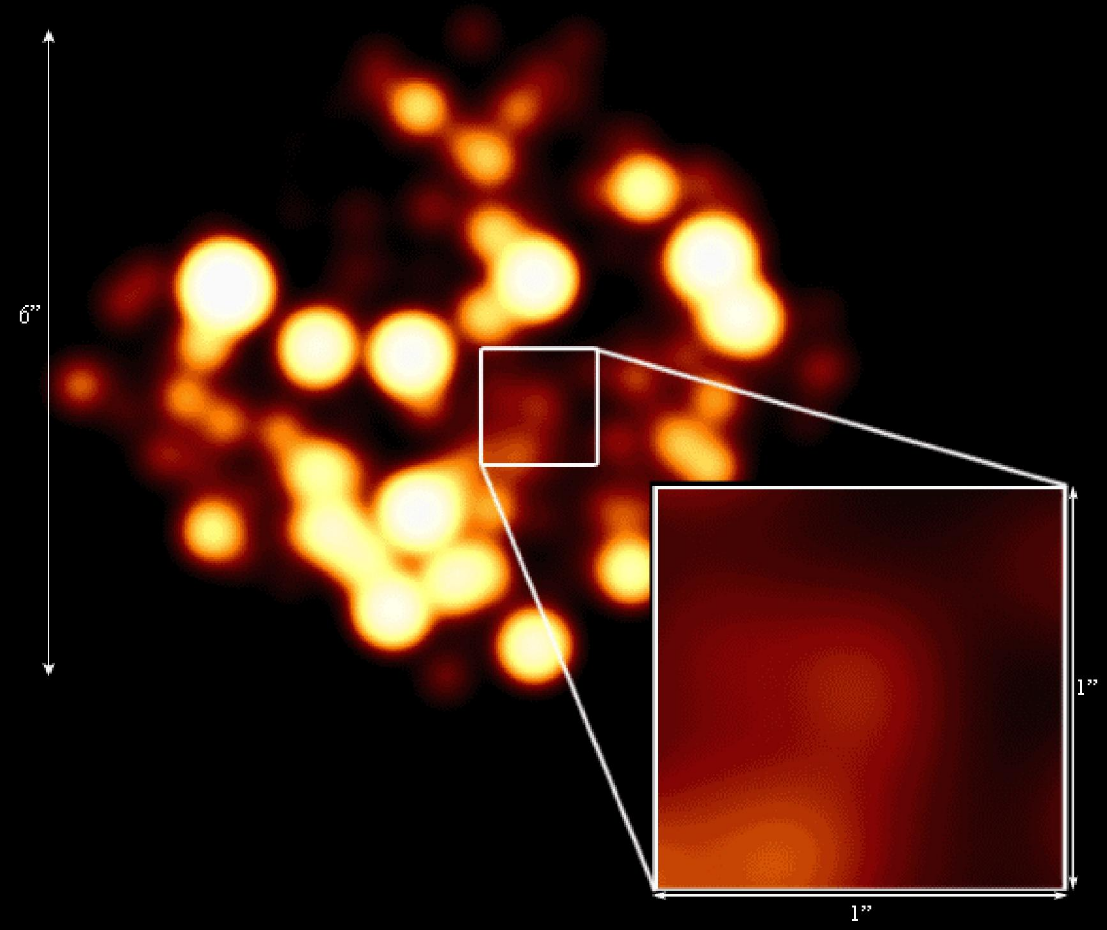
Opaque à cause de la poussière.

Observations avec les UT dans l'infrarouge en bande K pour voir Sgr A* et les étoiles



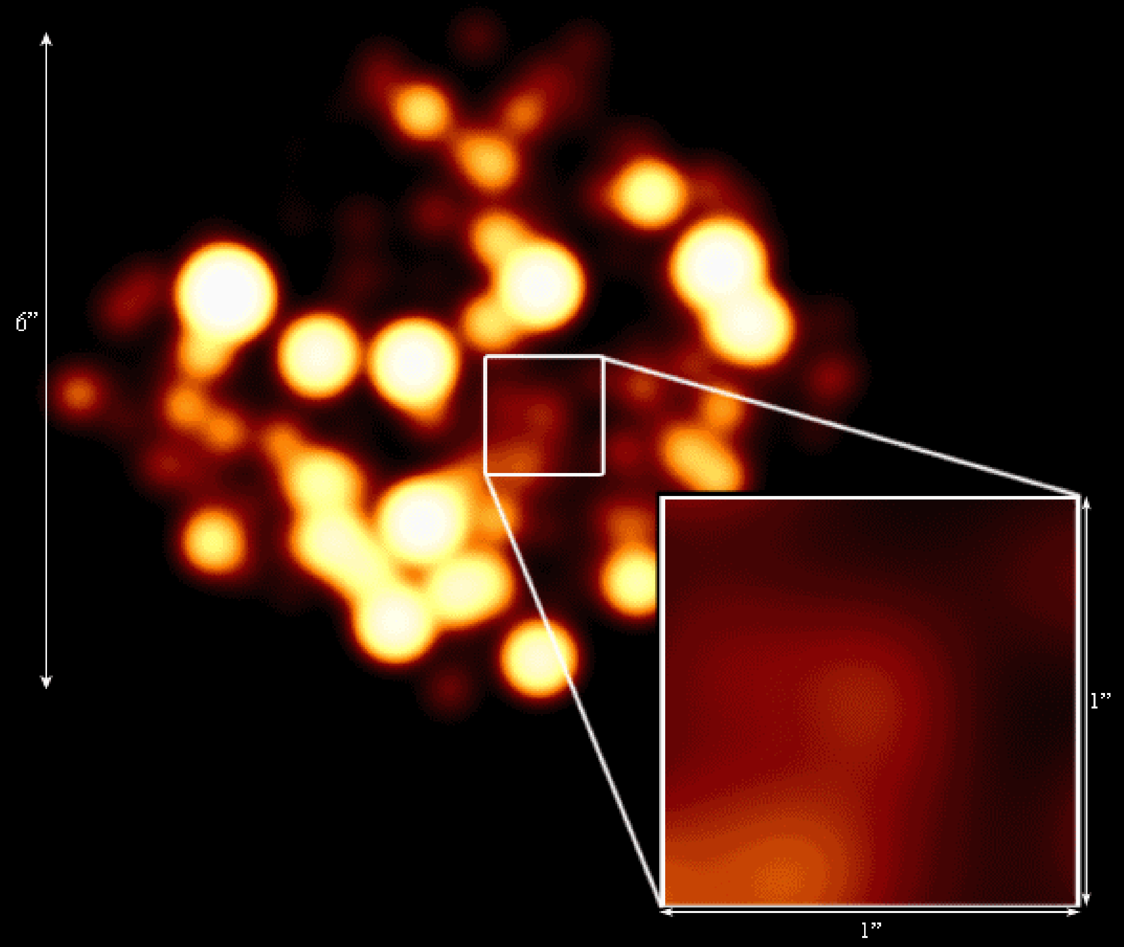
Observations dans l'infrarouge proche

0,05 pc

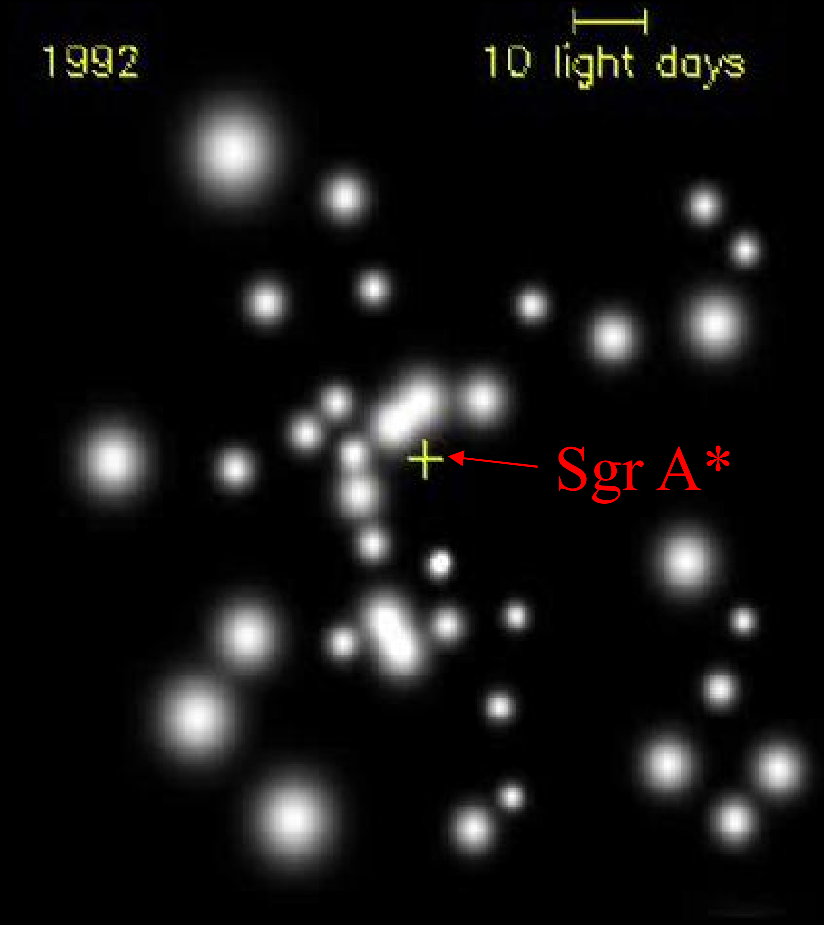


Besoin d'une optique adaptative infrarouge pour voir lever la confusion au Centre Galactique

0.05 pc

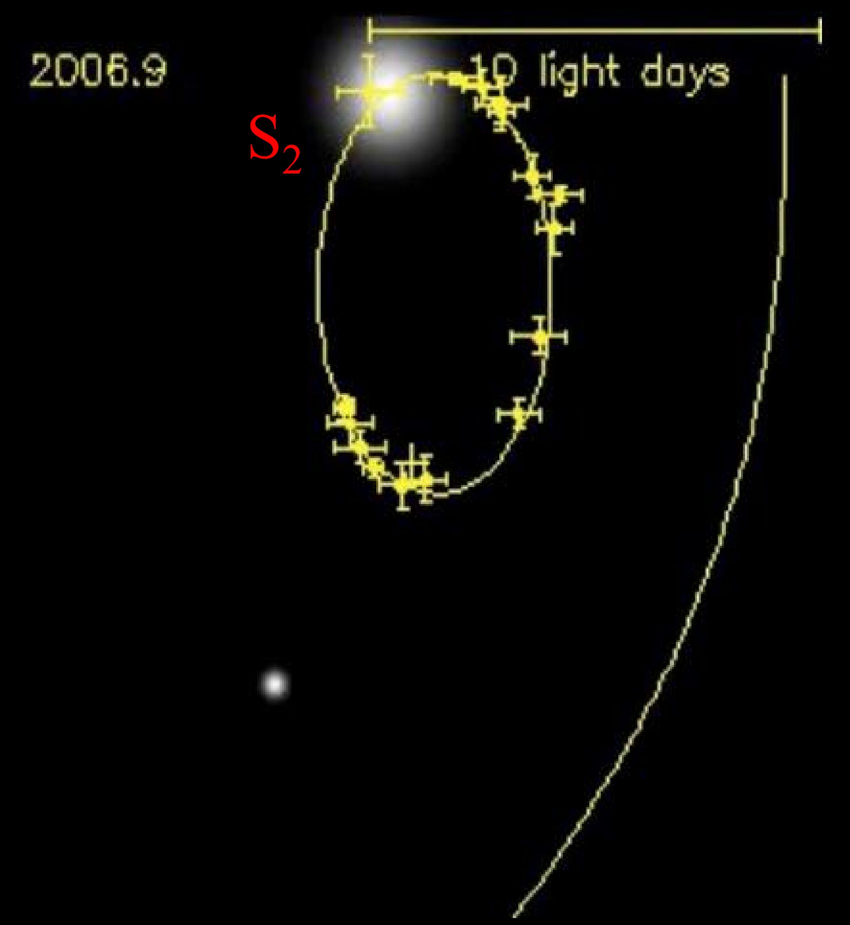


Orbite de l'étoile S_2 observée par l'optique adaptative du VLT NAOS



Schödel et al. (2002)

Orbite de l'étoile S_2 observée par l'optique adaptative du VLT NACO



Schödel et al. (2002)

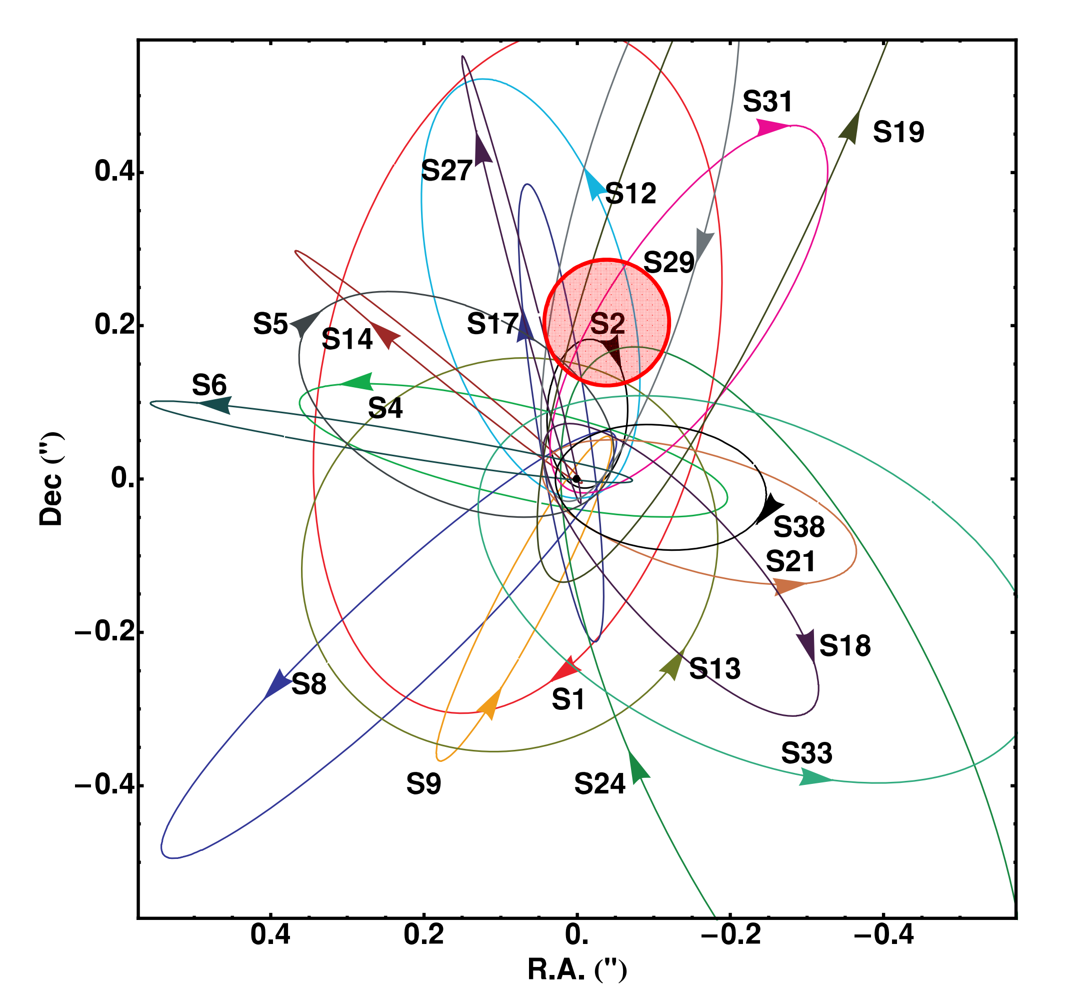
Calcul précis de la masse de Sgr A*

Application de la 3ème loi de Kepler :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM_{Sgr\,A^*}}{4\pi^2}$$

$M_{Sgr\,A^*} = 4{,}31 \pm 0{,}42 \cdot 10^6\ M_{Soleil}$

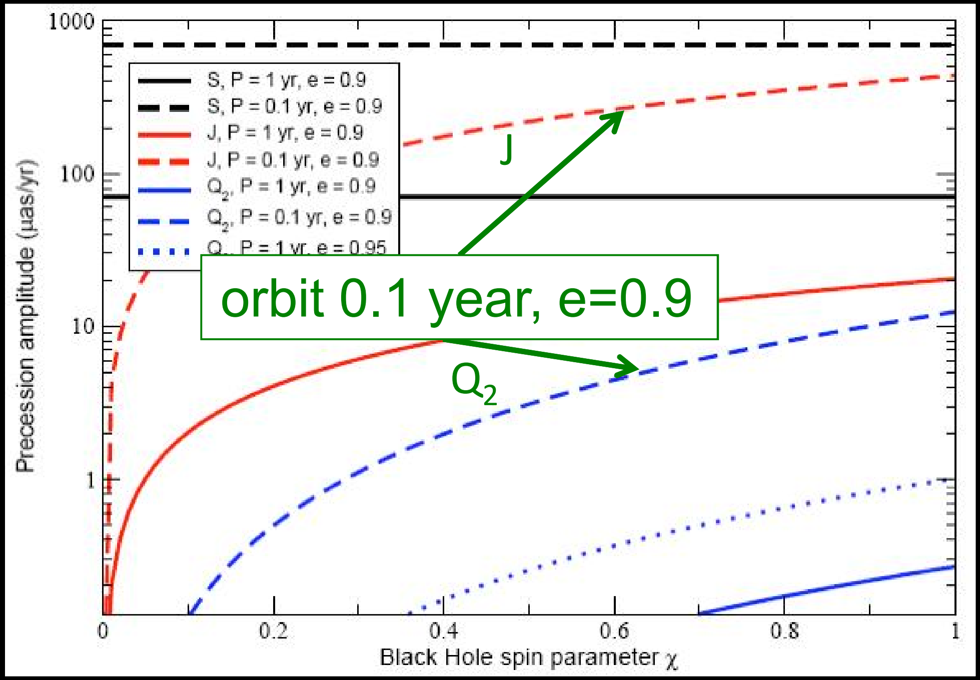
(d = 7,62 ± 0,32 kpc)

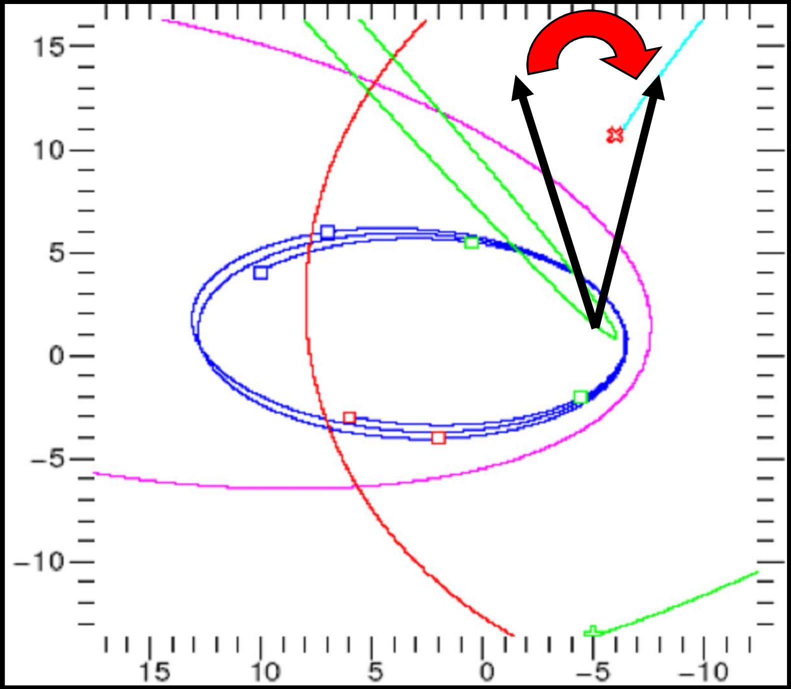


Gillessen et al. (2009)

Lense-Thirring effect and precession of the quadrupolar moment

Precession of the orbital plane (precession of the angular momentum vector around the BH spin vector)





No-hair theorem by Wheeler: a black hole is fully described by 3 parameters: mass M, spin J, electric charge

Quadrupolar moment: $Q_2 = -J^2 / M$

The measurement of precession due to frame dragging should be possible in a few years with orbits of size 0.2 - 1 mpc (5 - 25 mas)

Merritt et al. (2010)

Will (2008)

Orbites d'étoiles proches

Imagerie des 100 mas centrales en une nuit : besoin de 4 UT et de ~ 100 m de base

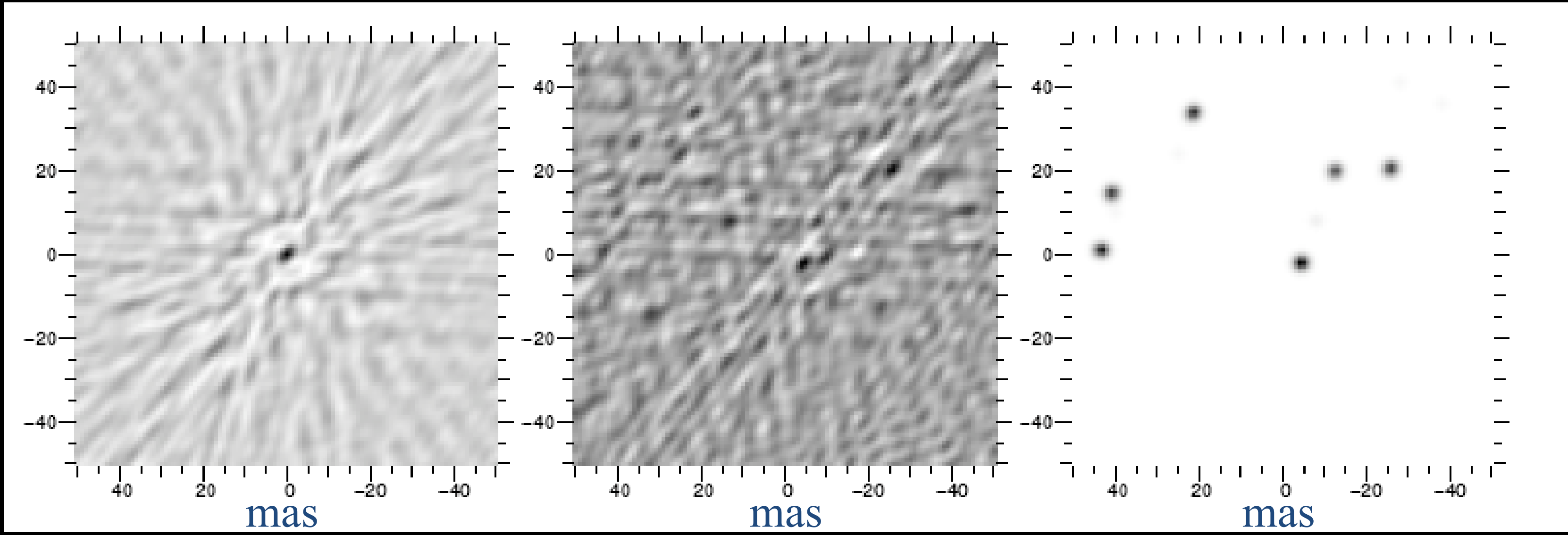


Image d'étoile de référence (dirty beam)

Image d'un champ de 6 étoiles (dirty image)

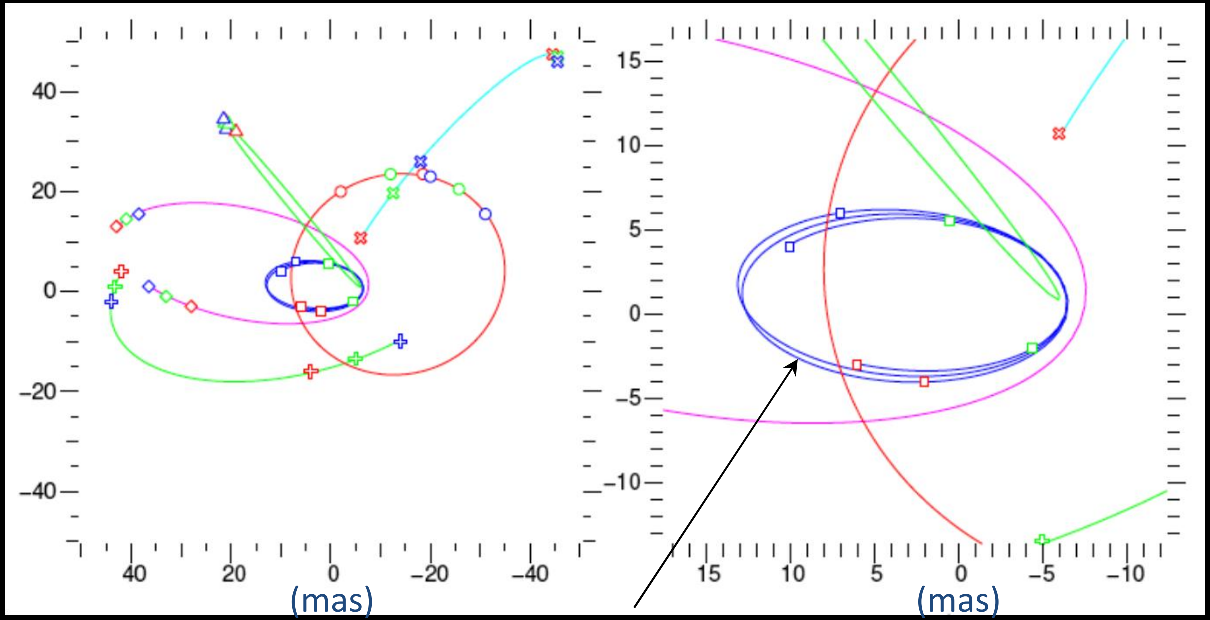
Après déconvolution

Paumard et al. (2005)

Orbites d'étoiles proches

Imagerie des 100 mas centrales en une nuit : besoin de 4 UT et de ~ 100 m de base

Après 15 mois d'observation

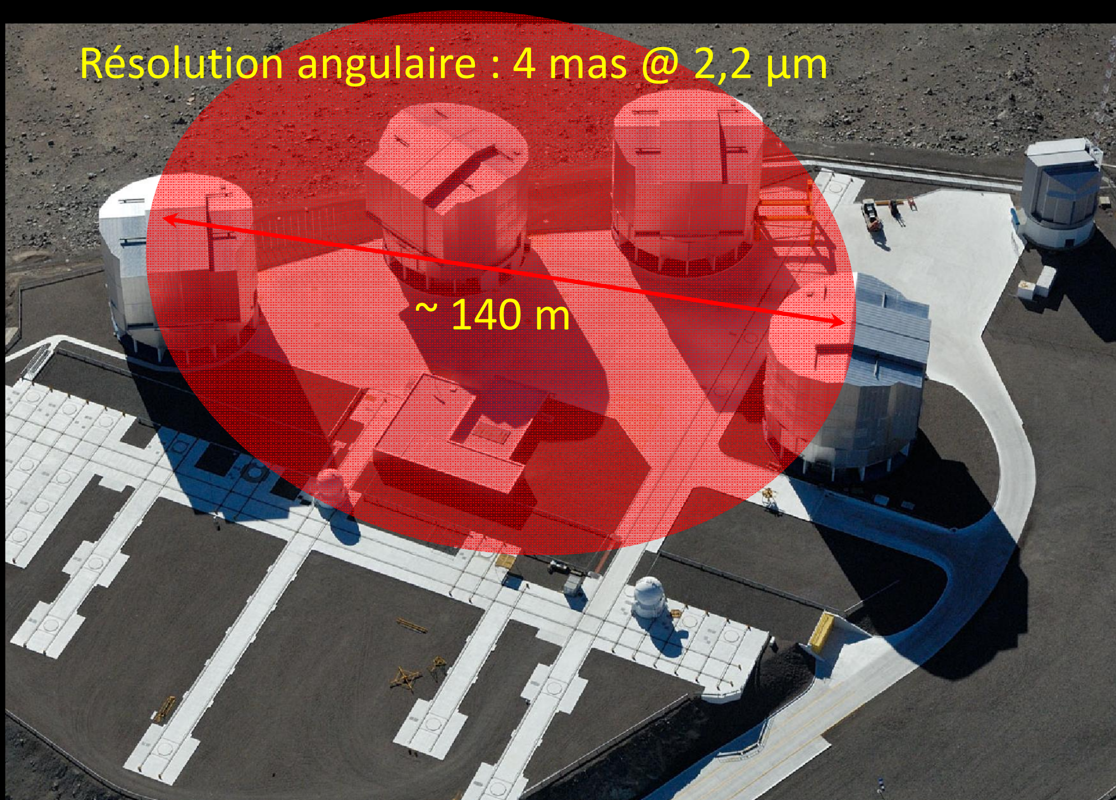


Système des étoiles S ramené à 100 mas

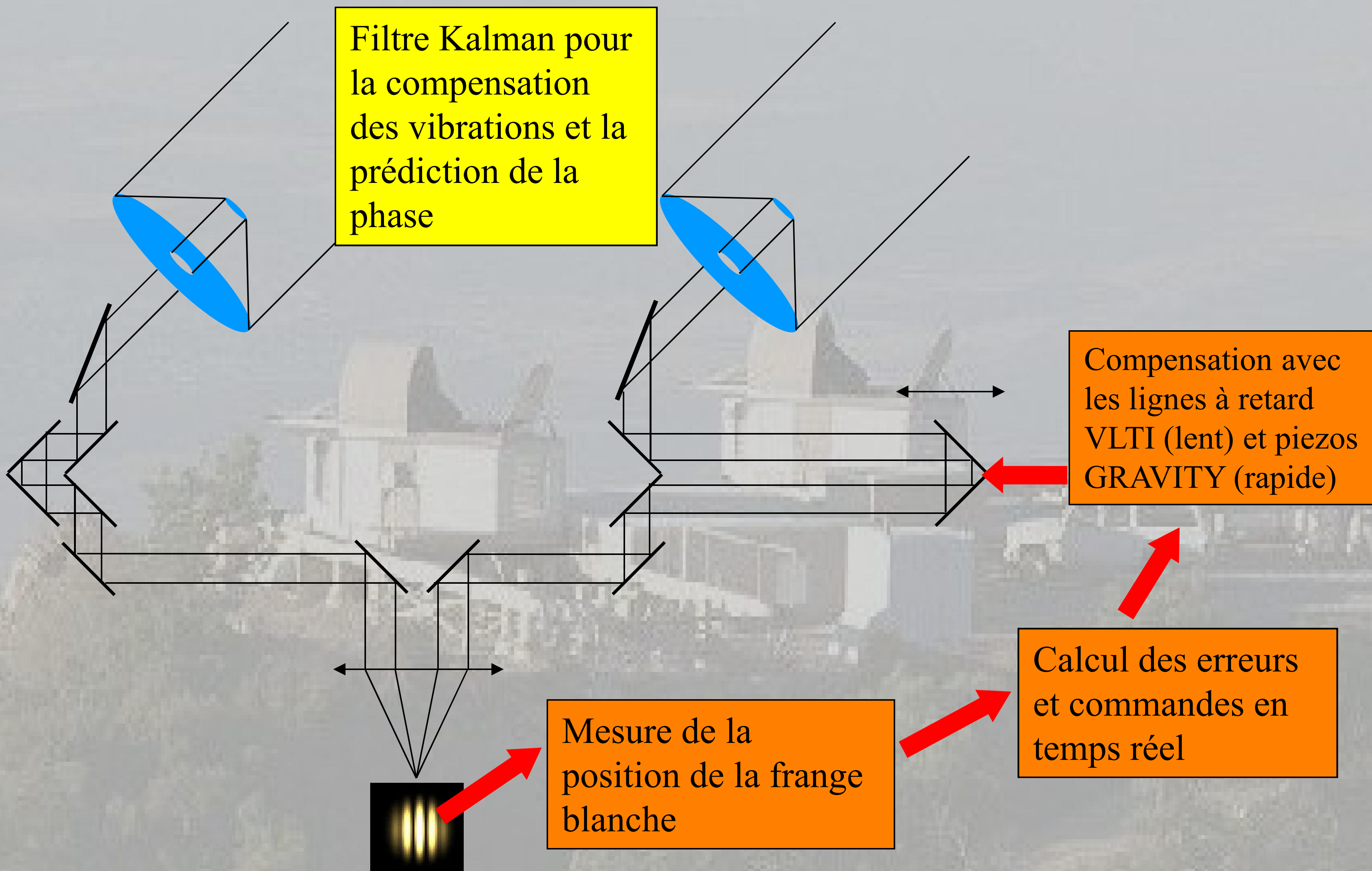
Précession relativiste dans la métrique de Schwarzschild
Mesure du spin dans la métrique de Kerr
Mesure du moment quadrupolaire ?

Paumard et al. (2005)

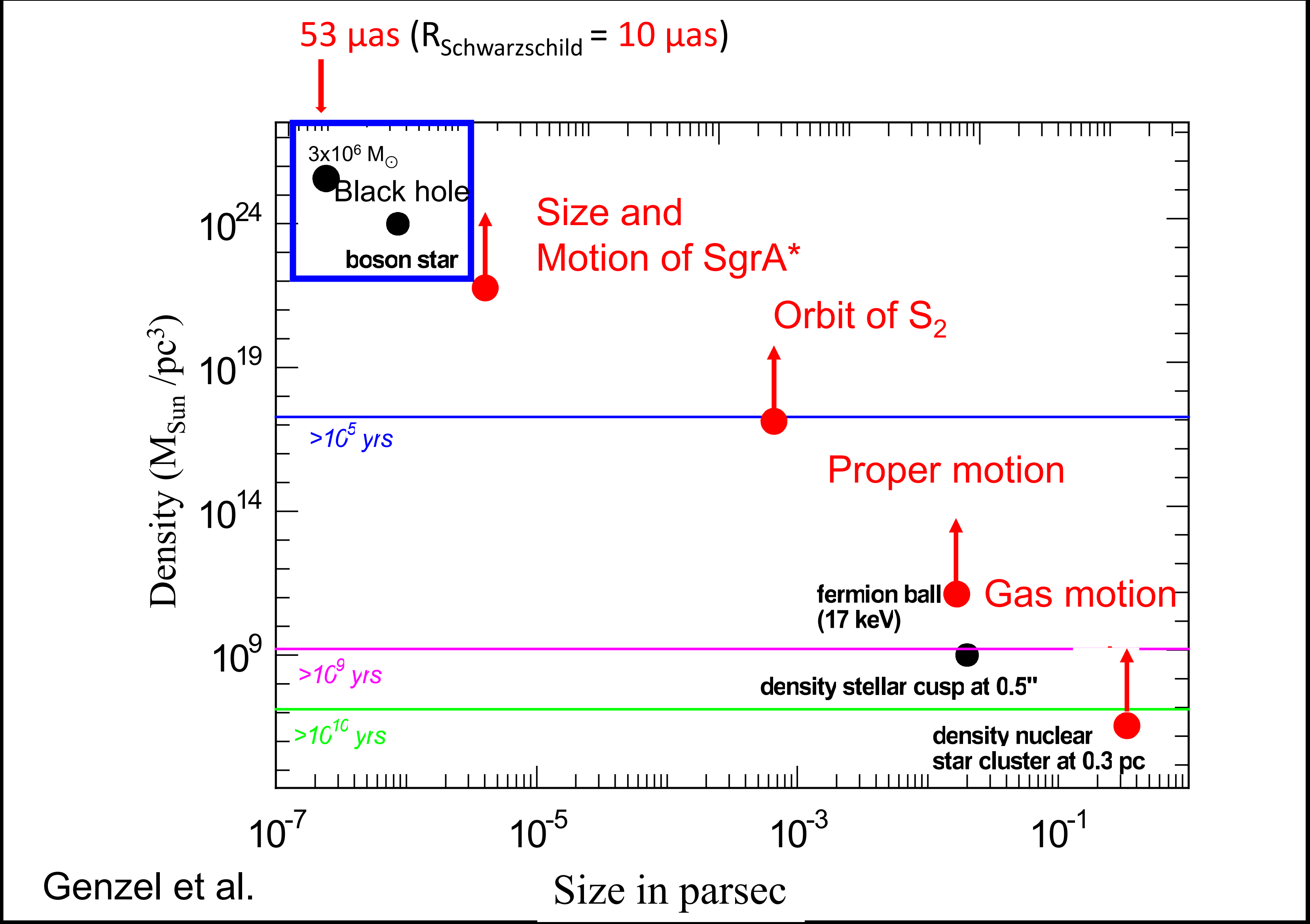
GRAVITY combine les 4 UT (8,20 m) ainsi que les 4 AT (1,80 m) du VLTI



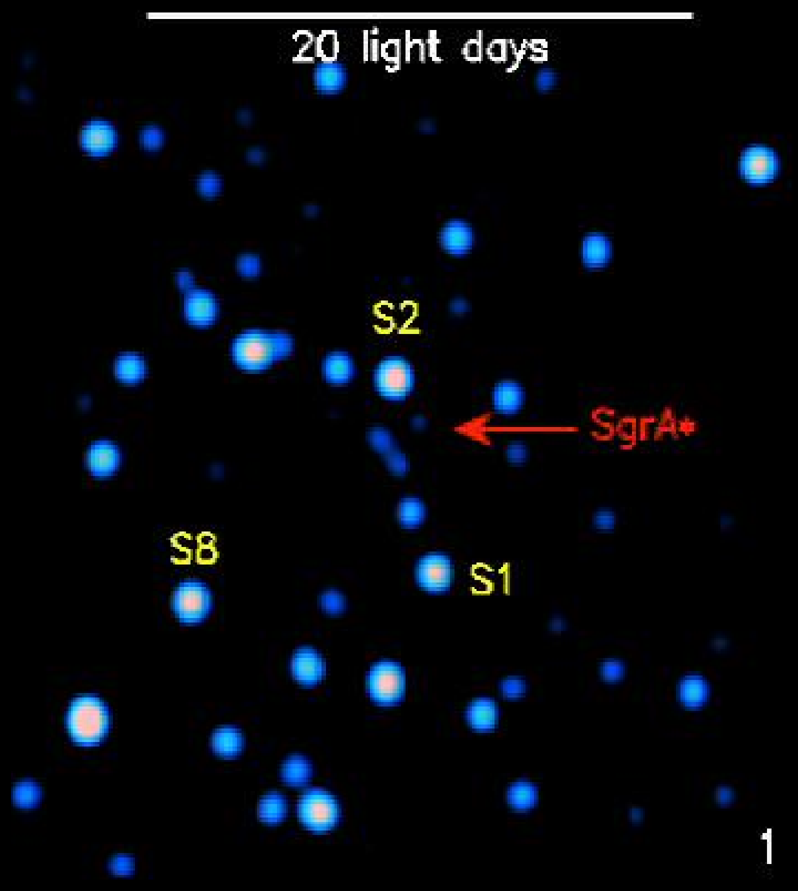
Besoin d’un suiveur de franges pour stabiliser la ddm (≤ 300 nm), intégrer (≥ 100 s) et R=4000



Nature de Sgr A* ?



Les sursauts au Centre Galactique

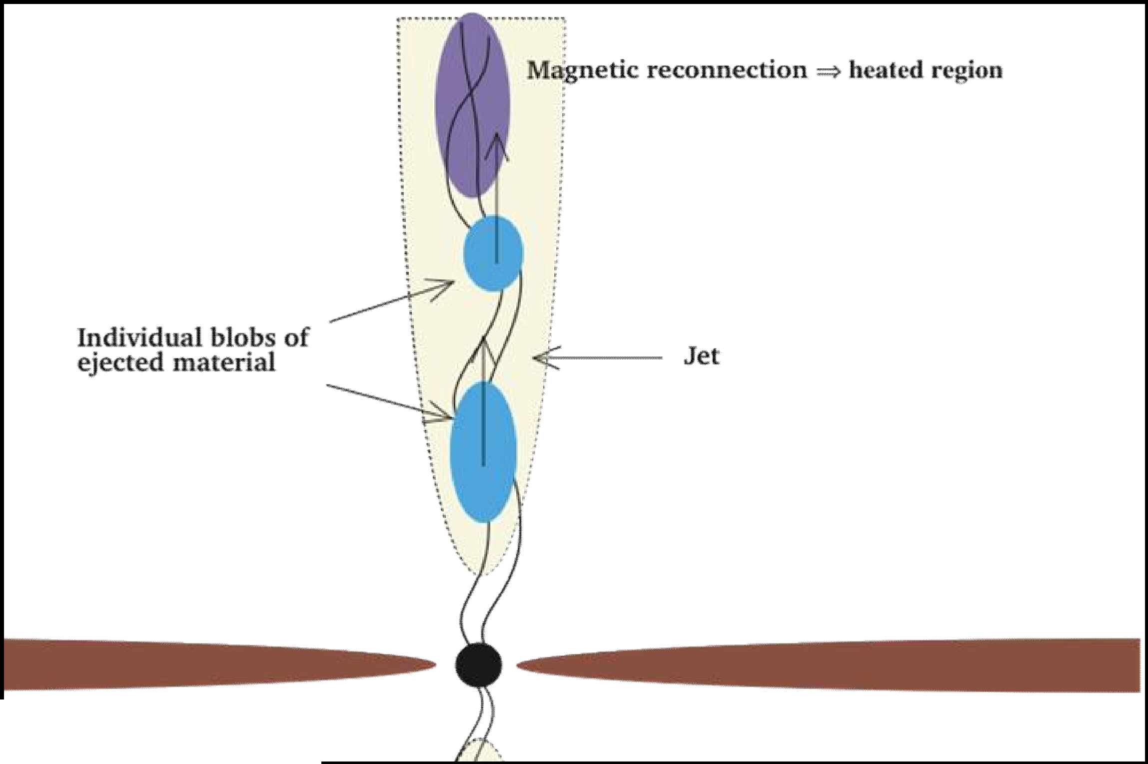


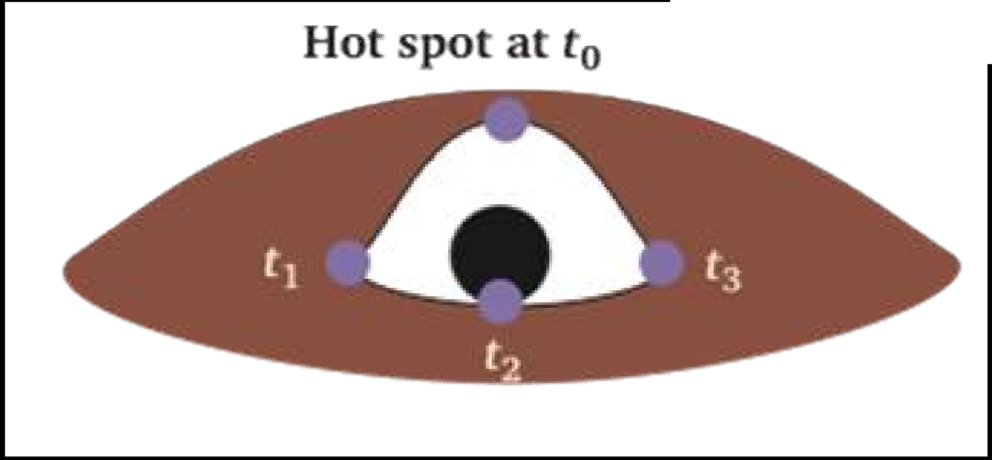
Genzel et al. (2003)

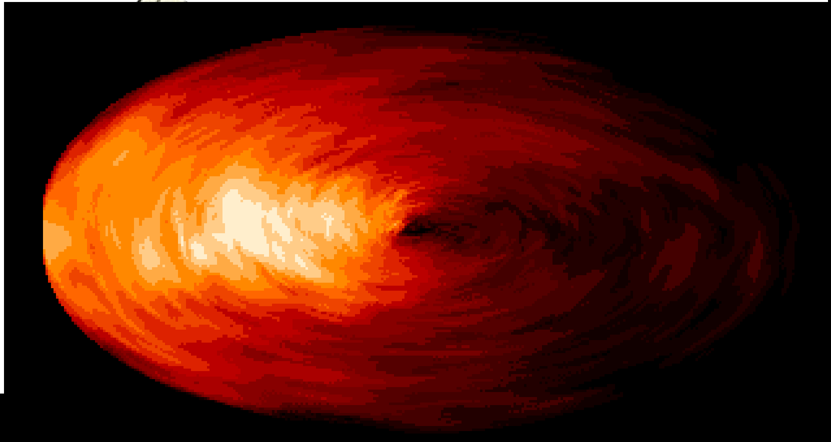
Les sursauts au Centre Galactique

Trois scenarios :
- reconnexion magnétique dans les jets
- points chauds sur la dernière orbite circulaire stable
- fluctuations statistiques

Échelle caractéristique : quelques 10 µas

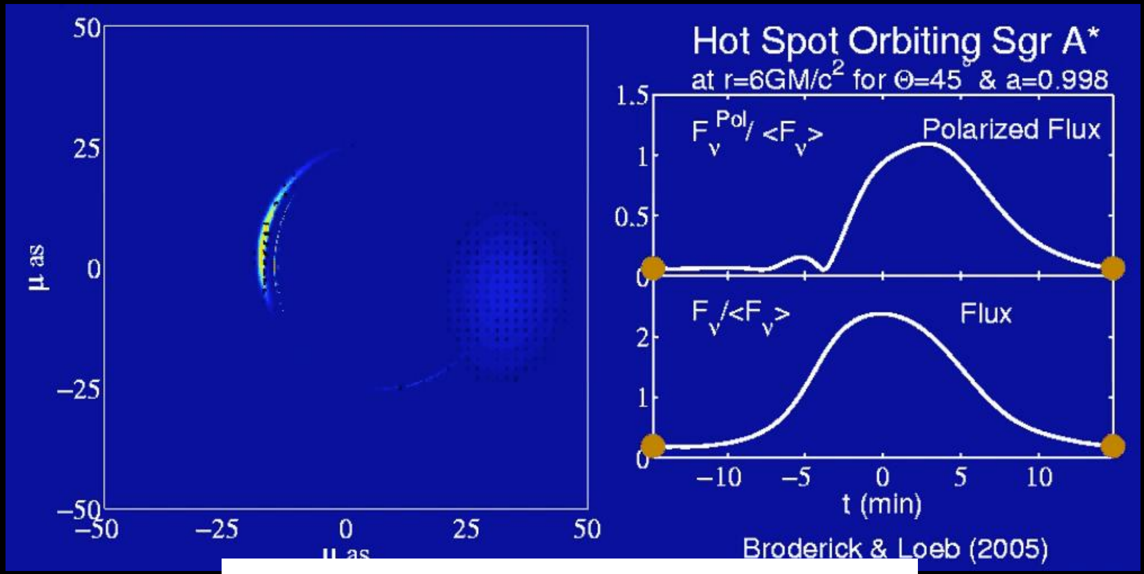


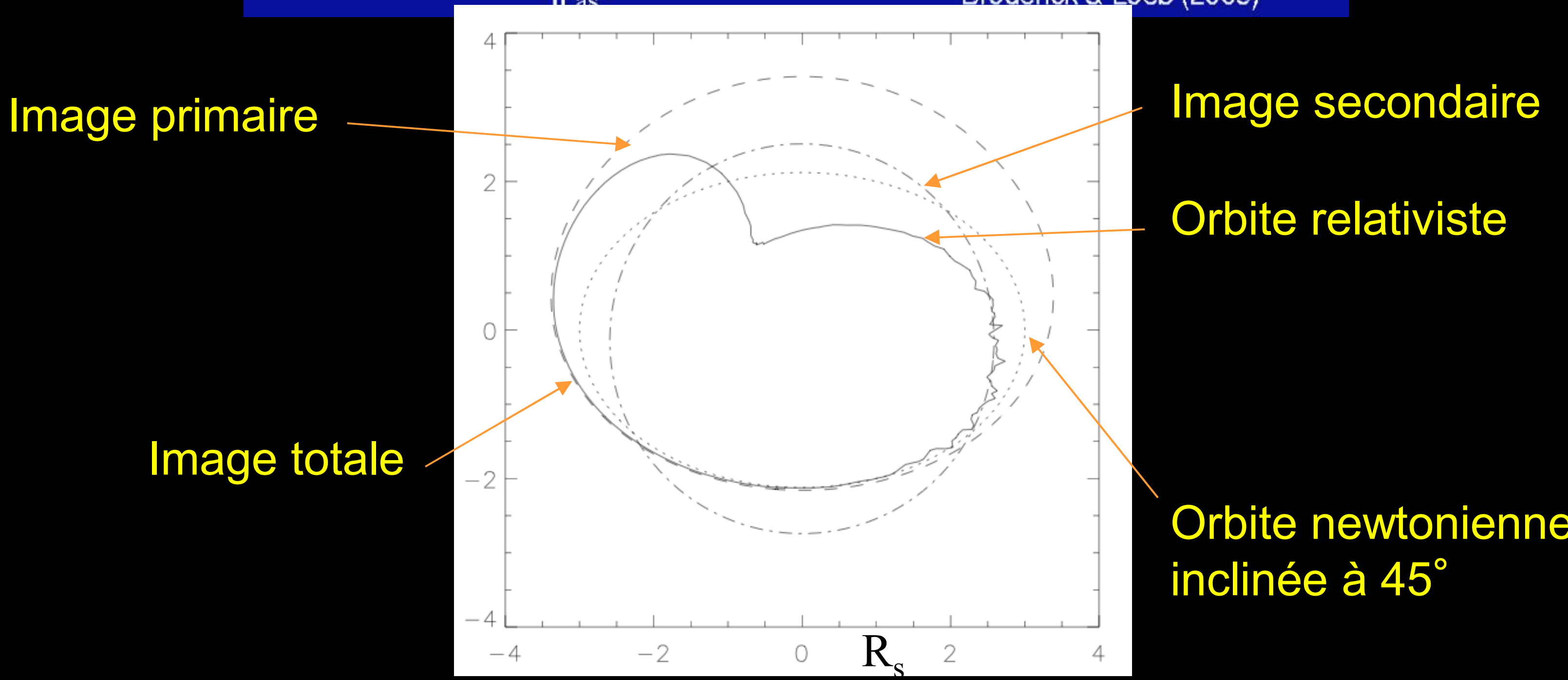




Exploration de la dernière orbite circulaire stable

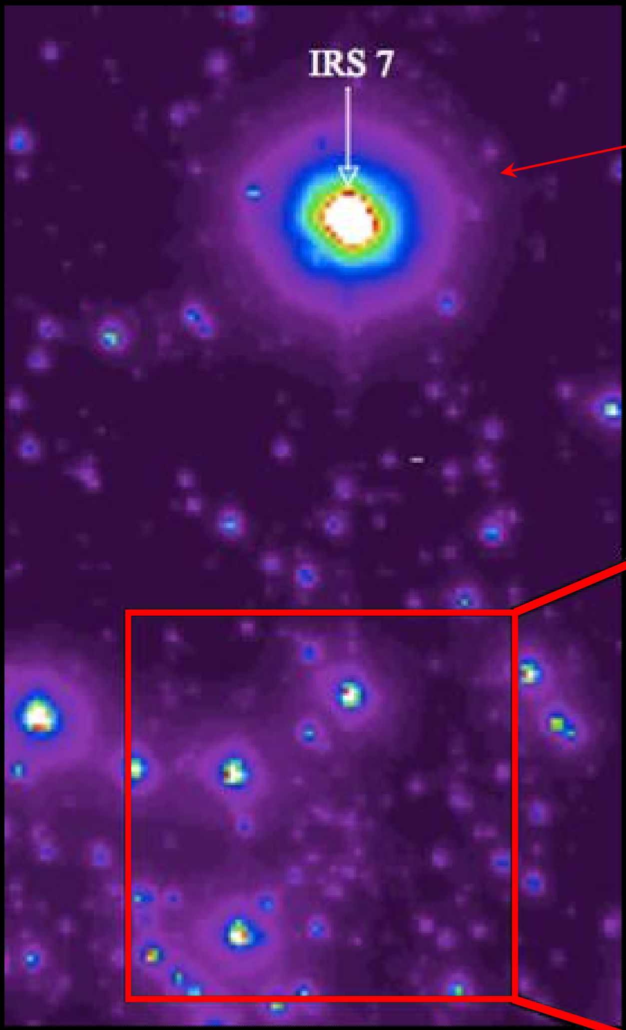
$10\ \mu as = 1\ R_s$



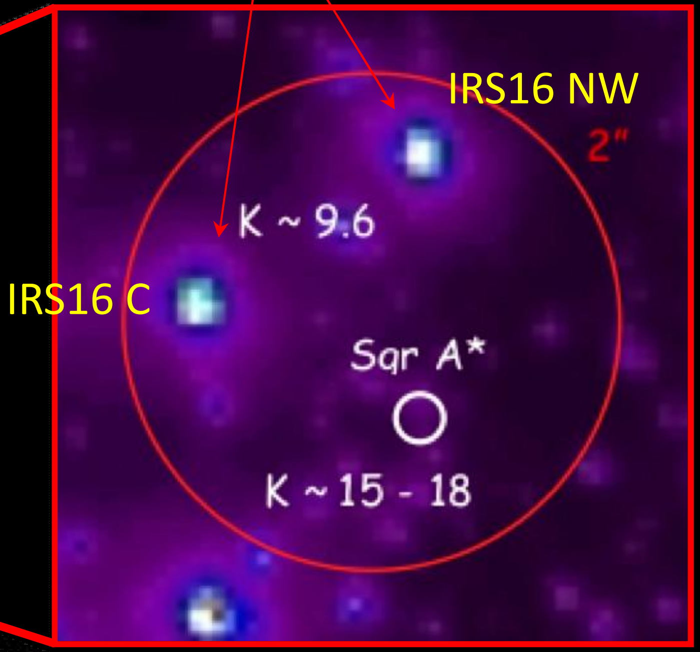


Principe de la mesure GRAVITY

Source de référence pour
l'optique adaptative infrarouge



Sources de référence pour
l'imagerie et l'astrométrie
interférométriques



Astrométrie interférométrique

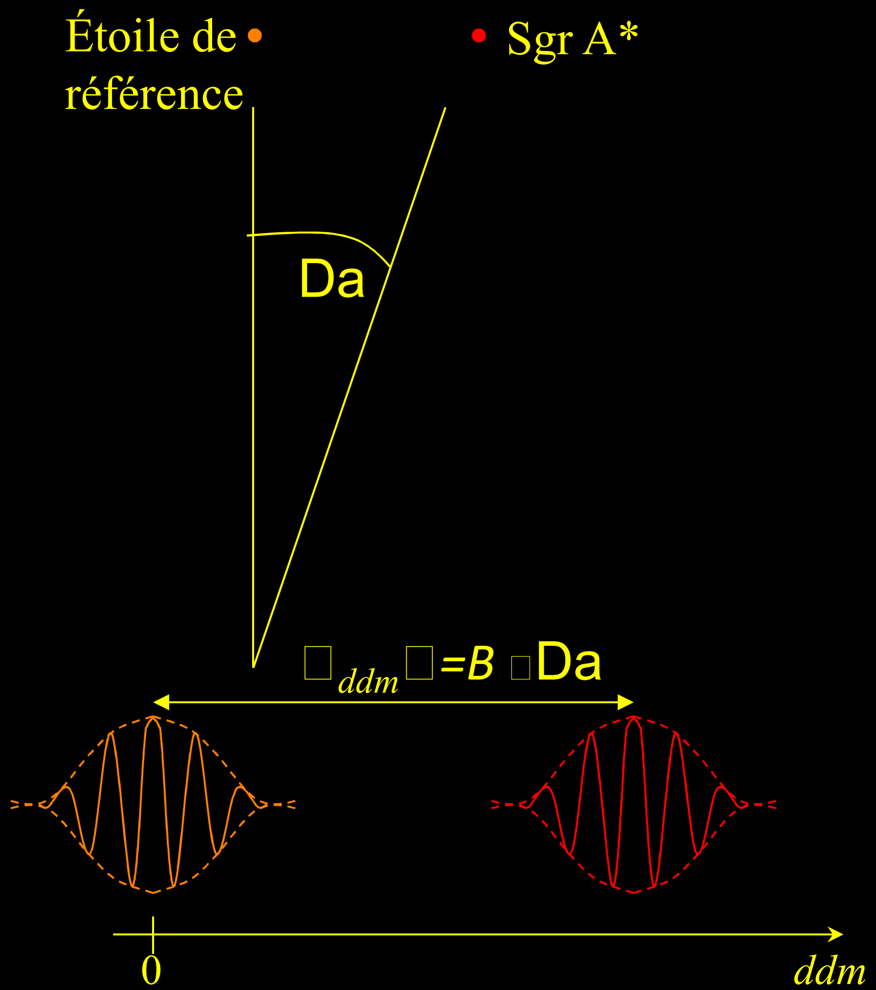
La distance entre les interférogrammes vaut :

D_{ddm} = B □Da

D'où :

Da = D_{ddm} / B

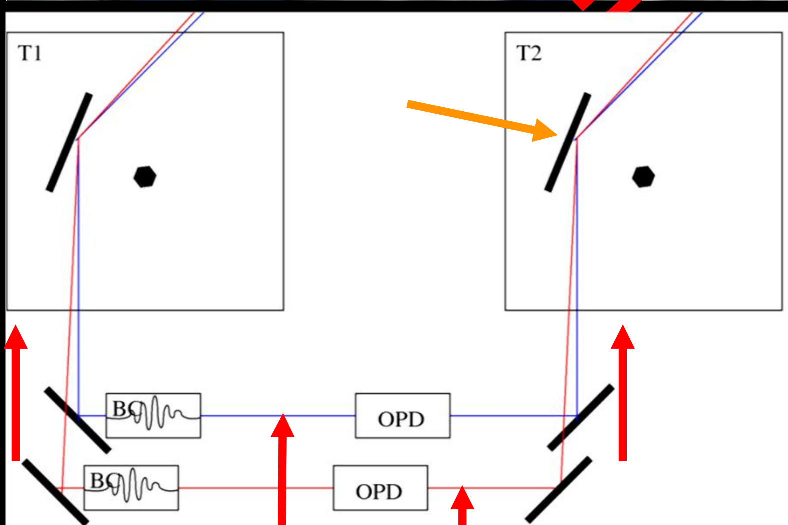
Avec une précision de 5 nm sur D_{ddm} pour une base de 100 m, la précision sur Da est de 10 µas.



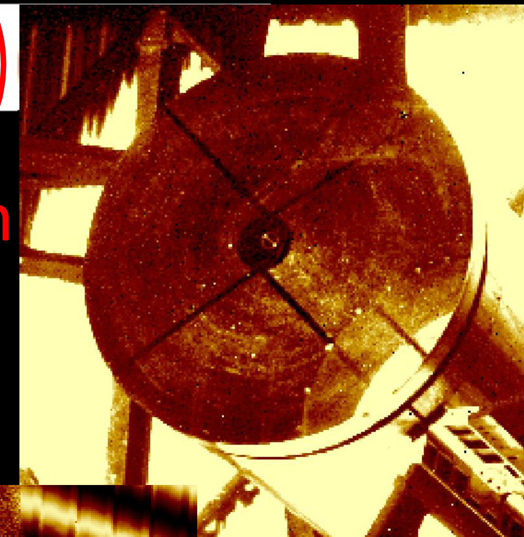
Métrologie

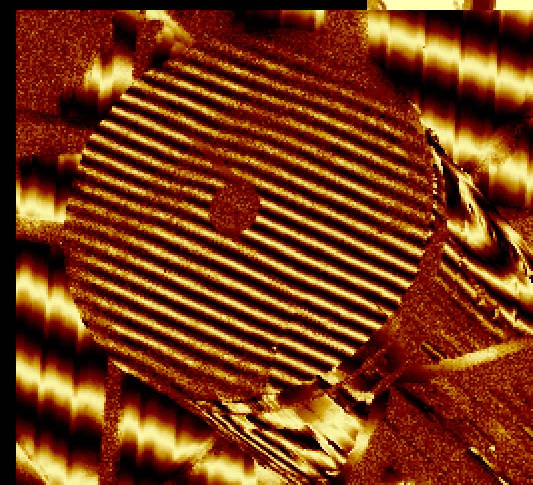
5 nm ← $\delta OPD = \vec{B}.\vec{\alpha} - \vec{B}.\vec{\beta} = \vec{B}.$

500 µm



Métrologie laser 1908 nm





Un rétro-interféromètre produit des franges d'interférence dans le plan du M2.

Rabien+ 08, Bartko+ 10, Gillessen+ 12, Kok+ 14, Lippa+ 14

Les chiffres-clés de GRAVITY

Étapes :
- lancement du projet : 2006
- Final Design Review : fin 2011 – début 2012
- Installation sur le VLTI en juil.-sept. 2015
- 1$^{\text{ère}}$ lumière AT : octobre 2015
- 1$^{\text{ère}}$ lumière UT : mai 2016

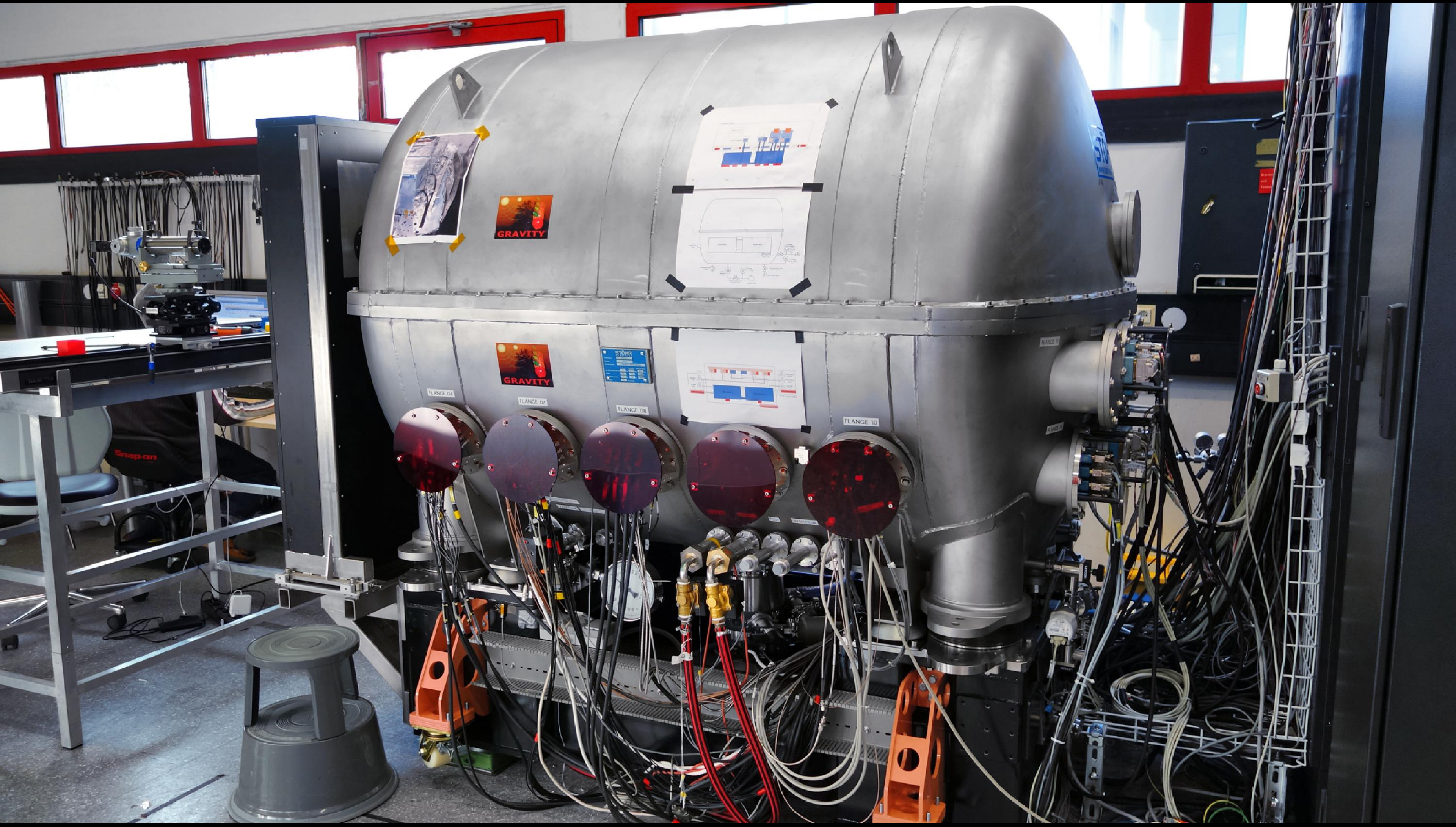
Résolutions spectrales :
- suiveur de franges : R=22
- voie scientitifique : R=22, 500, 4000

Suivi de franges :
- UT (8 m) : K~10 (≥ 11)
- AT (1,8 m) : K~7 (8)

Astrométrie :
- (≥) 10 µas en 5 minutes (40 µas)

Imagerie interférométrique :
- UT : K~16, AT : K~13 en 100s
- SNR(V) = 10
- ♦(♐) = 0,1 rad en mode référence de phase

Cryostat GRAVITY à MPE (Garching 2013-2015)



GRAVITY : instrument distribué sur le VLTI

Recombinateur

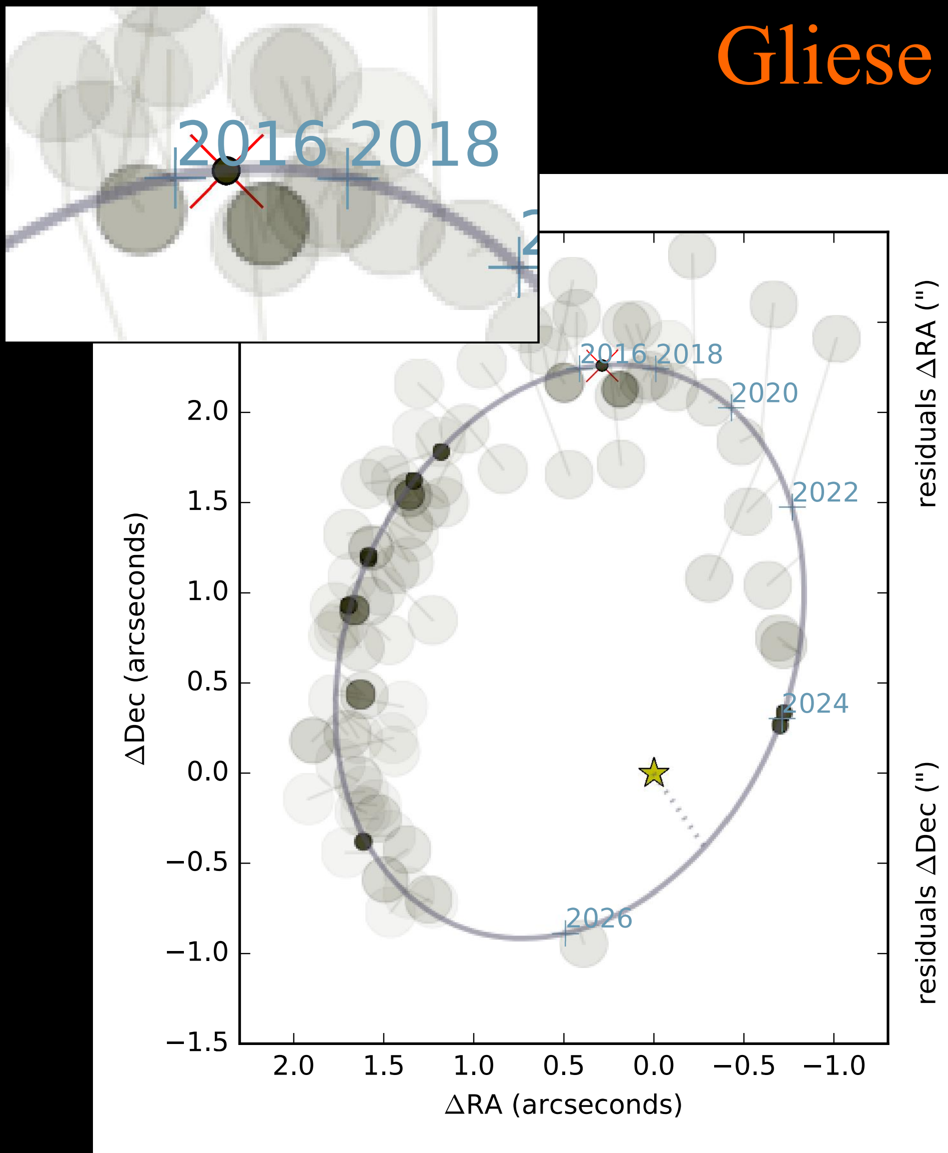
Au recombinateur viennent s'ajouter :

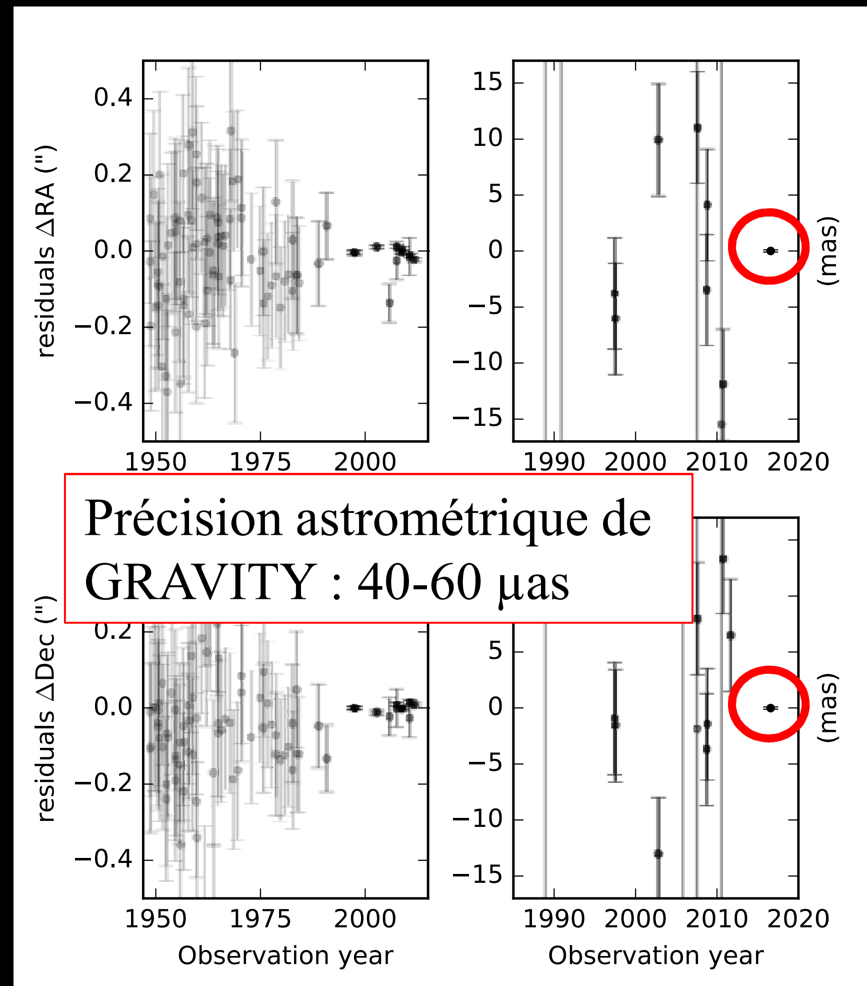
- les 4 optiques adaptatives infrarouges (UT)
- les capteurs métrologiques sur les télescopes (UT et AT) pour l'astrométrie très haute précision

Eisenhauer+ 05,11

Exemples de mesure montrant les capacités nouvelles de GRAVITY

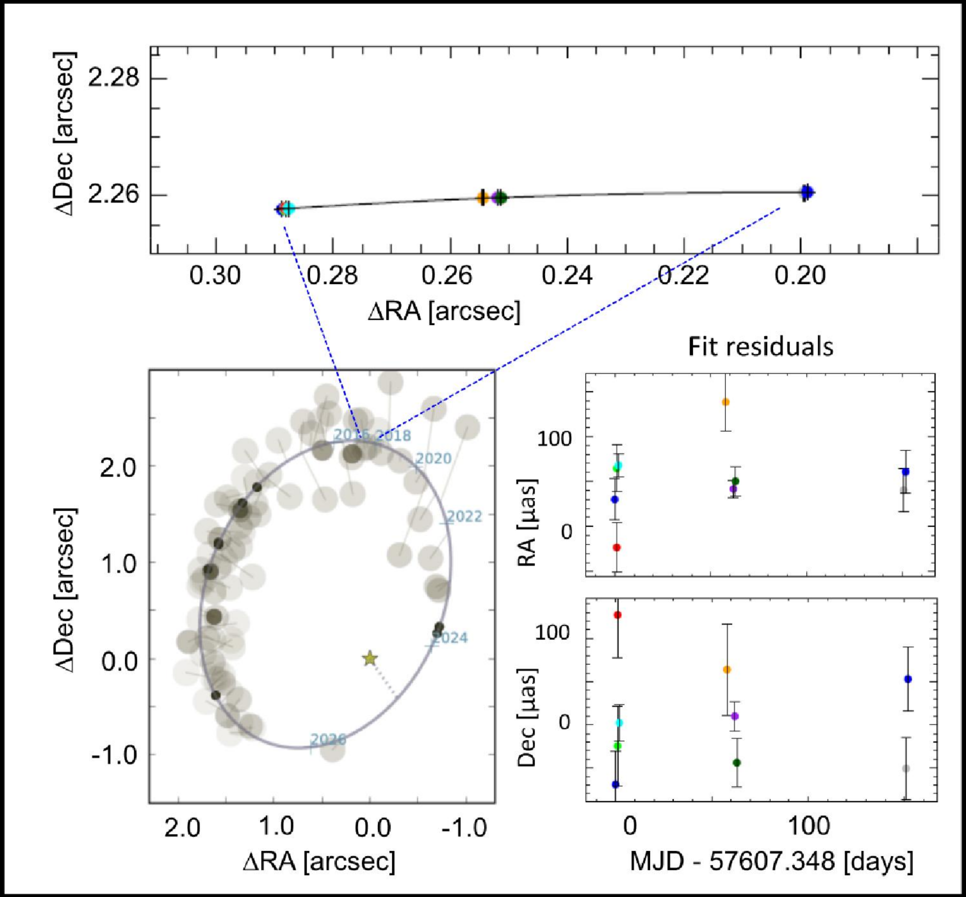
Gliese 65AB





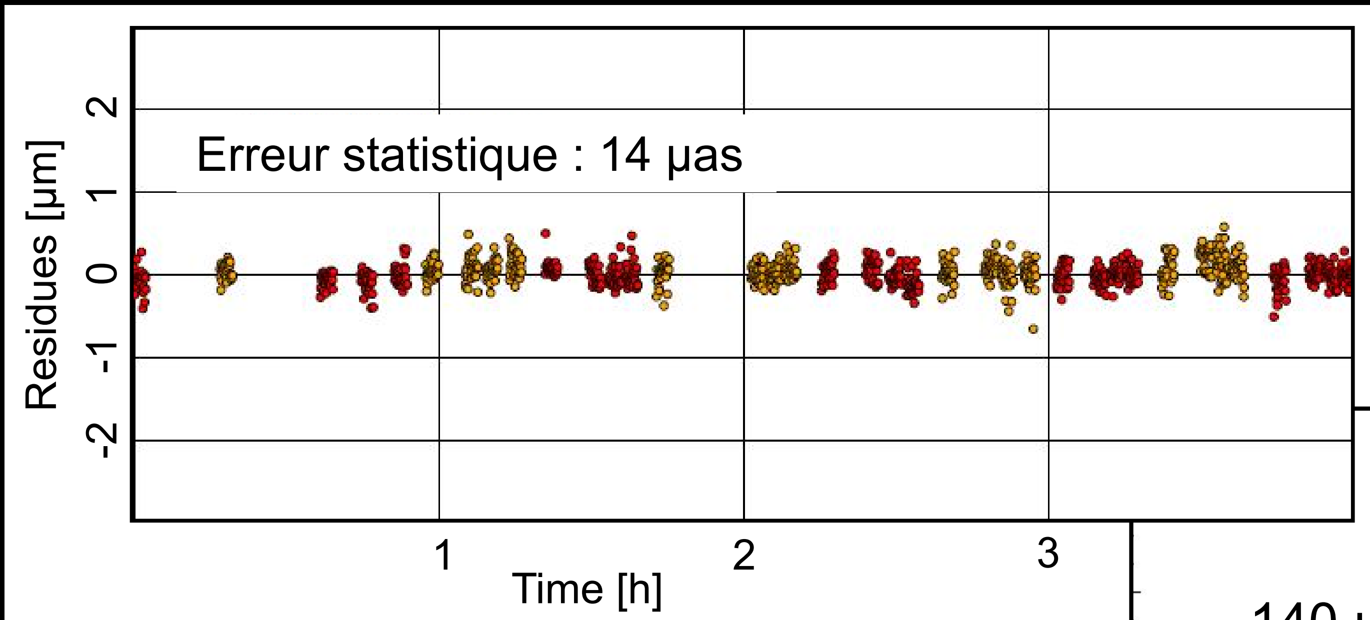
Précision astrométrique de GRAVITY : 40-60 μas

Gliese 65AB

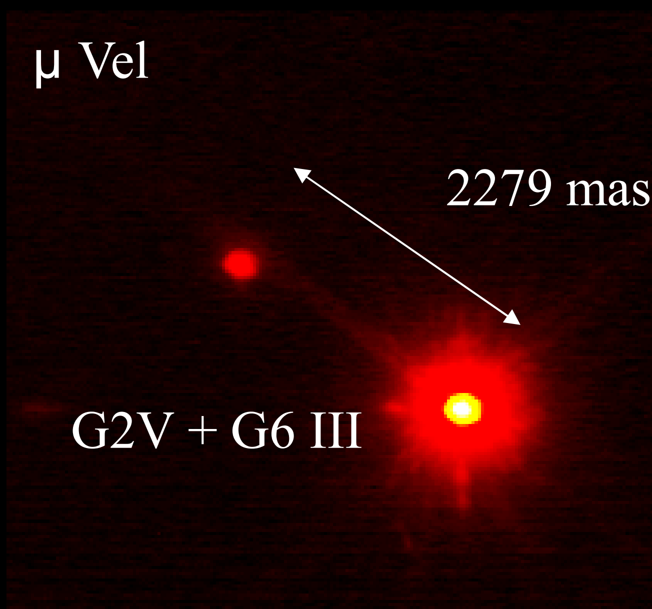


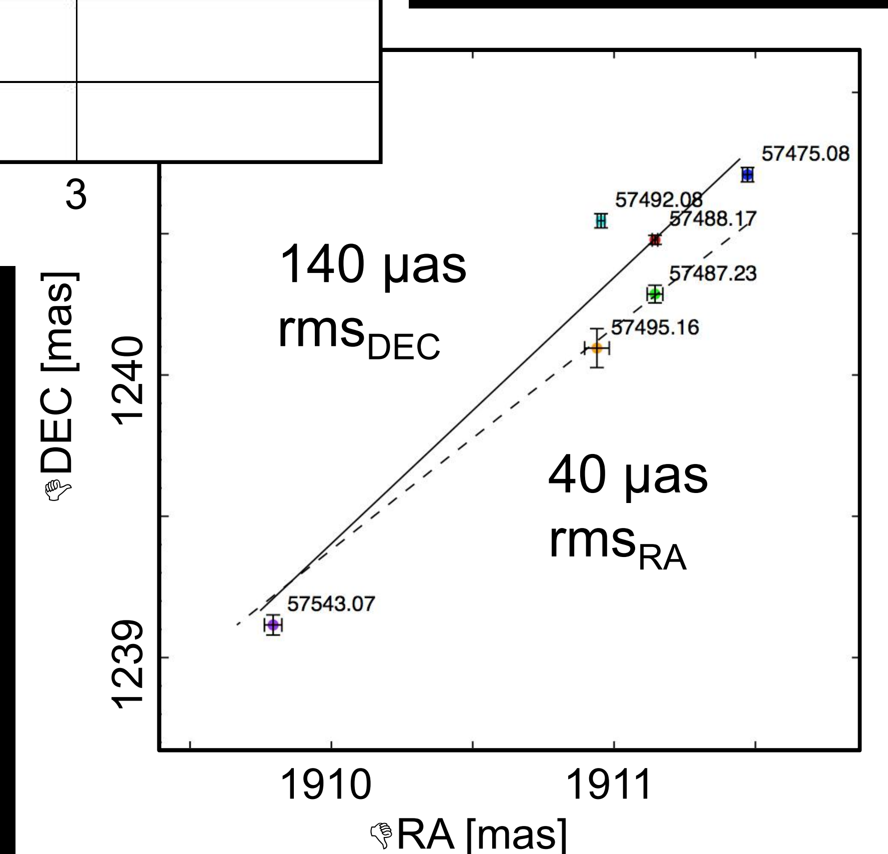
GRAVITY collaboration Abuter et al., A&A 602, A94 (2017)

Étalonnage pour l’astrométrie haute précision



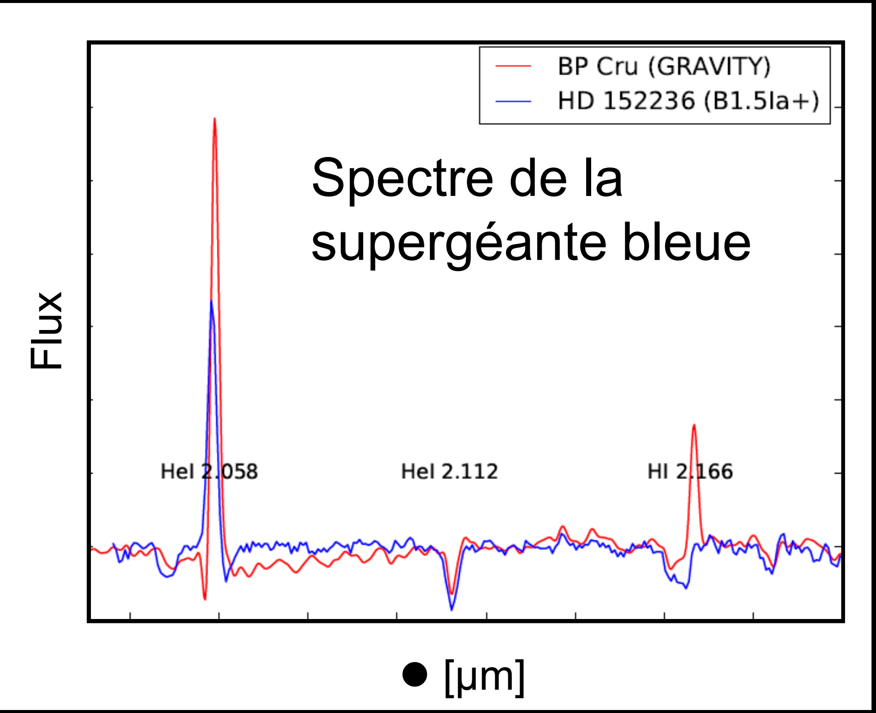
Séquence de permutations

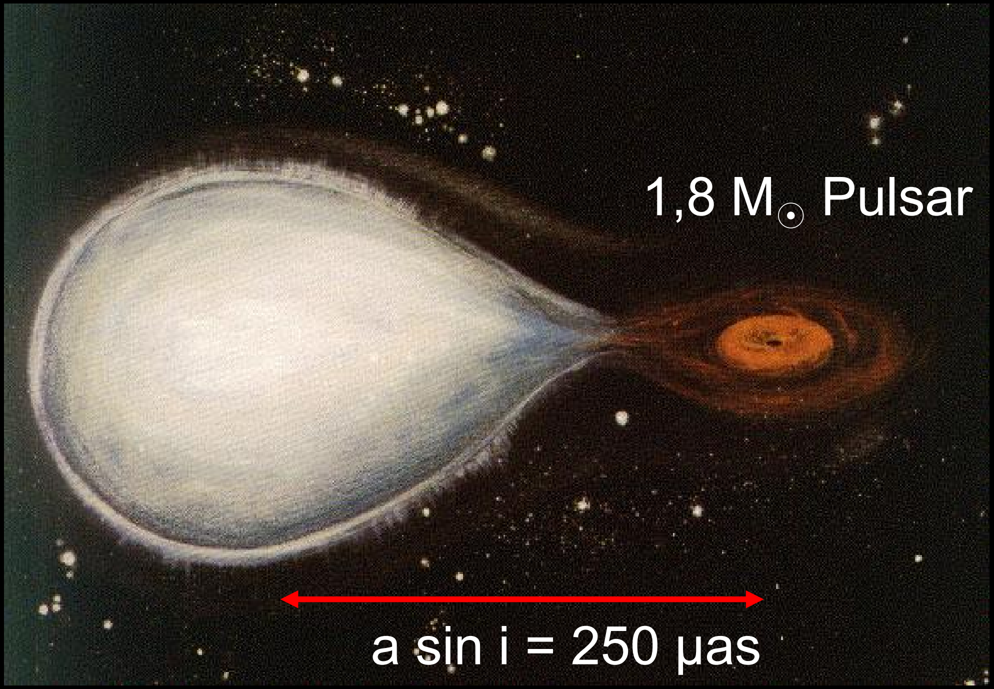




Preliminary analysis by Pfuhl, Kervella, Woillez +

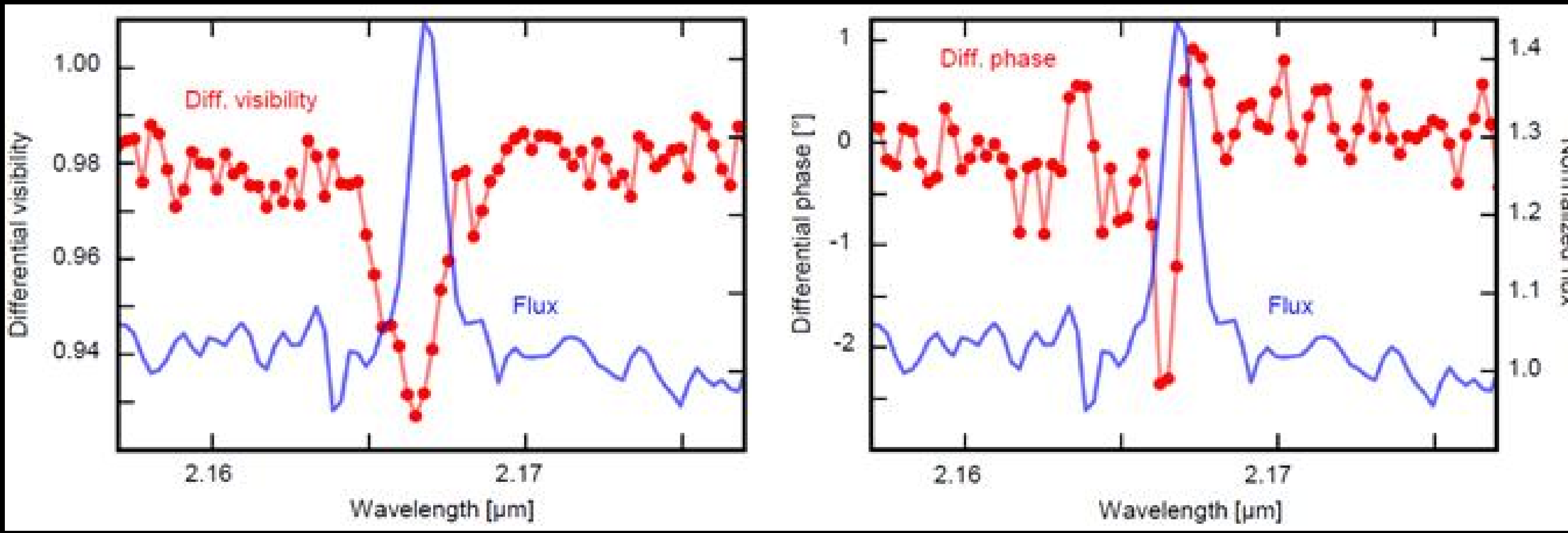
Binaire X : BP Cru





GRAVITY Collaboration – Waisberg et al., ApJ 844, 72 (2078)

Binaire X : BP Cru

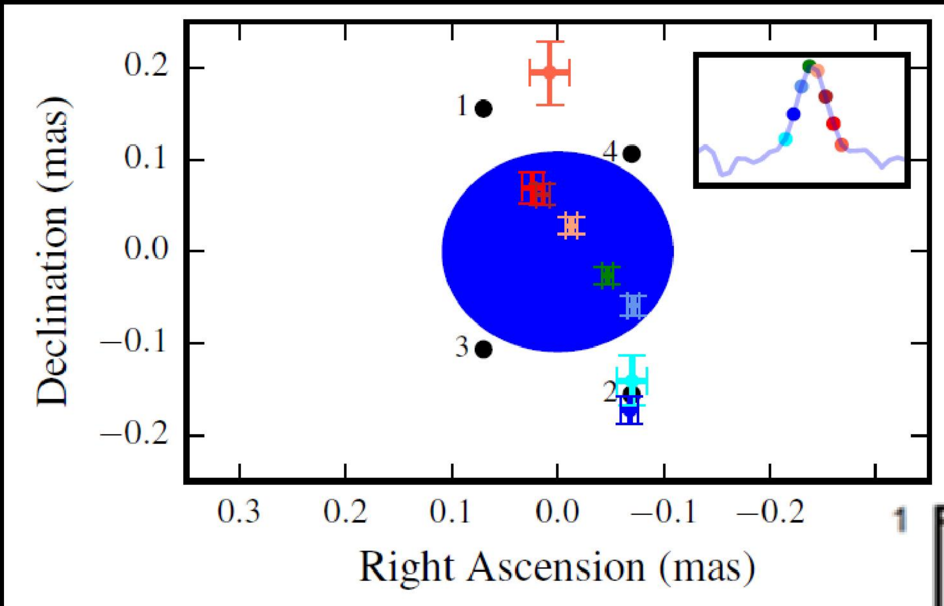


Les amplitudes relatives de visibilité révèlent un vent étendu et asymétrique.

Les phases différentielles révèlent un gradient de position dans Br γ.

GRAVITY Collaboration – Waisberg et al., ApJ 844, 72 (2078)

Binaire X : BP Cru

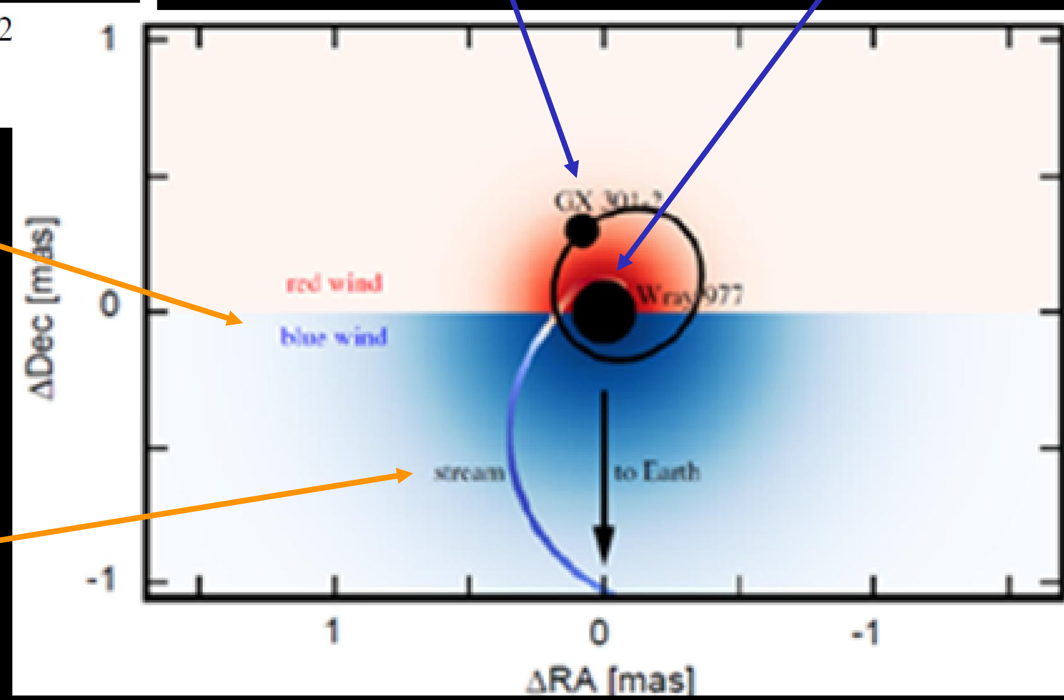


Pulsar

Donneur

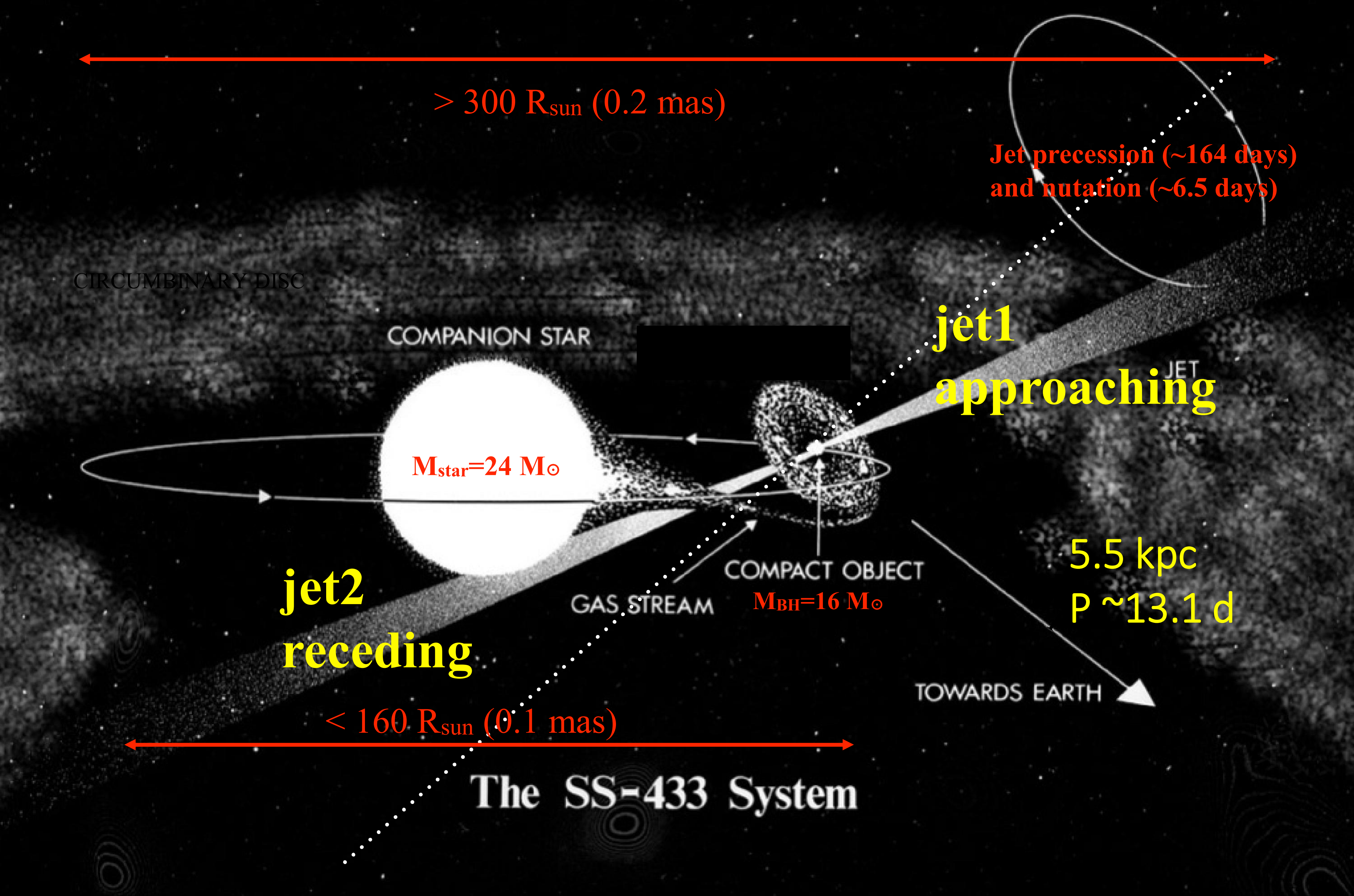
Vent asymétrique étendu

Flot de gaz

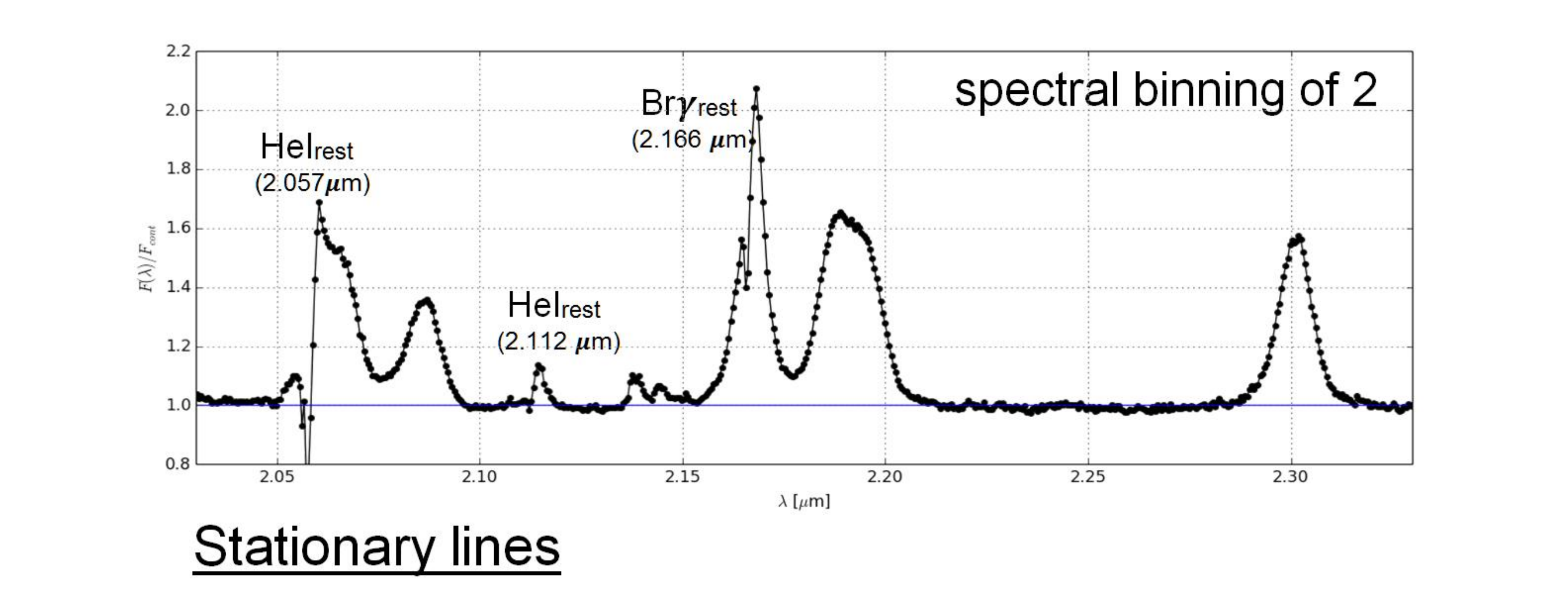


GRAVITY Collaboration – Waisberg et al., ApJ 844, 72 (2078)

Morphologie de l’accrétion-éjection du μ-quasar SS433



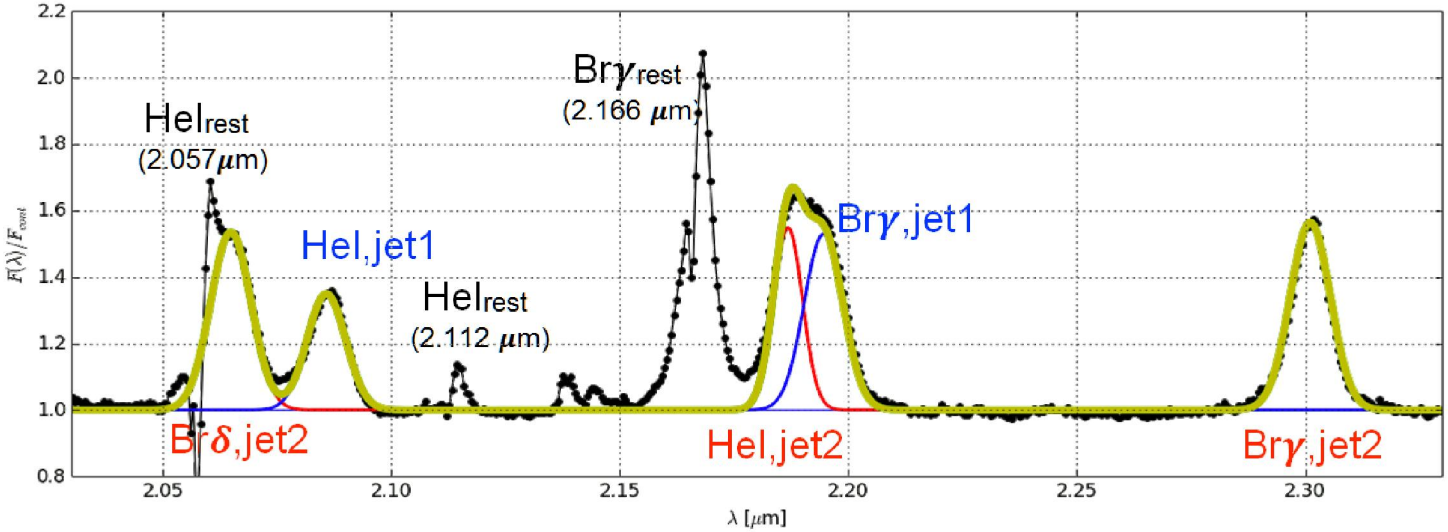
Observations de SS433 avec GRAVITY



- HeI avec un P Cygni
- Brγ à double pic

GRAVITY Collaboration – Petrucci et al., A&A, 602, L11

Observations de SS433 avec GRAVITY



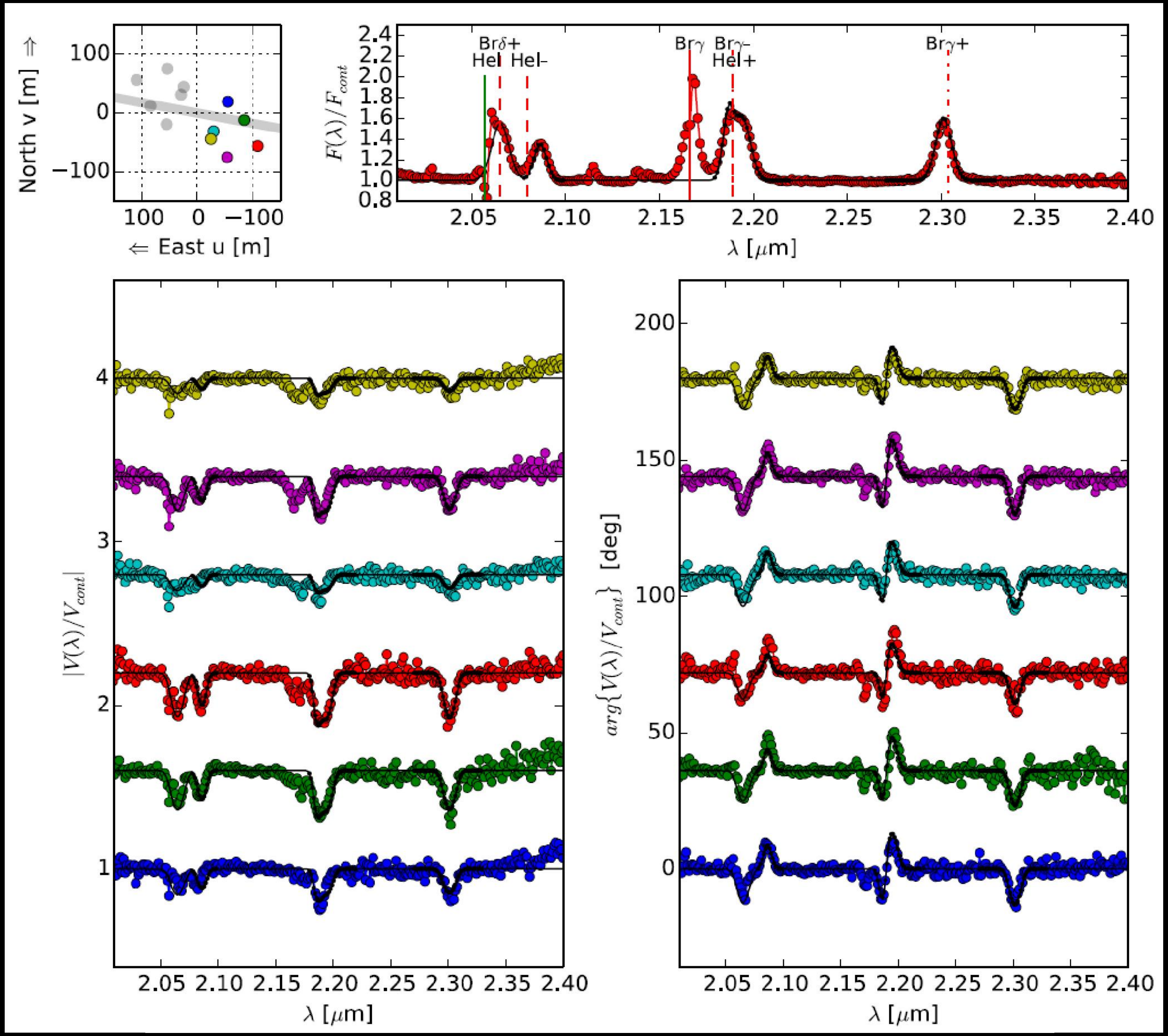
Jet lines

- Emission features agree with the jet line shifts expected at the observation date
- Br$\boldsymbol{\gamma}$, HeI from jet1 and jet2 and Br$\boldsymbol{\delta}$ from jet1

Name	Rest wavelength (μm)	Redshift	*FWHM* (km s^{-1})	*EW* (Å)
Br γ_{jet1}	2.166	0.0132	1364	56
Br γ_{jet2}	2.166	0.0624	1347	62
Br δ_{jet2}	1.944	0.0622	1510	59
He I_{jet1}	2.057	0.0140	1429	37
He I_{jet2}	2.057	0.0631	1027	44

GRAVITY Collaboration – Petrucci et al., A&A, 602, L11

Observations de SS433 avec GRAVITY



GRAVITY Collaboration – Petrucci et al., A&A, 602, L11

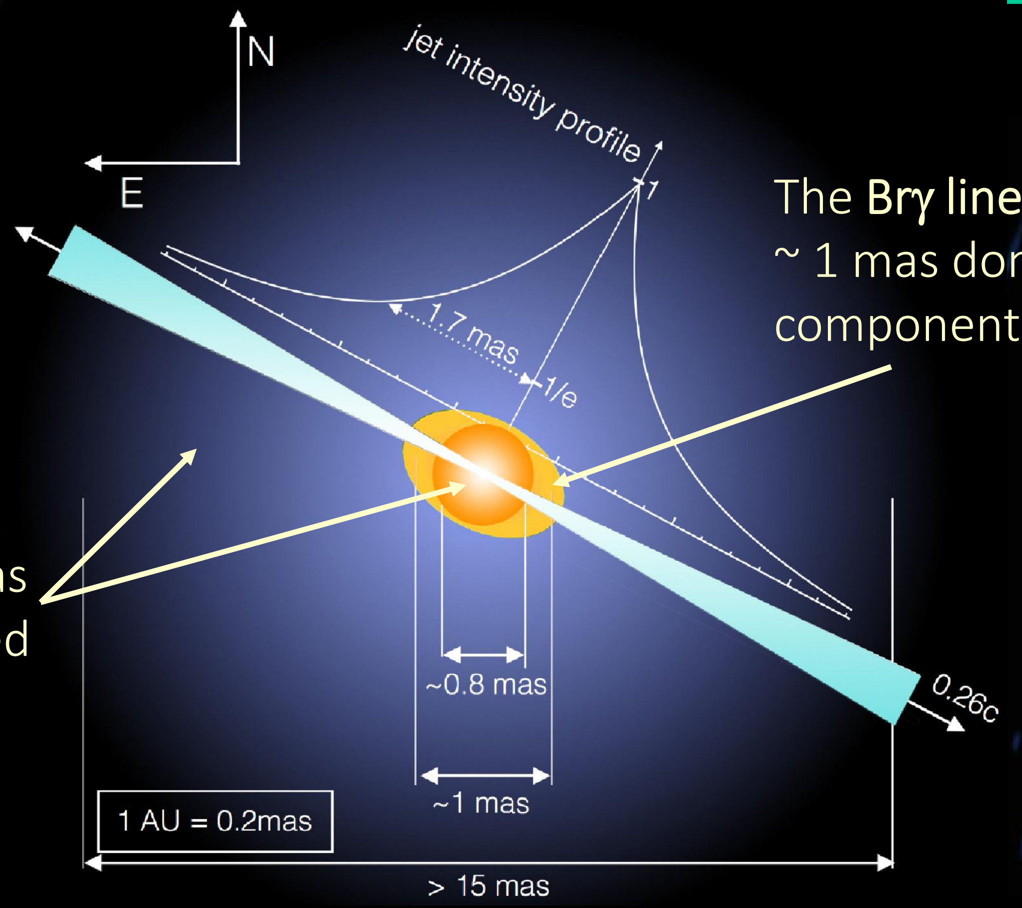
Observations de SS433 avec GRAVITY

360 mas

Sharply decreasing two-sided intensity profile for the **jet**

The **Brγ line-emitting region** ~ 1 mas dominated by an E-W component, i.e. along the jet

Continuum: ~ 0.8 mas + completely resolved background

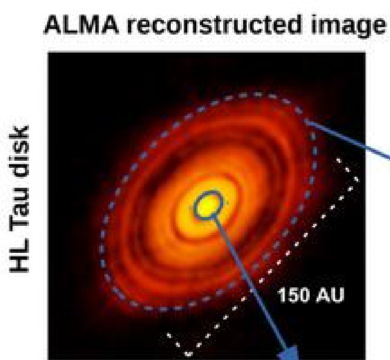


VLBA

GRAVITY Collaboration – Petrucci et al., A&A, 602, L11

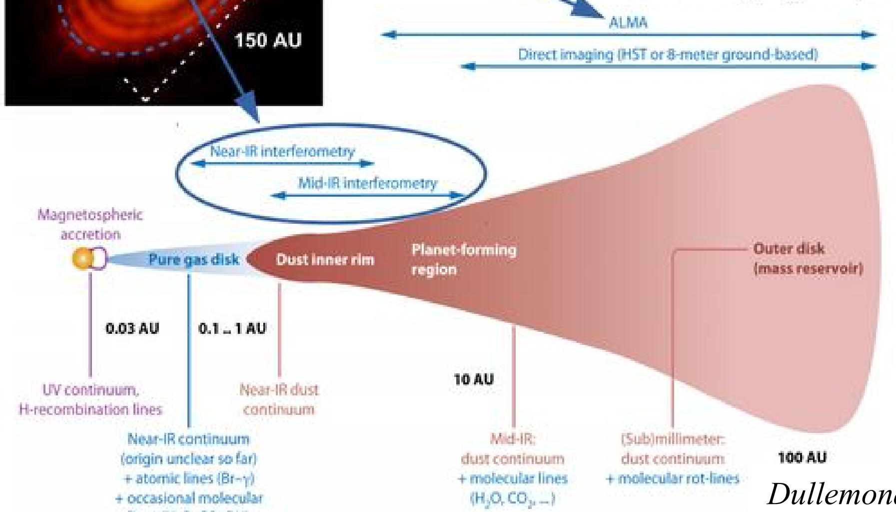
Grand programme objets jeunes GRAVITY

Motivations



1 • Many studies of the outer disk

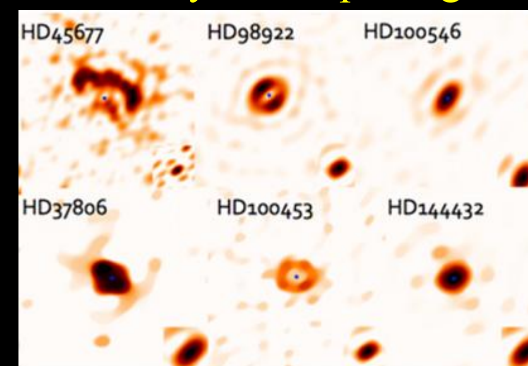
• Inner disk very little known and mostly studied through indirect tracers (e.g. spectroscopy)



Dullemond+2010

2 PIONIER LP (~ 50 HAEBE)

- Variety of morphologies



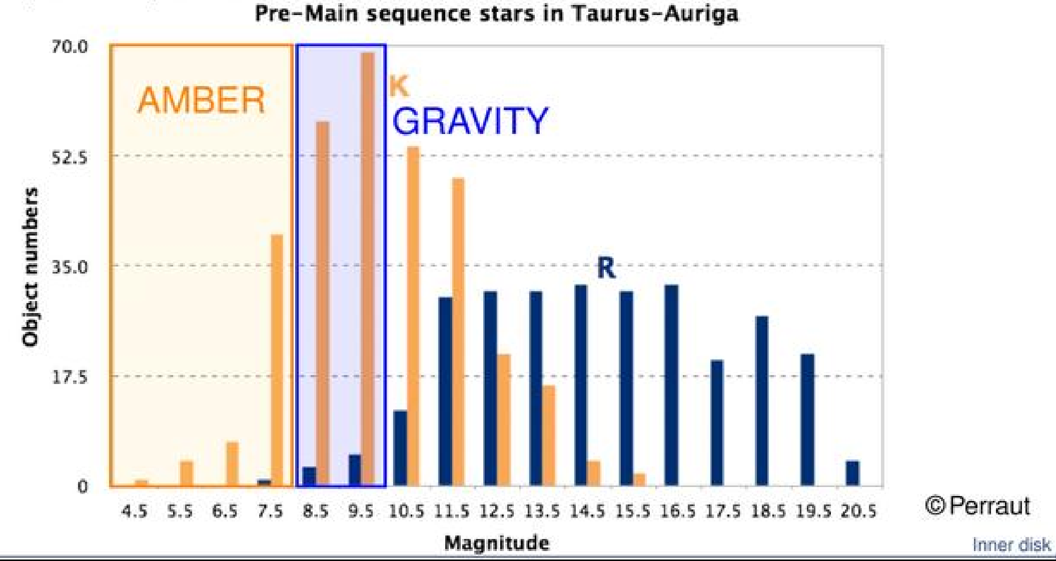
Kluska&Berger

- Sublimation front wide, smooth and wider than predicted *(Lazareff+2017)*

Grand programme objets jeunes GRAVITY

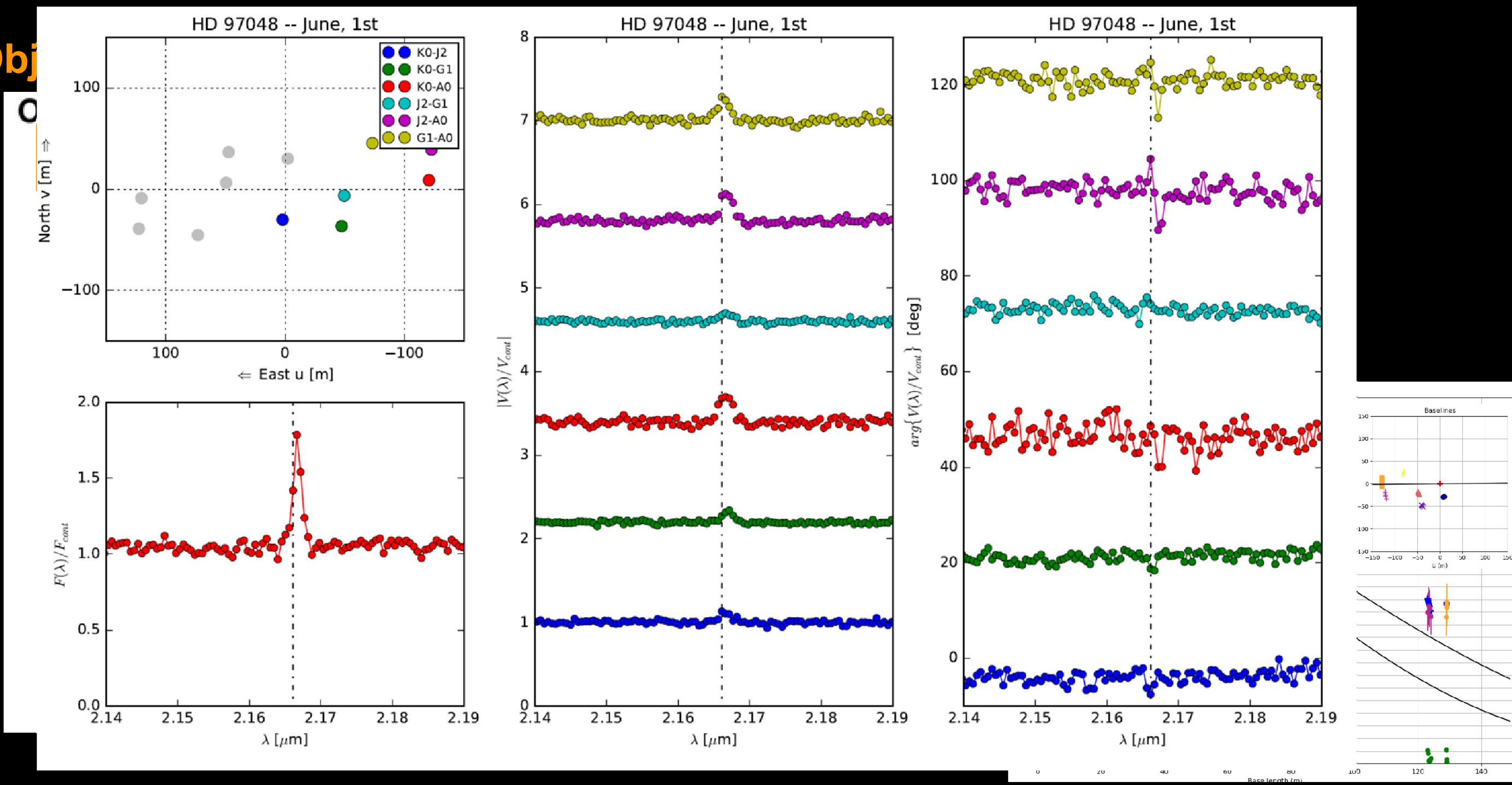
Objectifs

- **Aim:** Statistical study of the gas content in YSO disks to spatially resolve the hot (Brγ) and warm (CO) gas in disks.
- Large sample of YSOs ($\sim$100) spanning a wide range of stellar masses (very low-, high-mass), ages (10^4-10^7) and disk properties (full and TDs).



Grand programme objets jeunes GRAVITY

Obj



Grand programme objets jeunes GRAVITY

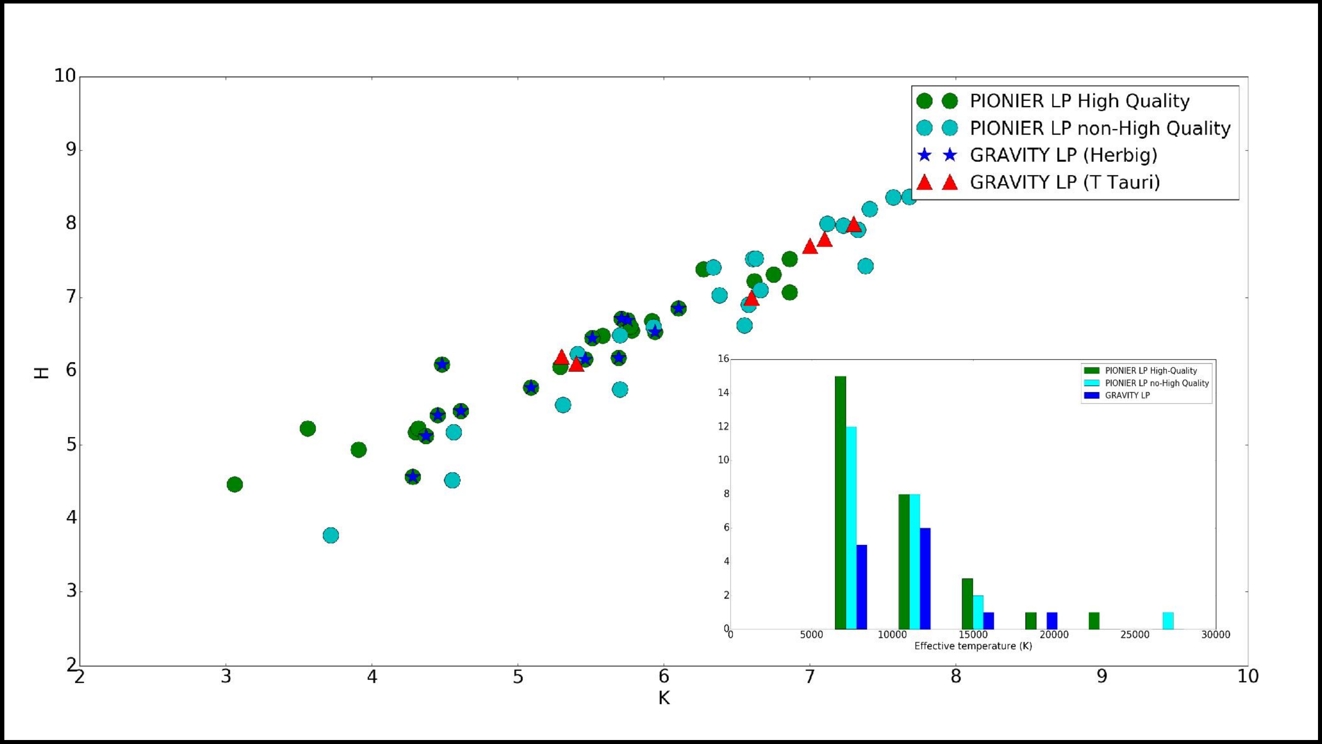
Situation actuelle

- Study of the continuum:
  - 15 HAEBE
  - 6 T Tauris

  13 targets among the LP PIONIER sample

- Study of the Hydrogen:
  - 14 HAEBE
  - 5 T Tauris

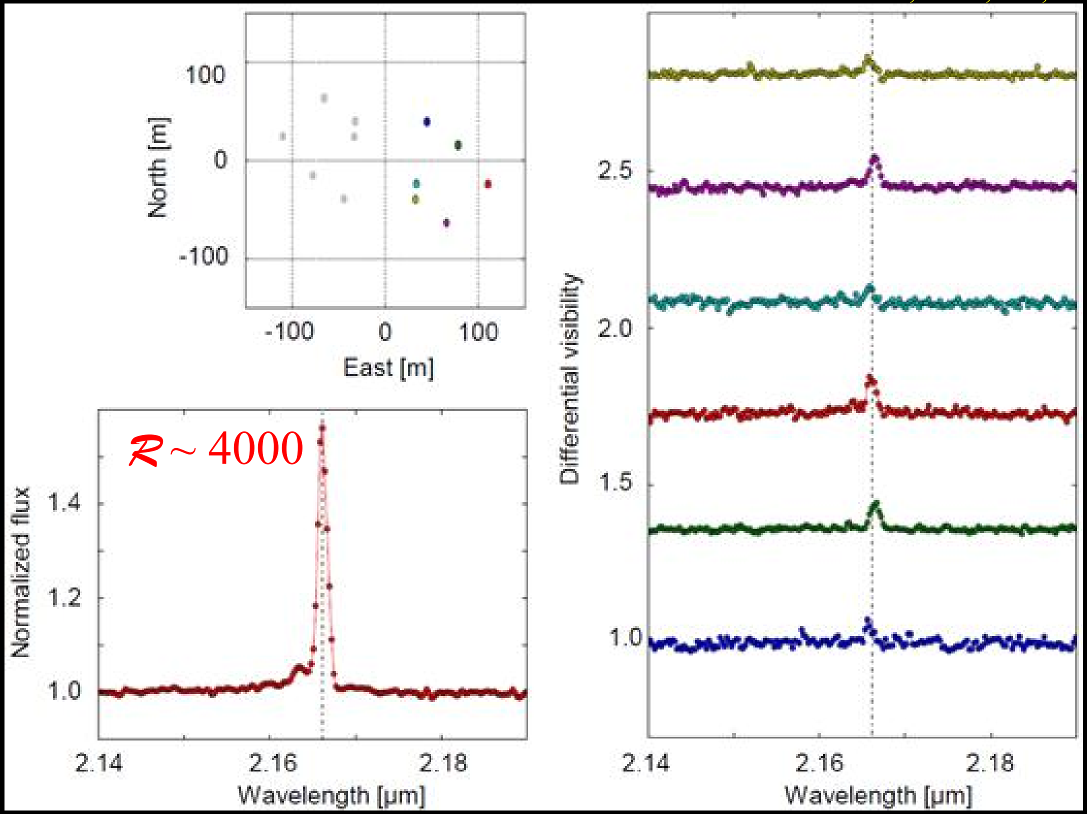
- Study of the CO:
  - A few objects



GRAVITY observations of the T Tau twin system S CrA

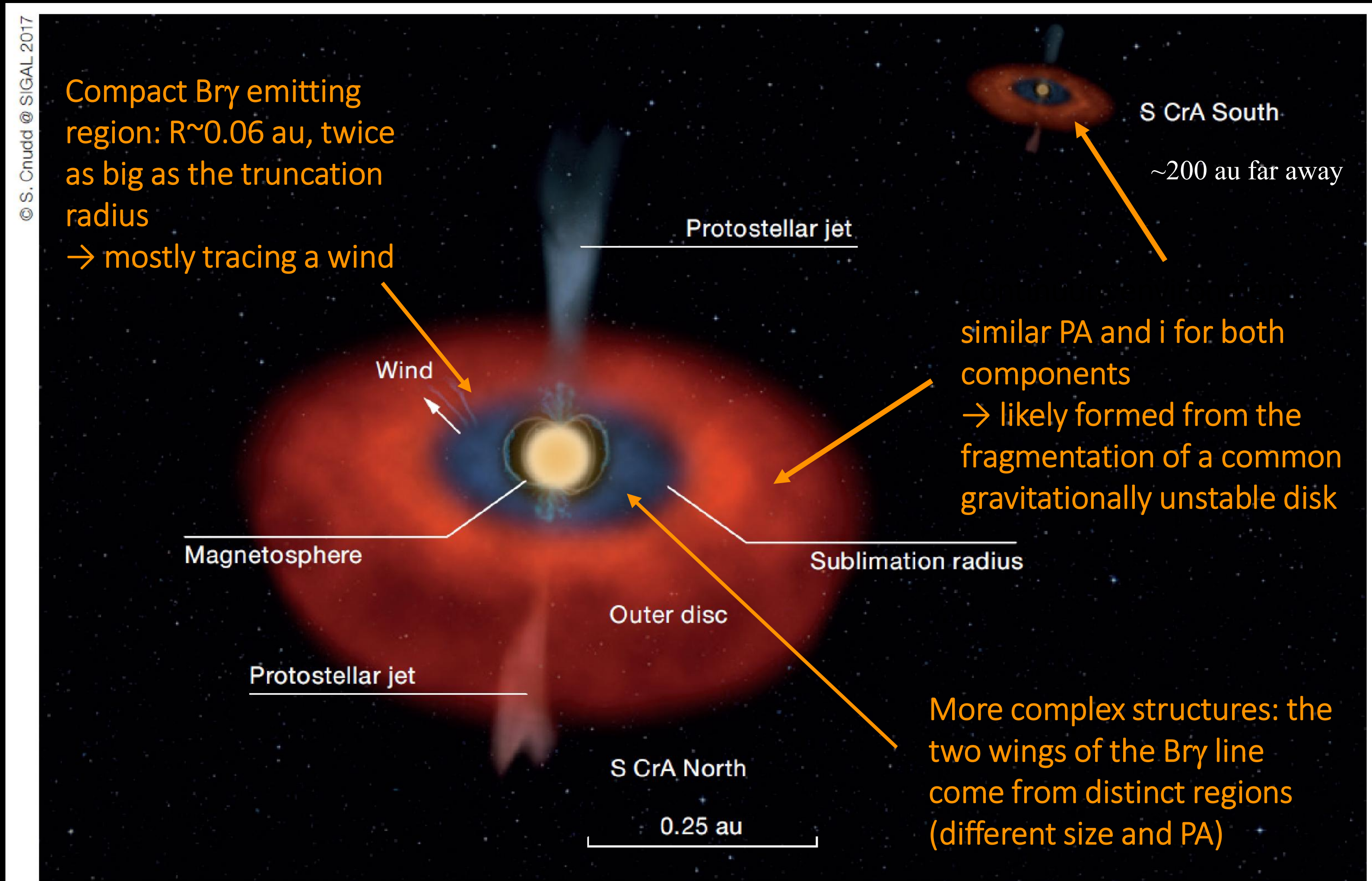
GRAVITY Collaboration 2017, A&A, 602, A94

- 2 CTTS that appear coeval
- K_North = 6.6
- K_south = 7.3
- d ~ 130 pc
- GRAVITY dual-field mode to resolve the circumstellar environment across the Brγ line



- Constraints on continuum
- Wind and magnetosphere on S CrA_North resolved at sub-au scale

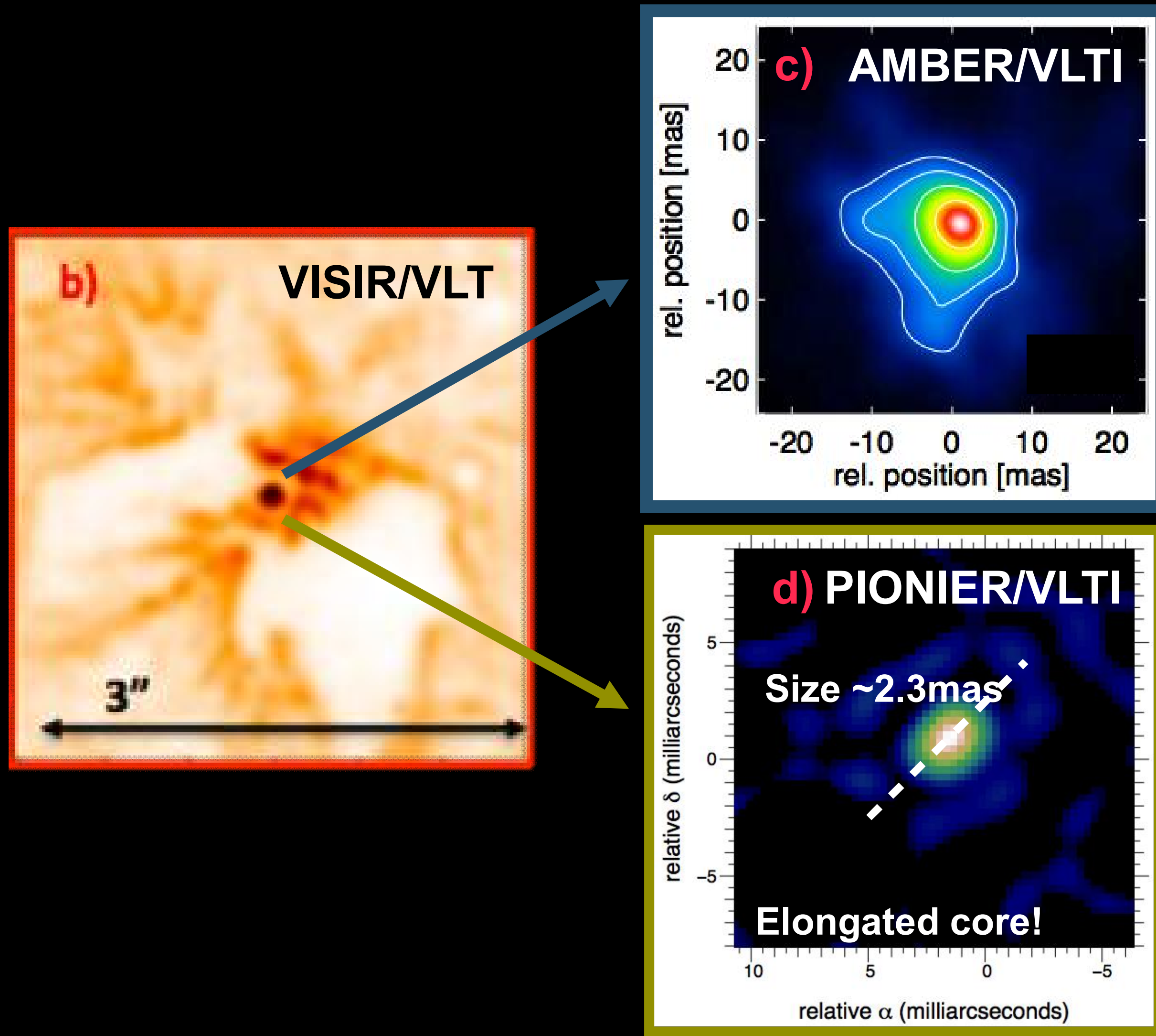
GRAVITY Collaboration: Garcia-Lopez, Perraut et al. 2017, A&A, 608, A78



GRAVITY Collaboration, 2017, The Messenger, 170, 10

Imaging the core of ηCar

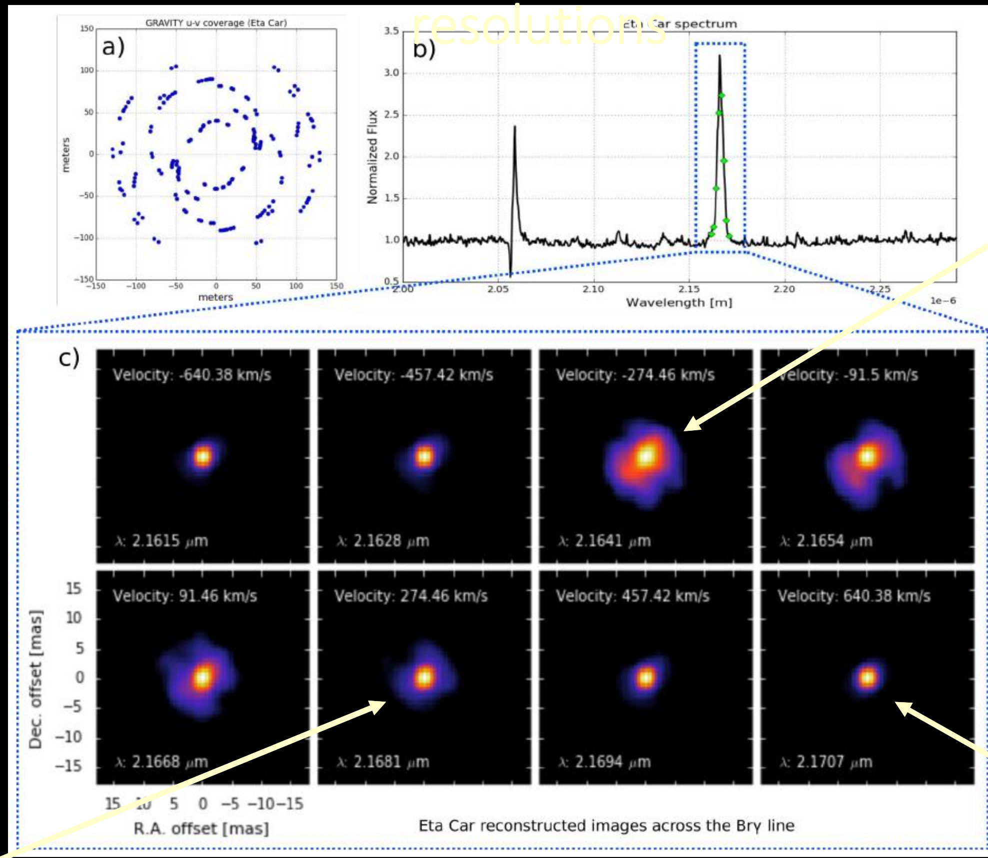
One of the best observable high-mass stars in our Galaxy



- $L \sim 5 \times 10^{6}\, L_{\odot}$
- $M > 100\, M_{\odot}$
- $\dot{M} \sim 8 \times 10^{-4}\, M_{\odot}/yr$
- $v_{wind} \sim 420$ km/s

Observations d'η Car avec GRAVITY

Imagerie chromatique à hautes résolutions spatiales et spectrales (R ~ 4000)



Wind-wind collision cavity: 15 mas, PA ~ S-E direction

Optically-thick primary wind: compact structure (~5 mas) position PA ~ 134° (homunculus PA 131°).

Back side of the primary wind: more compact structure

The images reveal the complex morphology of the primary wind and its interaction with the wind from the hidden secondary star.

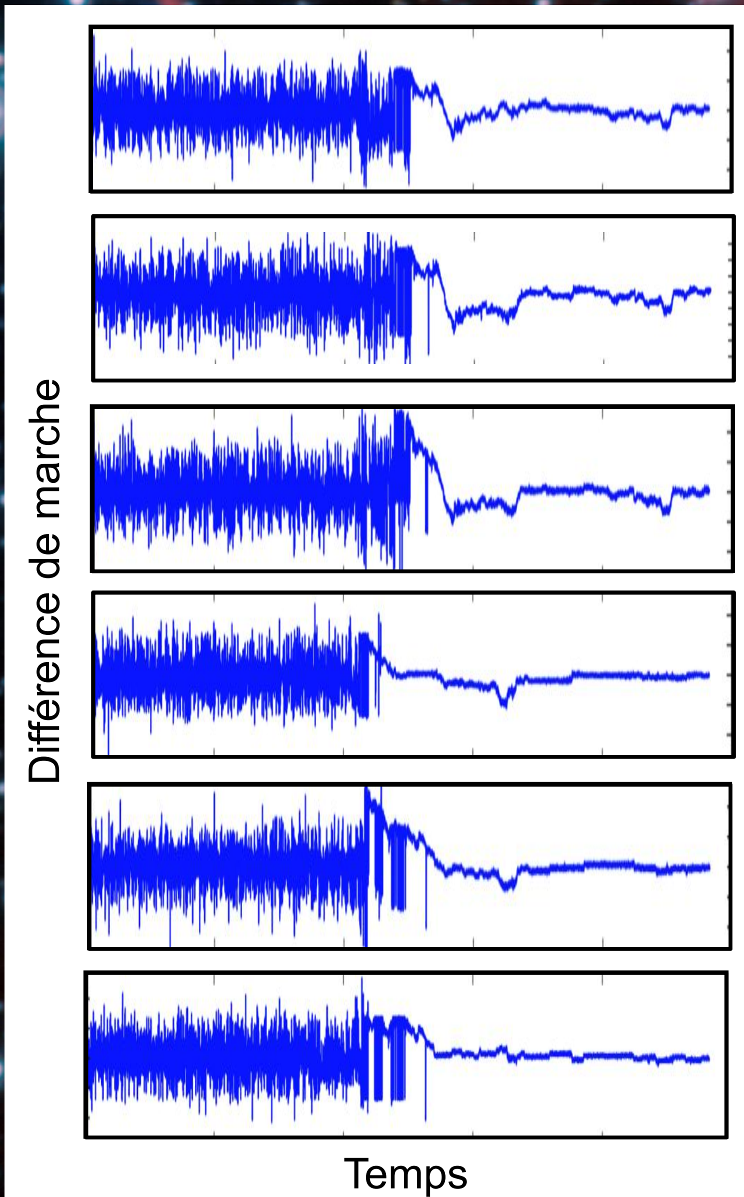
GRAVITY Collaboration: Sanchez, Kervella et al. 2018, A&A, accepté

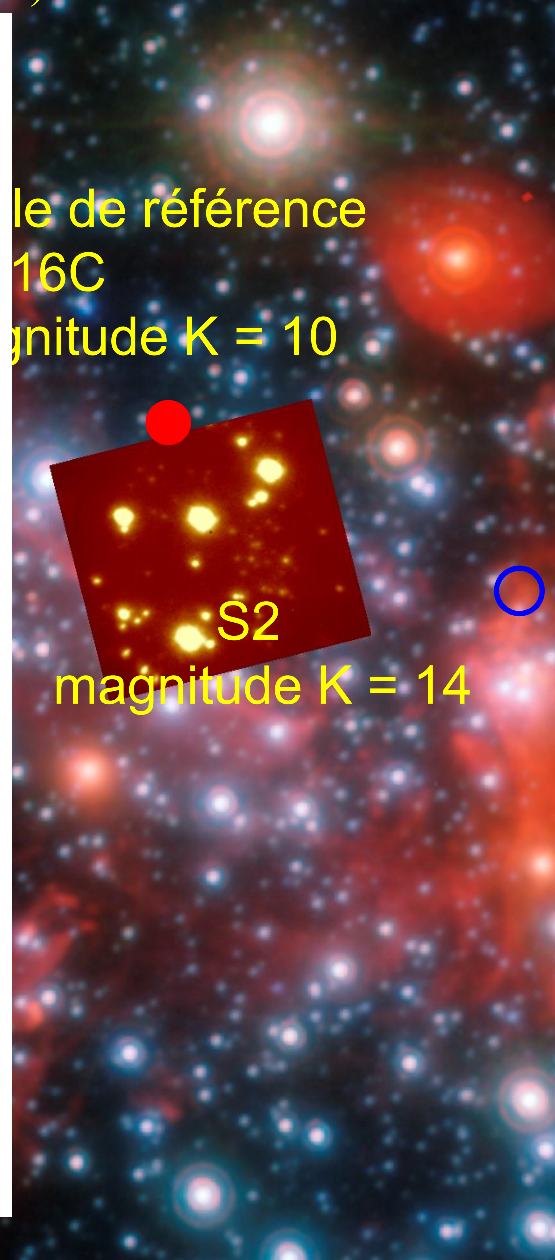
Mesures au Centre Galactique

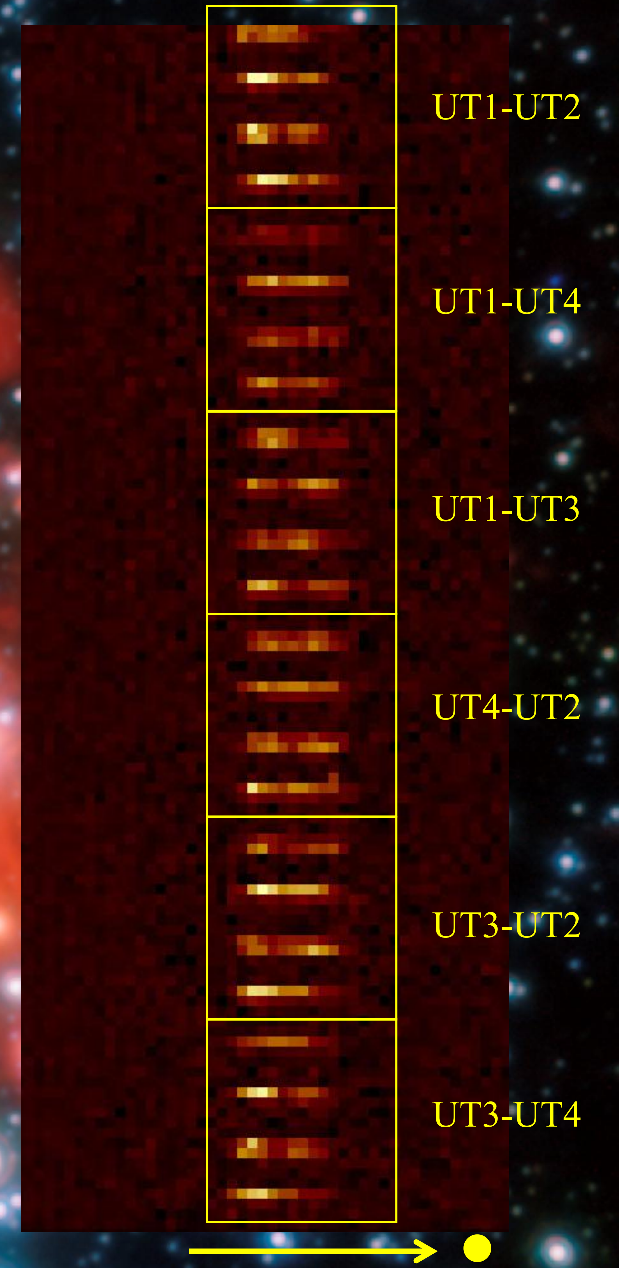
Premières observations du Centre Galactique

(17 mai 2016)

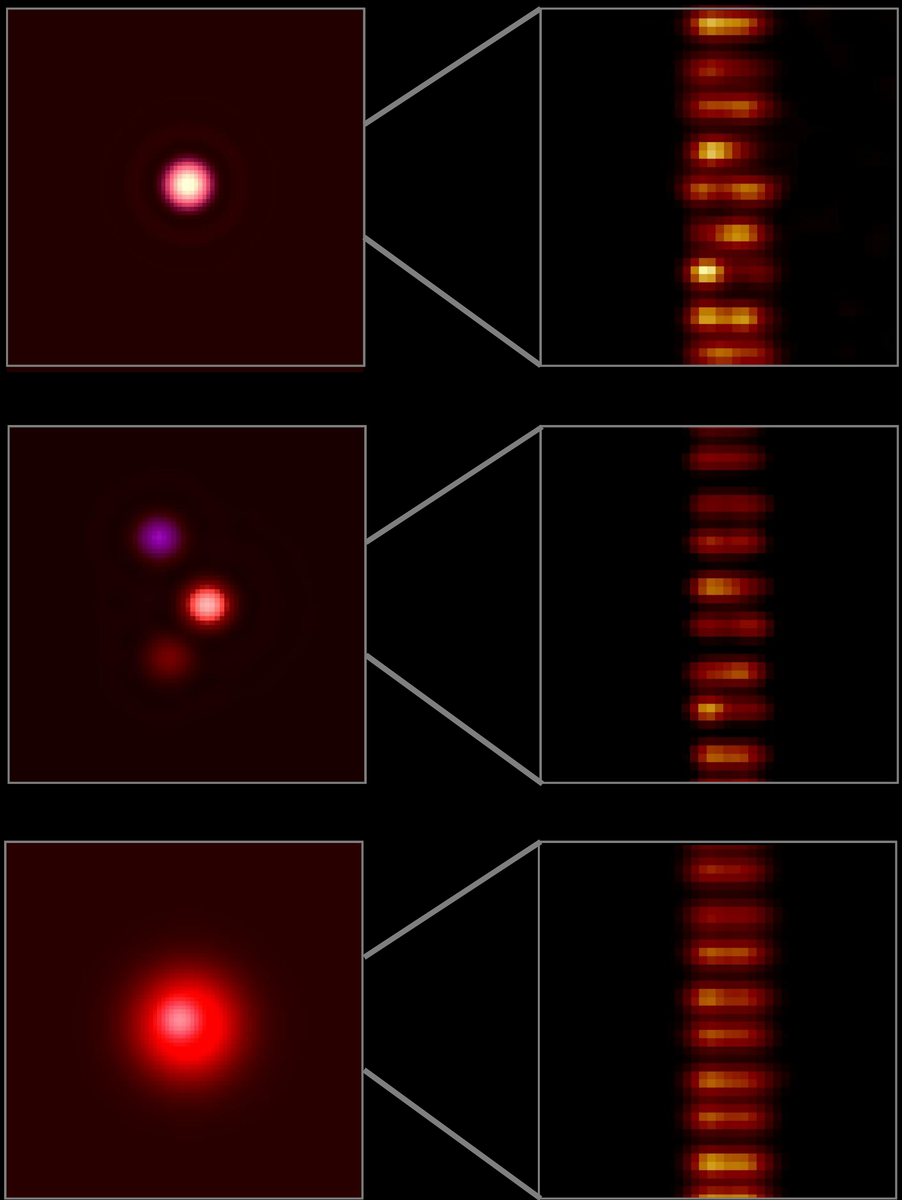
suivi de franges sur IRS16C (●/10 rms)





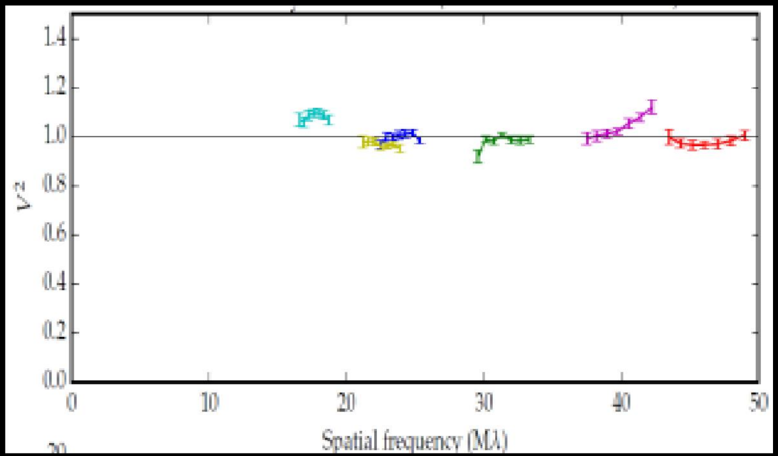


Observations de S2 en septembre 2016

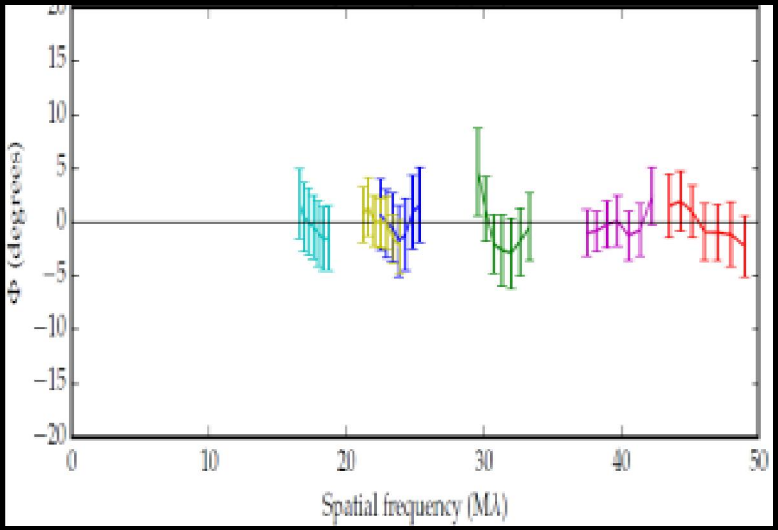


Analyse préliminaire de Pfuhl, Perrin +

Visibilité des franges de S2



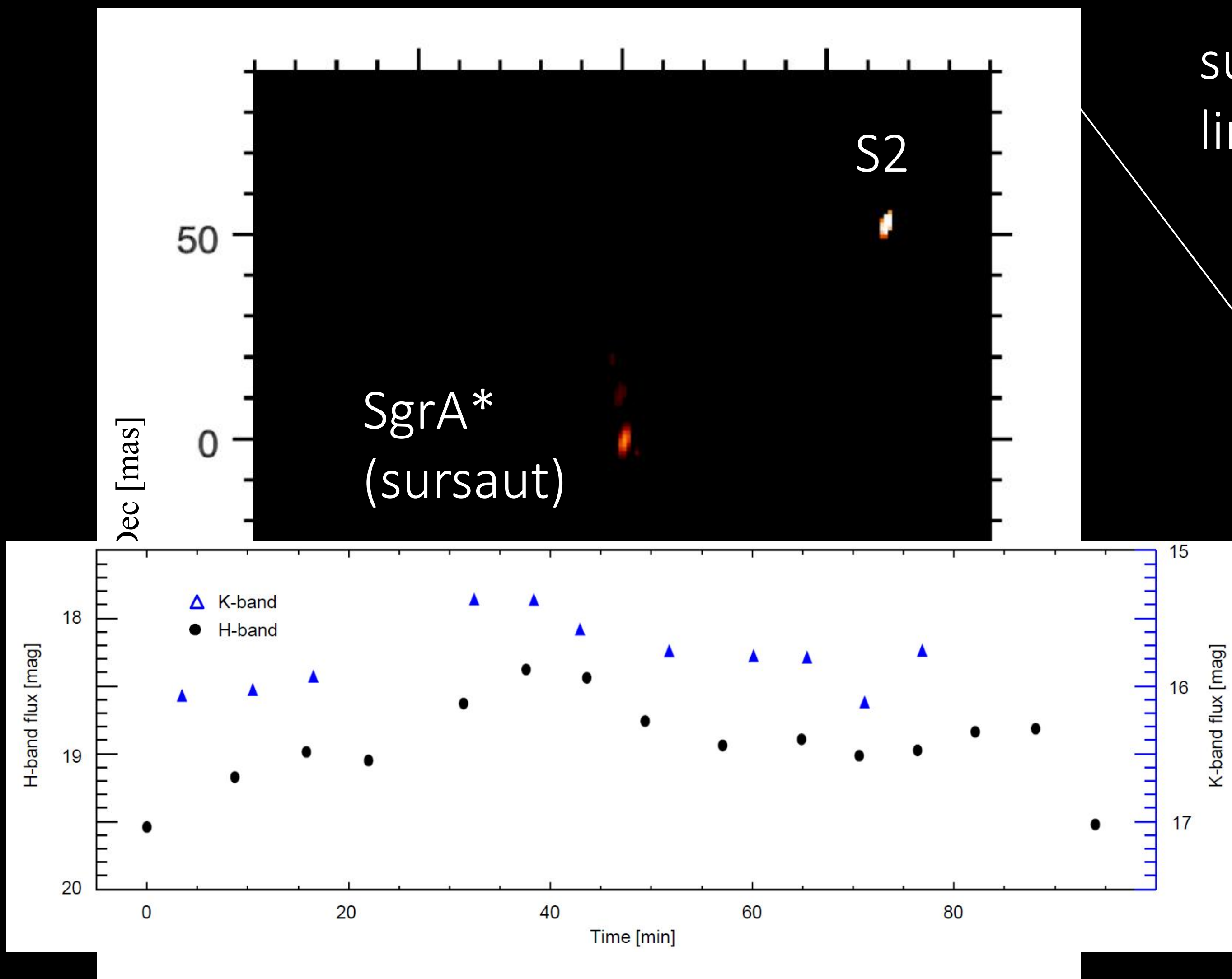
Clôtures de phase de S2

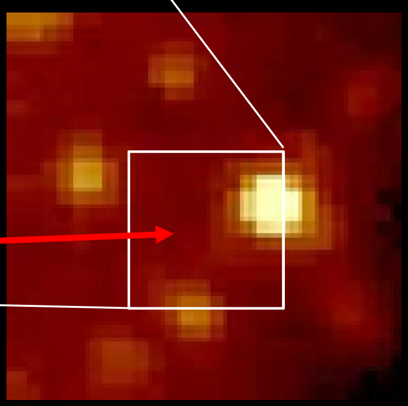


Première détection de Sgr A* en interférométrie infrarouge et premières images à l'échelle de 300 $R_{horizon}$

sursaut K ~ 15,5

limite 3σ K ~ 17,1

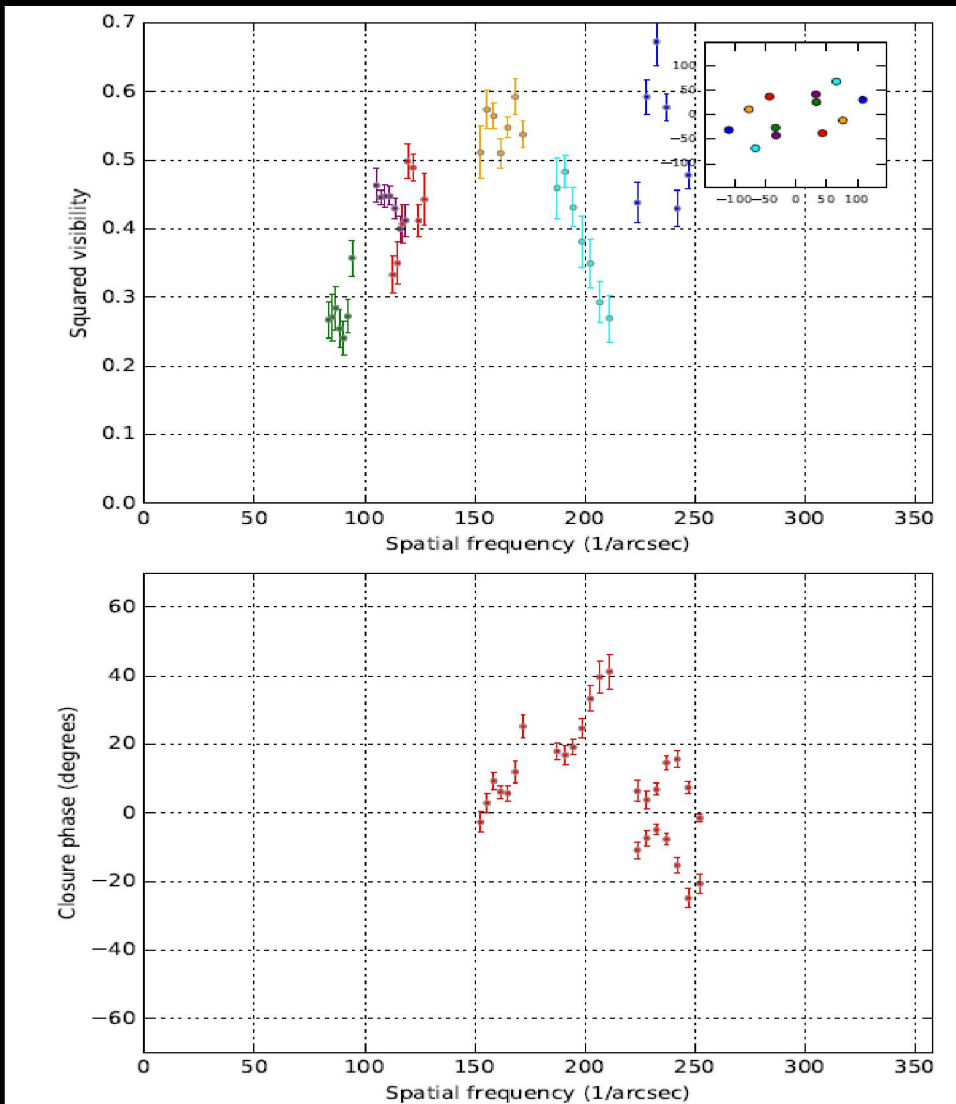




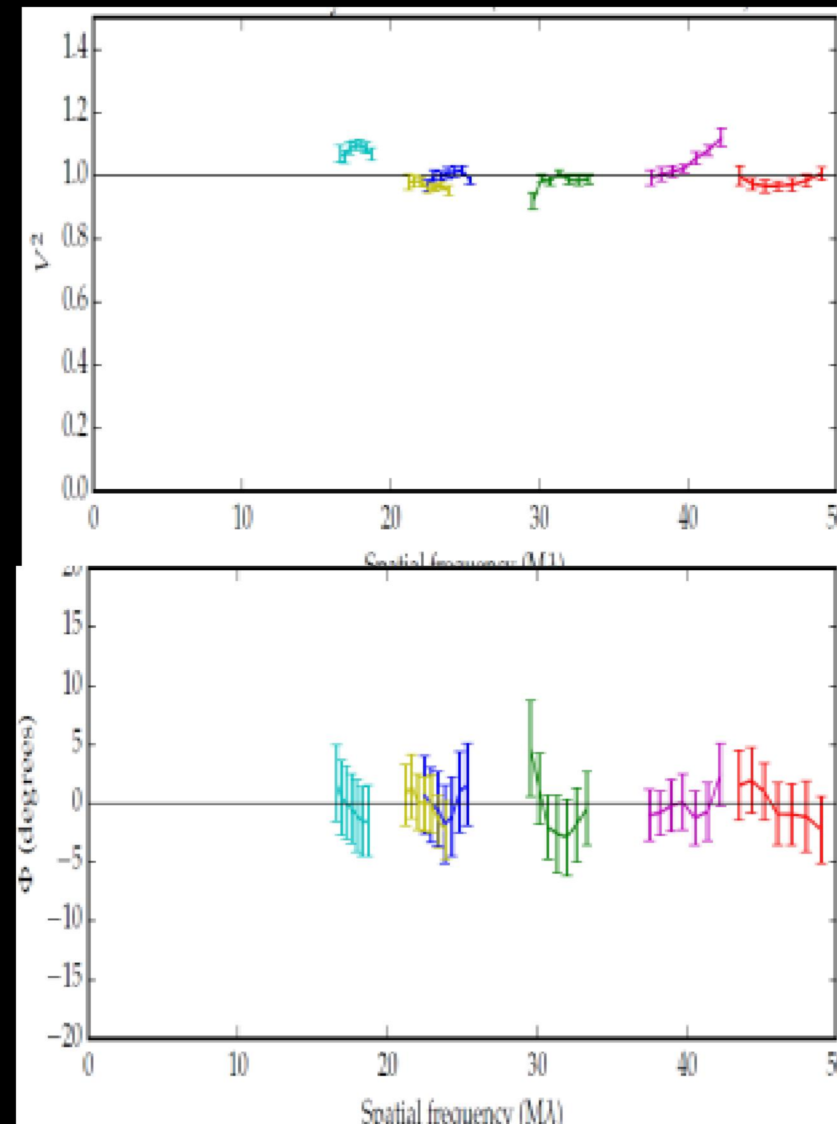
GRAVITY collaboration et al. Abuter et al. , A&A 602, A94 (2017)

Comparaison entre S2 et Sgr A* (+S2)

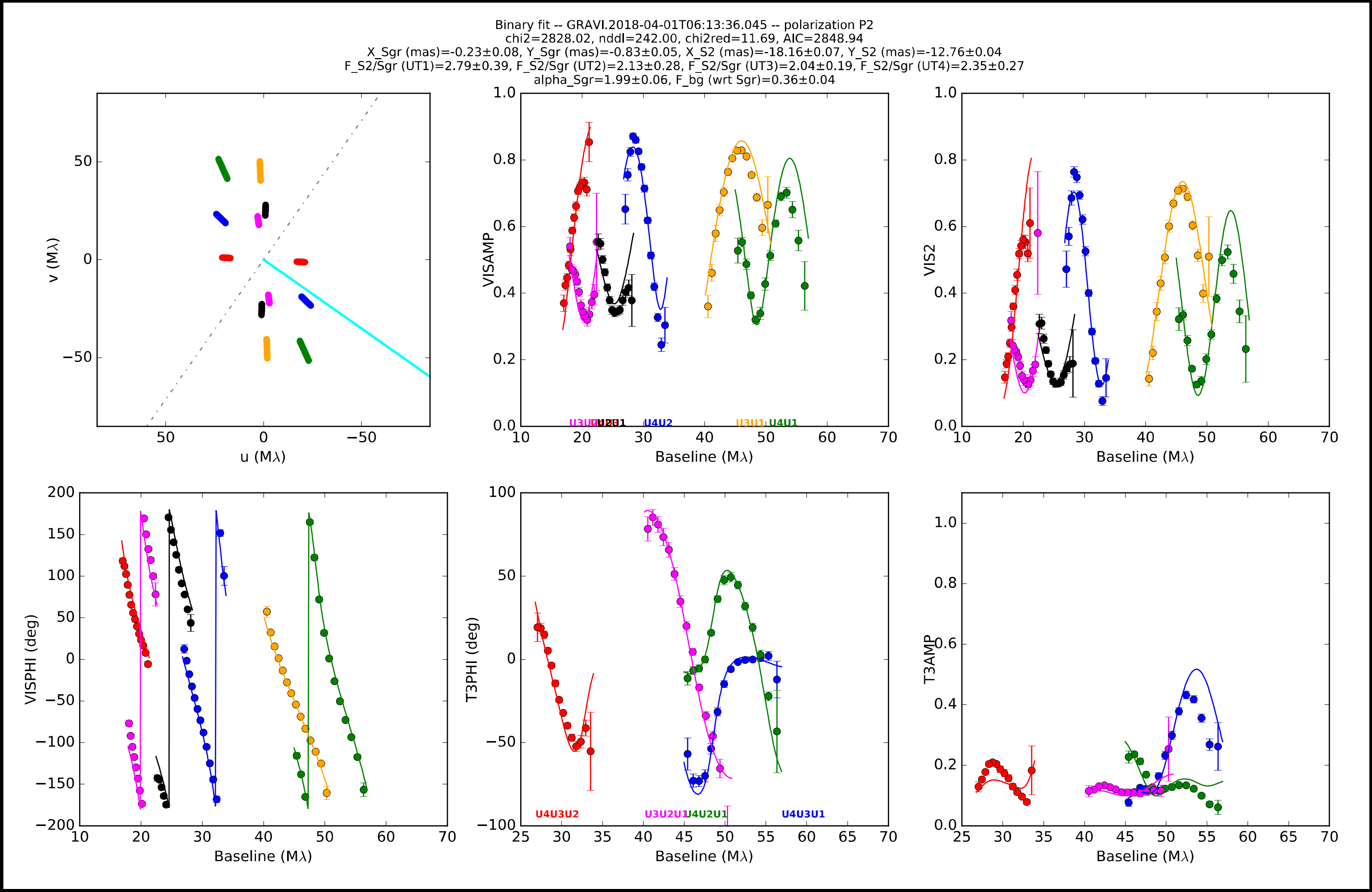
Sgr A* (sursaut)



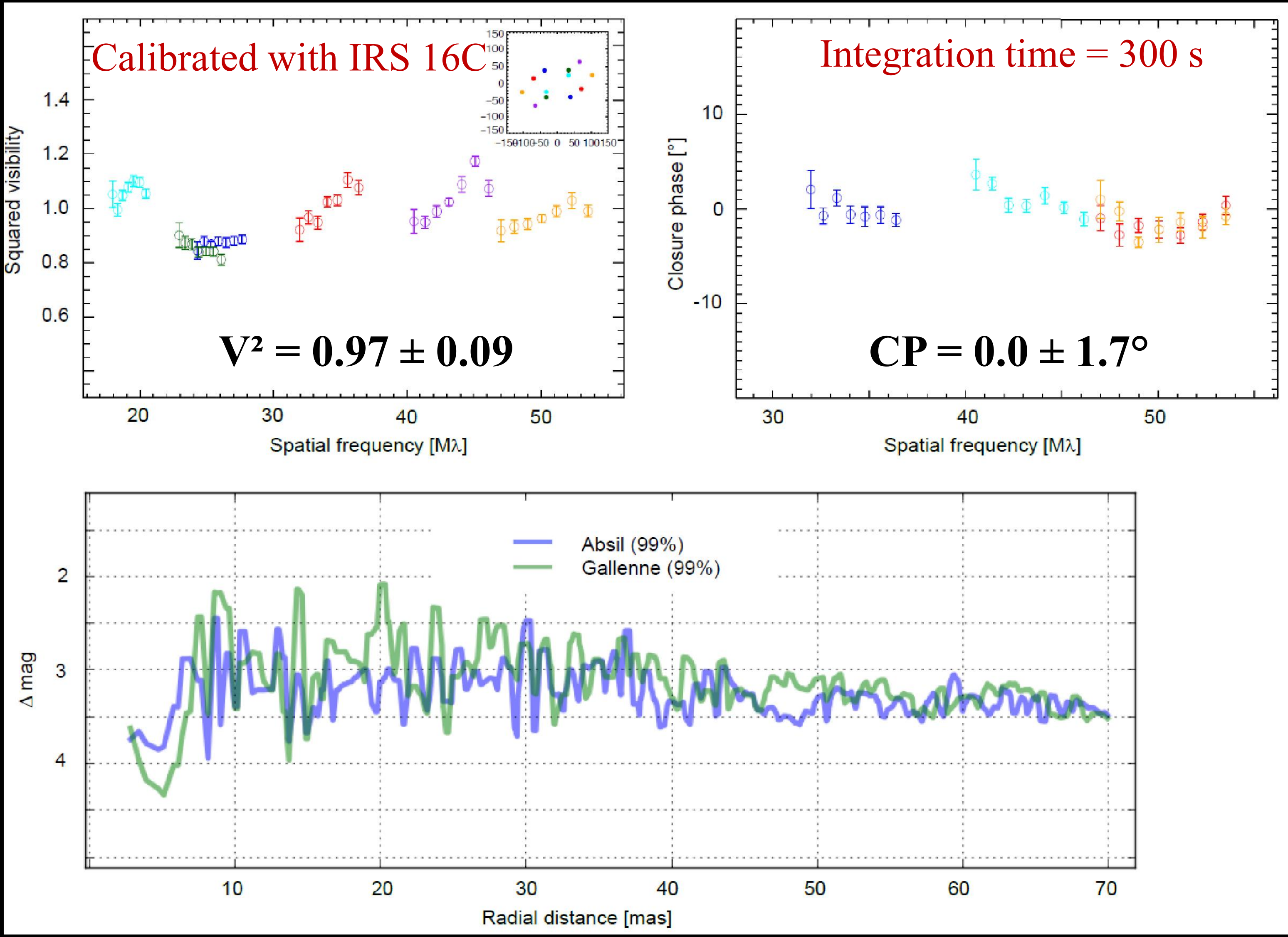
S2



Ajustement des données Sgr A*/S2 par un modèle de binaire

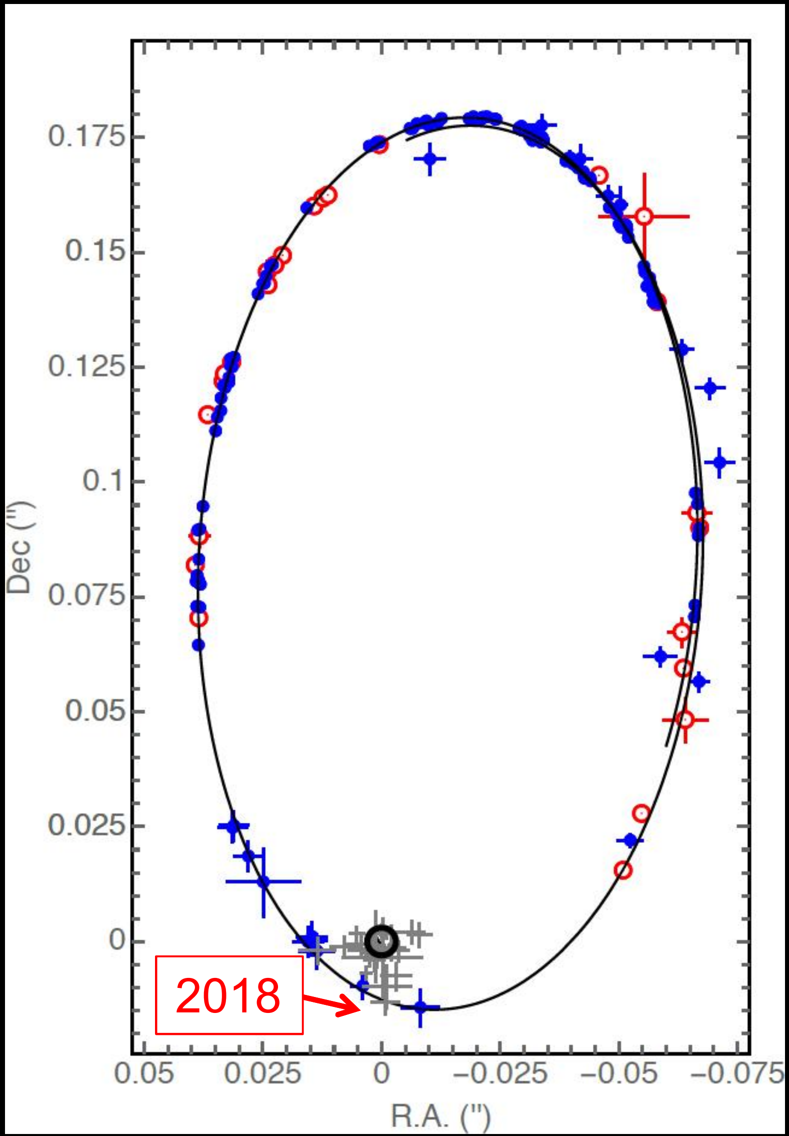


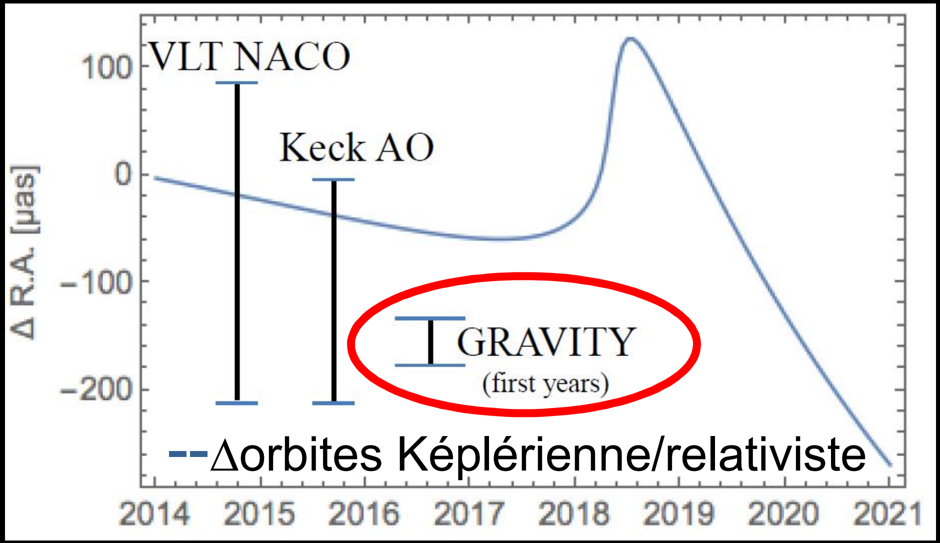
Pas d’étoile plus brillante que K = 17,1 près de S2 et Sgr A*

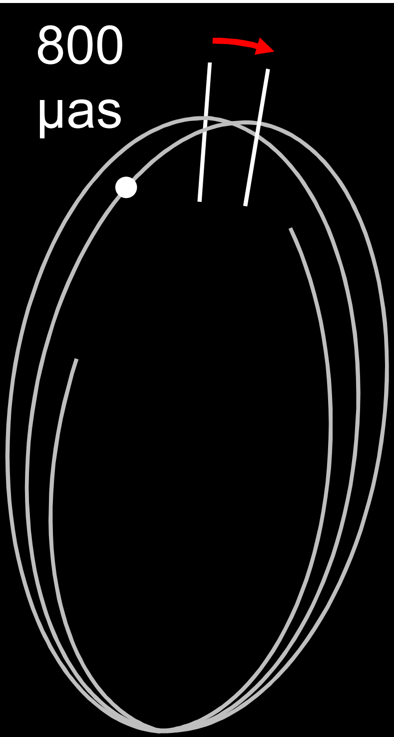


GRAVITY Collaboration – Abuter et al., A&A, 602, A94 (2017)

S2 : mesurer la précession relativiste dès 2018 ?







Gillessen+ update of Gillessen+ 09, Ghez+ 08, Eisenhauer+ 05, Schödel+ 03

Merci de votre attention !