

Étude des propriétés physiques des astéroïdes par imagerie à haute résolution angulaire

par
Benoît Carry^{1,2}

Thèse co-encadrée par :

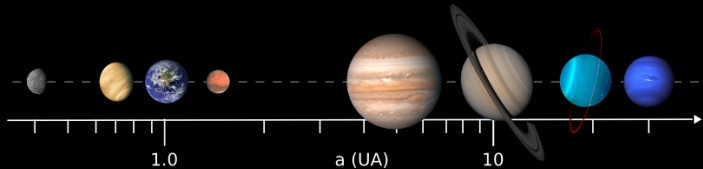
C. Dumas (¹European Southern Observatory)

M. Fulchignoni (²LESIA, Observatoire de Paris)

1. Étude des systèmes planétaires
2. Observations des propriétés physiques
3. La planète naine (1) Cérès
4. L'astéroïde basaltique (4) Vesta
5. Une méthode originale : KOALA
6. Projets en cours et conclusions

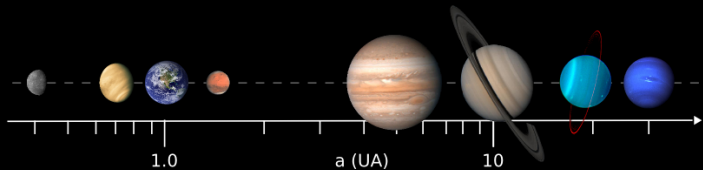
1. Étude des systèmes planétaires
2. Observations des propriétés physiques
3. La planète naine (1) Cérès
4. L'astéroïde basaltique (4) Vesta
5. Une méthode originale : KOALA
6. Projets en cours et conclusions

Petits corps et formation planétaire

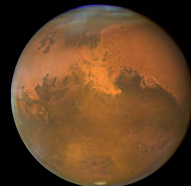
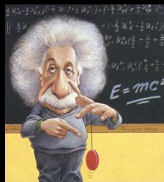


1. Comment s'est formé notre système solaire ?

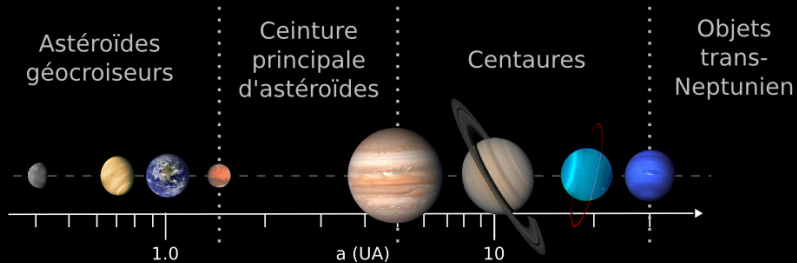
Petits corps et formation planétaire



1. Comment s'est formé notre système solaire ?



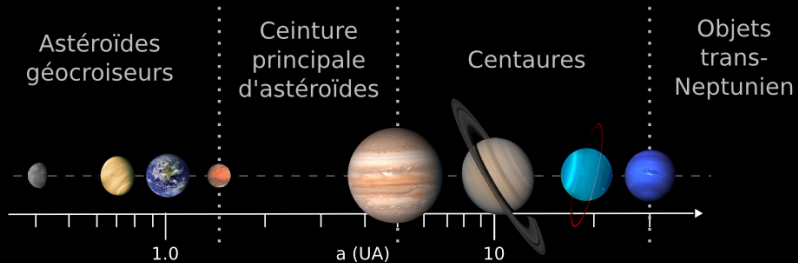
Petits corps et formation planétaire



2. Qui sont les petits corps ? Où se trouvent-ils ?

- poussière $\leq \phi \leq$ planète naine
 - ▶ **Nombreux** ($\sim 400,000$ connus)
 - ▶ Population diverse
- Partout dans le système solaire
 - ▶ **Échantillonnage** héliocentrique : $\Delta_i \ll \Delta$
 - ▶ Composition : roche \rightarrow glace

Petits corps et formation planétaire



3. Que peuvent nous apprendre les petits corps ?

- **Rebut**s de la construction du système solaire
- Peu ou **pas d'activité** endogène
 - ▶ Composition invariante \approx nébuleuse planétaire

⇒ Contraintes sur **température & composition**

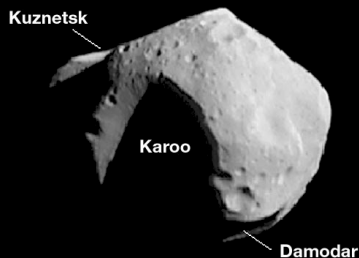
Propriétés physiques

- “Propriétés physiques”

- ▷ Masse
- ▷ Taille
- ▷ Forme
- ▷ Spin

- Intérêt scientifique

- ▷ $\rho \rightarrow$ Composition
- ▷ $\rho \rightarrow$ Structure interne
- ▷ Forme \rightarrow Cratères
- ▷ Forme \rightarrow Porosité
- ▷ Spin \rightarrow Saisons
- ▷ ...



(253) Mathilde
[Housen et al., 1999]

1. Étude des systèmes planétaires
2. Observations des propriétés physiques
3. La planète naine (1) Cérès
4. L'astéroïde basaltique (4) Vesta
5. Une méthode originale : KOALA
6. Projets en cours et conclusions

Méthodes d'observation

○ Courbes de lumière $I = f(t)$

- ▷ **Forme et spin**
- ▷ **Taille relative**
- ▷ **Forme convexe**

○ Occultations stellaires

- ▷ Taille relative
- ▷ Forme
- ▷ Composition de surface

○ Observations du disque résolu

- ▷ Taille relative
- ▷ Forme
- ▷ Composition de surface
- ▷ Composition de l'atmosphère

○ Missions *in-situ*

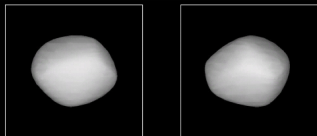
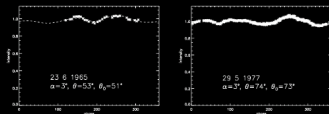
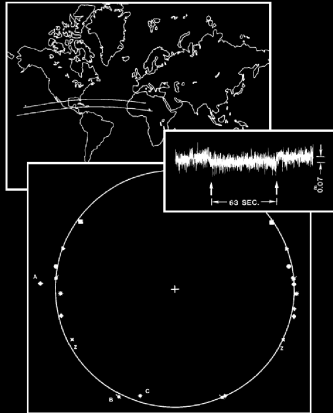


FIG. 15. The shape model of 29 Amphitrite.



Kaasalainen et al. 2002

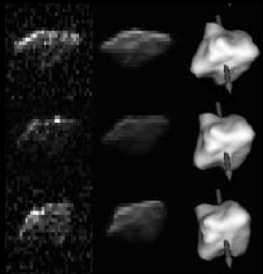
Méthodes d'observation



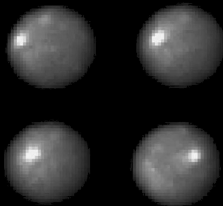
Millis et al. 1987

- Courbes de lumière $I = f(t)$
 - ▷ Forme et spin
 - ▷ Taille **relative**
 - ▷ Forme **convexe**
- Occultations stellaires
 - ▷ Taille & forme
 - ▷ **Un** cliché
 - ▷ Évènements **rare**s
- Observations du disque résolu
 - ▷ Taille **relative**
 - ▷ Forme **convexe**
 - ▷ Spin
 - ▷ **Un** cliché
- Missions *in-situ*
 - ▷ Taille **relative**
 - ▷ Forme **convexe**
 - ▷ Spin
 - ▷ **Un** cliché

Méthodes d'observation



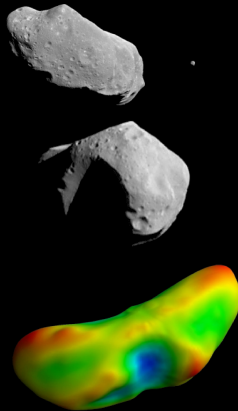
Taylor et al. 2007



Thomas et al. 2005

- Courbes de lumière $I = f(t)$
 - ▷ Forme et spin
 - ▷ Taille **relative**
 - ▷ Forme **convexe**
- Occultations stellaires
 - ▷ Taille & forme
 - ▷ **Un** cliché
 - ▷ Évènements **rares**
- Observations du disque résolu
 - ▷ Taille, forme, spin & albédo
 - ▷ Radar (r limité $\propto r^{-4}$)
 - ▷ Optique (ϕ limité $\propto d.r^{-1}$)
- Missions *in-situ*
 - ▷ *Orbiters* (Mars Express, Mars Reconnaissance Orbiter, etc.)
 - ▷ *Orbiter* (Rosetta)
 - ▷ *Landers* (Mars Science Laboratory, Phoenix, etc.)
 - ▷ *Robots* (Mars Exploration Rovers, etc.)
 - ▷ *Human* (Mars, etc.)

Méthodes d'observation

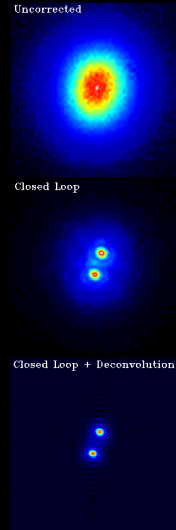


JPL Photojournal

- Courbes de lumière $I = f(t)$
 - ▷ Forme et spin
 - ▷ Taille **relative**
 - ▷ Forme **convexe**
- Occultations stellaires
 - ▷ Taille & forme
 - ▷ **Un** cliché
 - ▷ Évènements **rares**
- Observations du disque résolu
 - ▷ Taille, forme, spin & albédo
 - ▷ Radar (r limité $\propto r^{-4}$)
 - ▷ Optique (ϕ limité $\propto d.r^{-1}$)
- Missions *in-situ*
 - ▷ Taille, forme, pôle, masse...
 - ▷ **Onéreuses**

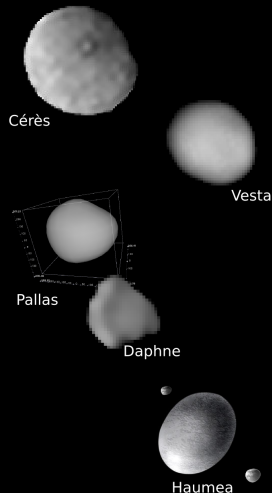
Haute résolution angulaire

- ▶ Imagerie = performante
 - ▷ Temps d'observation
 - ▷ Contraintes apportées
- ▶ Résolution $\Theta \leq \phi$
 - ▷ Cérès $\sim 0.5''$
 - ▷ $0.5'' \approx 1 \text{ € @ } 4 \text{ km}$
 - ▷ Haute résolution angulaire
- ▶ Mise en oeuvre
 - ▷ Grands télescopes ($\Theta = \lambda/D$)
 - ▷ Espace : Hubble, JWST
 - ▷ Sol : Turbulence \rightarrow seeing = $1''$
 - ▷ Optique Adaptative (OA)
 - ▷ Traitement d'images : déconvolution



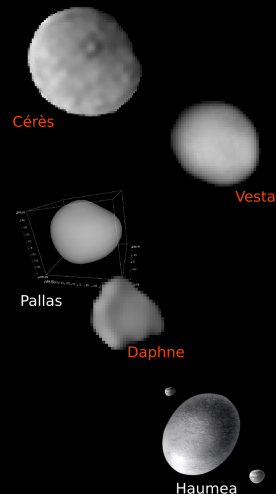
Projet réalisés durant la thèse

1. Planète naine (1) Cérès
2. Astéroïde basaltique (4) Vesta
3. Une nouvelle méthode : KOALA
 - ▶ (2) Pallas & (41) Daphne
4. Trans-Neptunien Haumea
 - ▶ Spectro-imagerie du système
 - ▶ Photométrie VNIR de la famille
5. Minéralogie dans l'infrarouge moyen



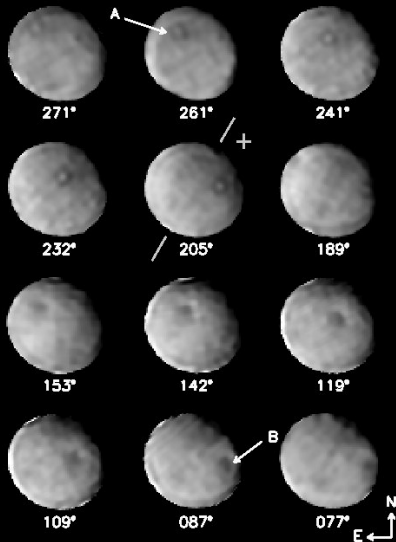
Projet réalisés durant la thèse

1. Planète naine (1) Cérès
2. Astéroïde basaltique (4) Vesta
3. Une nouvelle méthode : KOALA
 - ▶ (2) Pallas & (41) Daphne
4. Trans-Neptunien Haumea
 - ▶ Spectro-imagerie du système
 - ▶ Photométrie VNIR de la famille
5. Minéralogie dans l'infrarouge moyen



1. Étude des systèmes planétaires
2. Observations des propriétés physiques
3. La planète naine (1) Cérès
4. L'astéroïde basaltique (4) Vesta
5. Une méthode originale : KOALA
6. Projets en cours et conclusions

(1) Cérès : Présentation



Carry et al. [2008]

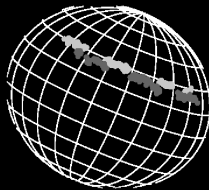
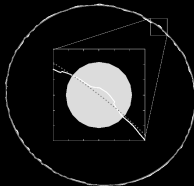
- Planète naine

- ▶ Plus grand astéroïde
- ▶ $\phi \sim 1000$ km
- ▶ Spectre \rightarrow glace H₂O
- ▶ Exosphère d'eau [A'Hearn 92]
- ▶ Mini-planète hydratée

- Observations en imagerie

- ▶ 22 Sep. 2002
- ▶ $\phi \sim 0.66'' \leq$ seeing
- ▶ Keck OA
- ▶ Bandes J, H & K

(1) Cérès : Propriétés physiques



Carry et al. [2008]

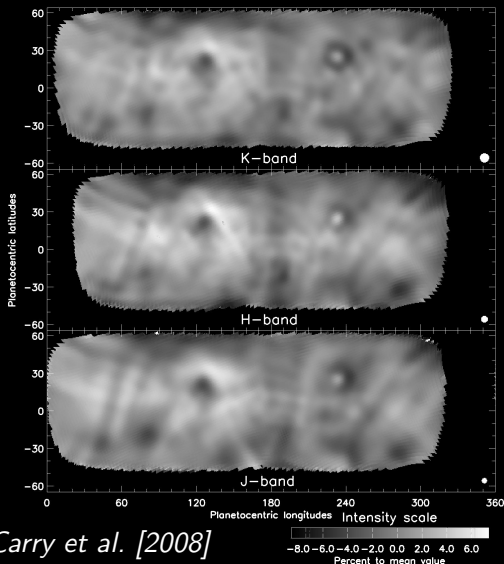
1. Forme et taille

- ▶ Sphère oblongue
- ▶ $a=b=479.7 \pm 2.3$ km
- ▶ $c = 444.4 \pm 2.1$ km
- ▶ Différentié
- ▶ $\rho = 2.2 \pm 0.1$ g/cc
- ▶ Volatiles ?

2. Spin

- ▶ $(\alpha = 288^\circ, \delta = +66^\circ) \pm 5^\circ$
- ▶ Saisons de faible amplitude

(1) Cérès : Cartes d'albédo



► Variation d'albédo

- Premières cartes NIR
- Résolution $\sim 50\text{-}60\text{ km}$
- Albédo $\pm 6\%$
- Structures $50\text{-}180\text{ km}$

► Photométrie

- Hautes latitudes
- Glace H_2O ?
- Résolution spectrale

► Présence de volatiles

(1) Cérès : Conclusions

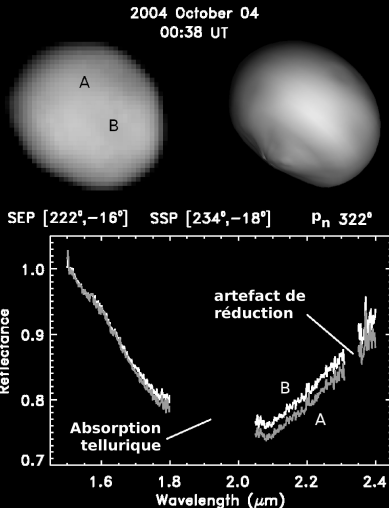
- ▶ Planète naine (1) Cérès
 - ▶ Structure interne **différentiée**
 - ▶ Présence possible d'éléments volatiles
 - ▶ Glace d'eau en surface ?
- ▶ Pour conclure sur la présence de glace
 - ▶ Amélioration de la résolution spectrale
 - ▶ Observations par spectro-imagerie
 - ▶ Mission Dawn en 2015

1. Étude des systèmes planétaires
2. Observations des propriétés physiques
3. La planète naine (1) Cérès
4. L'astéroïde basaltique (4) Vesta
5. Une méthode originale : KOALA
6. Projets en cours et conclusions

(4) Vesta : Présentation

- Second astéroïde en taille
 - ▶ Corps parent des météorites HED
 - ▶ Vernazza et al [2006] \neq altéré
 - ▶ Fortes variations d'albédo
 - ▶ Mini-planète basaltique
- SINFONI (ESO VLT)
 - IFU assisté par OA
 - ▶ $\Theta \approx 50$ mas
 - ▶ $R = 1500$ (vs 5-10 imagerie)
 - J & H+K : 1.1-2.4 μm

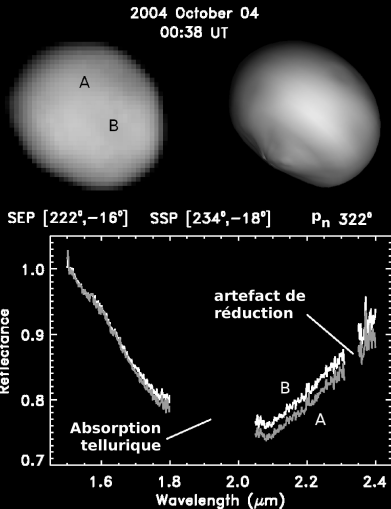
- Conditions d'observation



Carry et al. [2009]

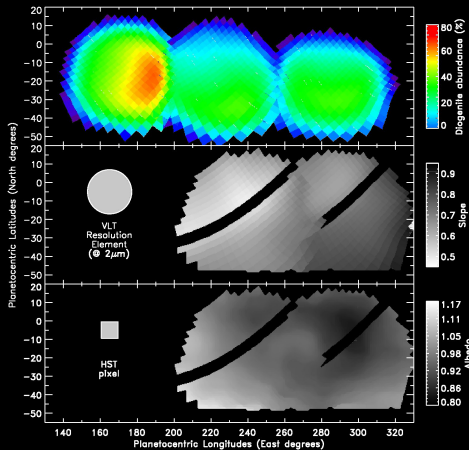
(4) Vesta : Présentation

- Second astéroïde en taille
 - ▶ Corps parent des météorites HED
 - ▶ Vernazza et al [2006] \neq altéré
 - ▶ Fortes variations d'albédo
 - ▶ Mini-planète basaltique
- SINFONI (ESO VLT)
 - IFU assisté par OA
 - ▶ $\Theta \approx 50$ mas
 - ▶ $R = 1500$ (vs 5-10 imagerie)
 - J & H+K : 1.1-2.4 μm
- Conditions d'observation
 - $\phi \sim 0.55''$
 - Test de SINFONI
 - Météo médiocre
 - 14% surface
 - ▶ $\Theta \approx 90, 140, 370$ km !!



Carry et al. [2009]

Étude comparative de la surface



- Création de cartes
 - ▶ Minéralogique
 - ▶ Pente spectrale
 - ▶ Albédo (HST)
- Corrélation géographique :
 - ▶ Pente - Albédo
 - ▶ Pente - Topographie

Carry et al. [2009]

Contraintes observationnelles

Les observations indiquent que

- a. Vesta n'est **pas affecté** par le **space weathering**
- b. Vesta présente de fortes **variations d'albédo**
- c. \exists Corrélation géographique **pente - albédo**
- d. \exists Corrélation géographique **pente - topographie**

Résumé des scénarios possibles

Quels sont les scénarios possibles ?

Résumé des scénarios possibles

Quels sont les scénarios possibles ?

1. Inhomogénéité de composition ou taille de grain
2. Secousses sismiques via relaxation du cratère géant
3. Champs magnétique fossile à la surface

Résumé des scénarios possibles

Quels sont les scénarios possibles ?

1. Inhomogénéité de composition ou taille de grain
2. Secousses sismiques via relaxation du cratère géant
3. Champs magnétique fossile à la surface

Résumé des scénarios possibles

Quels sont les scénarios possibles ?

1. Inhomogénéité de composition ou taille de grain
2. Secousses sismiques via relaxation du cratère géant
3. Champs magnétique fossile à la surface

Résumé des scénarios possibles

Quels sont les scénarios possibles ?

1. Inhomogénéité de composition ou taille de grain
 - ▶ Secousses sismiques via relaxation du cratère géant
 - ▶ Champs magnétique fossile à la surface

(4) Vesta : Conclusions

1. Astéroïde (4) Vesta

- ▶ Composition hétérogène \neq propriétés observées
- ▶ Champs magnétique fossile ?
- ▶ Activité sismique ?
- ▶ Mission Dawn en 2011

2. Spectro-imagerie

- ▶ Technique prometteuse
- ▶ Utile pour binaires également
- ▶ **Avantages** imagerie + spectroscopie
- ▶ **Difficultés** imagerie \times spectroscopie
- ▶ Limitée au proche infrarouge (**résolution** par OA)

1. Étude des systèmes planétaires
2. Observations des propriétés physiques
3. La planète naine (1) Cérès
4. L'astéroïde basaltique (4) Vesta
5. Une méthode originale : KOALA
6. Projets en cours et conclusions

Pourquoi une nouvelle méthode ?

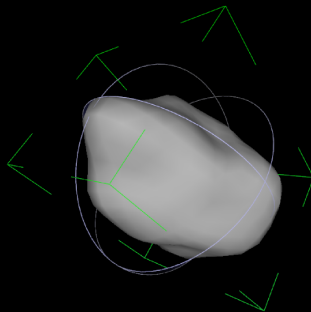
► Méthodes existantes

- Formes ellipsoïdales (imagerie, occultations)
- Formes convexes adimensionnées (courbes de lumière)
- Description très **idéalisée**
- Pertinence ?

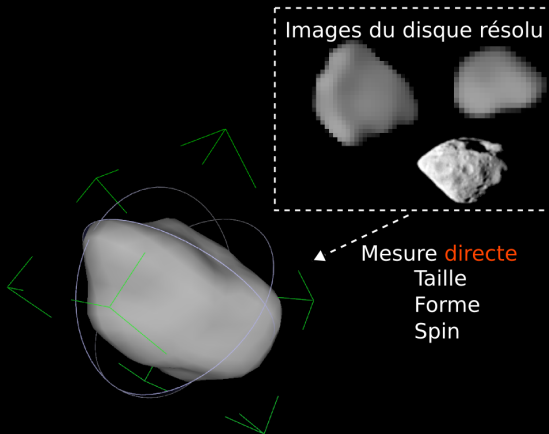
► Besoin d'une nouvelle approche

- Formes concaves plus **réalistes**
- Plus de contraintes ⇒ Extensive
- Observatoire Virtuel ⇒ utilisation des archives

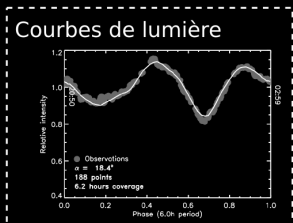
== KOALA : une approche extensive ==



== KOALA : une approche extensive ==

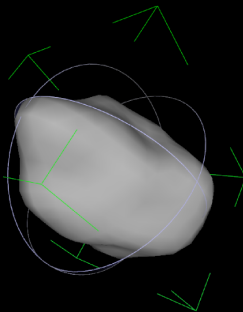


KOALA : une approche extensive



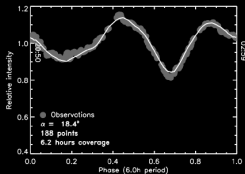
Mesure **indirecte**
 Forme
 Spin

Images du disque résolu

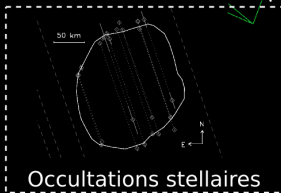
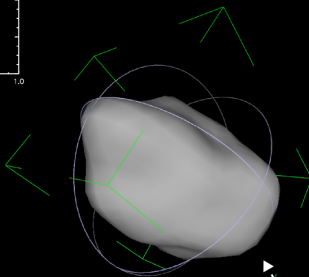


== KOALA : une approche extensive ==

Courbes de lumière



Images du disque résolu

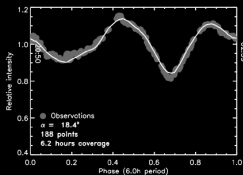


Mesure **directe**
Taille
Forme

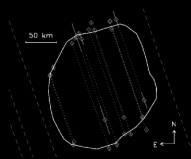
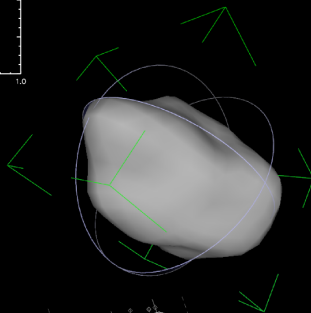
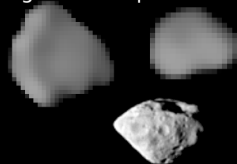
Occultations stellaires

== KOALA : une approche extensive ==

Courbes de lumière



Images du disque résolu



Occultations stellaires

Knitted
Occultations
Adaptive optics
Light-curves
Approach

KOALA : une approche extensive

1. Images du disque résolu & occultations

- ▶ Contour = coupe de l'astéroïde
- ▶ Cordes \sim contour à trou
- ▶ Circonférences de référence

2. Courbes de lumière

- ▶ Évolution de la forme
- ▶ Complète les interstices

3. Processus itératif

- ▶ χ^2 contours
- ▶ χ^2 courbes de lumière

== KOALA : e.g. (41) Daphne ==

► Observations

- Jan-Mai 2008
- W.M. Keck & VLT
- “Resolved Asteroid Program”

► (41) Daphne



KOALA : e.g. (41) Daphne

► Observations

- Jan-Mai 2008
- W.M. Keck & VLT
- “Resolved Asteroid Program”

► (41) Daphne

- Fortement irrégulier
- Cas test pour KOALA
- 219 Images
- 23 Courbes de lumière
- 1 Occultation en 1999
- Comparaison des méthodes

2008 Jan 21 – 12:25

SEP: 328, -40
SSP: 294, -53

2008 Jan 21 – 14:04

SEP: 68, -40
SSP: 34, -53

2008 Mar 28 – 12:06

SEP: 163, -44
SSP: 151, -47

2008 Mar 28 – 12:57

SEP: 215, -44
SSP: 203, -47

2008 Mar 28 – 13:49

SEP: 267, -44
SSP: 255, -47

2008 Mar 28 – 14:31

SEP: 309, -44
SSP: 297, -47

2008 Apr 23 – 12:20

SEP: 254, -52
SSP: 253, -42

2008 Apr 23 – 13:02

SEP: 296, -52
SSP: 295, -42

2008 May 10 – 02:44

SEP: 85, -55
SSP: 90, -38

2008 May 11 – 00:45

SEP: 328, -55
SSP: 334, -38

2008 May 14 – 02:21

SEP: 73, -55
SSP: 80, -37

2008 May 27 – 02:45

SEP: 135, -56
SSP: 146, -33

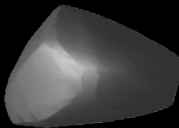
Carry et al. [in prep.]

KOALA : e.g. (41) Daphne

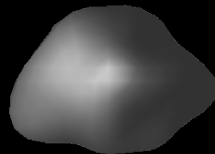
Tri-axial

 $SEP_N: 270$
 $SEP_E: 0$ $SSP_N: 250$
 $SSP_E: 0$  $P_n: 0^\circ$

Courbes de lumière

 $SEP_N: 270$
 $SEP_E: 0$ $SSP_N: 250$
 $SSP_E: 0$  $P_n: 0^\circ$

KOALA

 $SEP_N: 270$
 $SEP_E: 0$ $SSP_N: 250$
 $SSP_E: 0$  $P_n: 0^\circ$

Usuel pour

- ▶ Imagerie
- ▶ Occultations

○ cf Drummond, 2000

Modèle

- ▶ Convexe
- ▶ Adimensionné

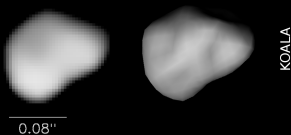
○ Kaasalainen et al., 2002

Nouvelle méthode

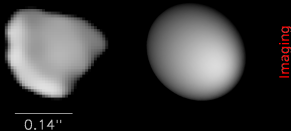
- ▶ \exists Concavités
- ▶ Valide ?

KOALA : biais sur la forme ?

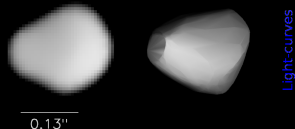
2008 Jan 21 – 12:25



2008 Mar 28 – 12:57



2008 May 14 – 02:21



1. Les images

- ▶ Ell : trop régulier
- ▶ LC : convexe
- ▶ KOALA : ok

2. Les courbes de lumière

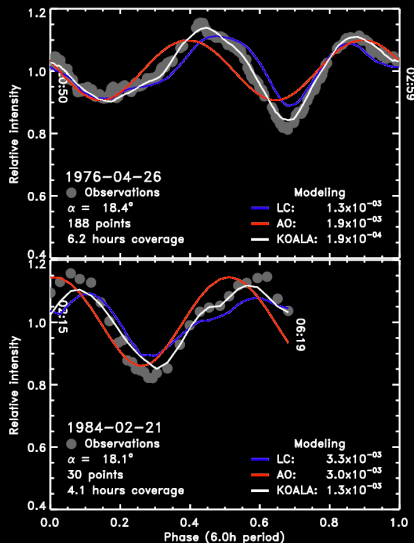
→ KOALA : ok

3. Occultation stellaire

→ KOALA : ok

▶ Forme KOALA valide

KOALA : biais sur la forme ?



1. Les images

- ▶ Ell : trop régulier
- ▶ LC : convexe
- ▶ KOALA : ok

2. Les courbes de lumière

- ▶ Ell : symétrique
- ▶ LC : ok
- ▶ KOALA : ok

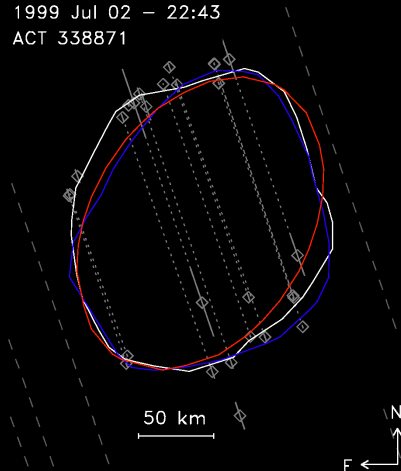
3. Occultation stellaire

- ▶ Forme KOALA valide

KOALA : biais sur la forme ?

1999 Jul 02 – 22:43

ACT 338871



1. Les images

- ▶ Ell : trop régulier
- ▶ LC : convexe
- ▶ KOALA : ok

2. Les courbes de lumière

- ▶ Ell : symétrique
- ▶ LC : ok
- ▶ KOALA : ok

3. Occultation stellaire

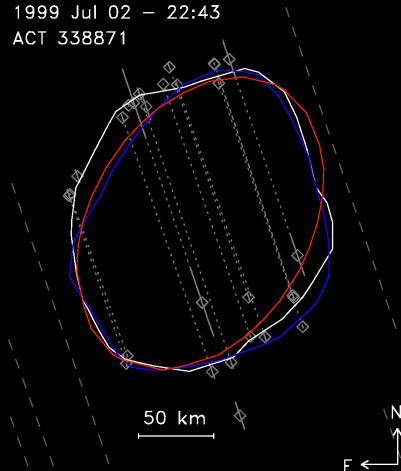
- ▶ Ell : cigare
- ▶ LC : trop pointu
- ▶ KOALA : ok

▶ Forme KOALA valide

KOALA : biais sur la forme ?

1999 Jul 02 – 22:43

ACT 338871



1. Les images

- ▶ Ell : trop régulier
- ▶ LC : convexe
- ▶ KOALA : ok

2. Les courbes de lumière

- ▶ Ell : symétrique
- ▶ LC : ok
- ▶ KOALA : ok

3. Occultation stellaire

- ▶ Ell : cigare
- ▶ LC : trop pointu
- ▶ KOALA : ok

▶ Forme KOALA valide

KOALA : évaluation des biais

1. Mesure de la **taille**

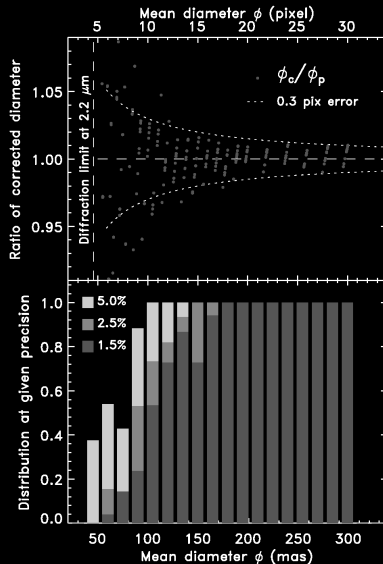
- 198 simulations
- ▶ **Non-biaisée**
- ▶ Précise à 5% ($0.1'' \leq \phi$)

2. Mesure du **spin**

- Comparaison méthodes (# 2 & 41)
- $(\text{Spin})_{LC} = (\text{Spin})_{EI} = (\text{Spin})_{KOALA}$
- ▶ **Non-biaisée**

3. Détermination de la **forme**

- Albédo supposé **uniforme**
- ▶ **Biais** possible, peu probable



KOALA : conclusions

1. Inversion **simultanée**

- d'images du disque apparent
- de courbes de lumière
- d'occultations stellaires

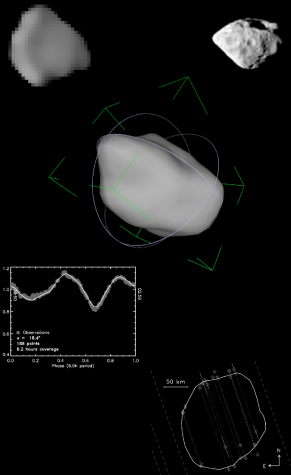
2. Hypothèses :

- la forme est connue
- la rotation est connue

3. Erreurs systématiques

- la forme est connue
- la rotation est connue
- la forme est connue
- la rotation est connue
- la forme est connue
- la rotation est connue

4. Carry et al. [2009], Kaasalainen [2009]



KOALA : conclusions

1. Inversion **simultanée**

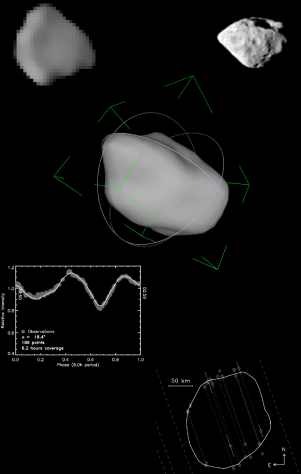
- d'images du disque apparent
- de courbes de lumière
- d'occultations stellaires

2. Hypothèses :

- Albédo uniforme
- Forme générale (convexe & **concave**)

3. Erreurs systématiques

4. Carry et al. [2009], Kaasalainen [2009]



KOALA : conclusions

1. Inversion **simultanée**

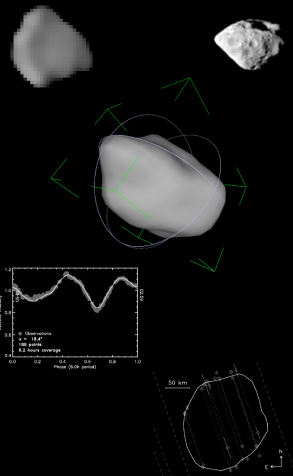
- d'images du disque apparent
- de courbes de lumière
- d'occultations stellaires

2. Hypothèses :

- Albédo uniforme
- Forme générale (convexe & **concave**)

3. Erreurs systématiques

- Taille **non-biaisée**
- Précise à **5%** ($0.1'' \leq \phi$)
- Spin **non-biaisé**
- Forme **au cas par cas**



4. Carry et al. [2009], Kaasalainen [2009]

KOALA : conclusions

1. Inversion **simultanée**

- d'images du disque apparent
- de courbes de lumière
- d'occultations stellaires

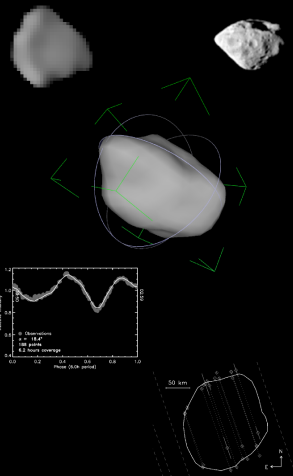
2. Hypothèses :

- Albédo uniforme
- Forme générale (convexe & **concave**)

3. Erreurs systématiques

- Taille **non-biaisée**
- Précise à **5%** ($0.1'' \leq \phi$)
- Spin **non-biaisé**
- Forme **au cas par cas**

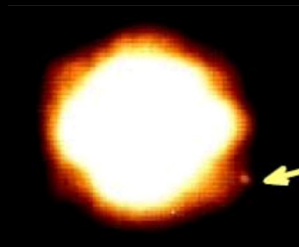
4. Carry et al. [2009], Kaasalainen [2009]



(41) Daphne : Conclusions

1. Densité de (41) Daphne

- Satellite \Rightarrow Masse
 $6.31 \pm 0.11 \times 10^{18} \text{ kg}$
- Forme & Taille \Rightarrow Volume
 $3.25 \pm 0.18 \times 10^{15} \text{ m}^3$
- Densité $\rho = 1.9 \pm 0.1 \text{ g/cc}$



2. Vue plus générale

- $\rho_{41} > \rho_{\text{C-type}}$
- **Compaction** par cratères ?
- **Statistique** de densité & forme



1. Étude des systèmes planétaires
2. Observations des propriétés physiques
3. La planète naine (1) Cérès
4. L'astéroïde basaltique (4) Vesta
5. Une méthode originale : KOALA
6. Projets en cours et conclusions

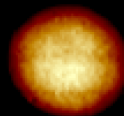
Conclusions

- Astéroïdes comme traceurs de formation
 - ▶ Passage obligé par propriétés physiques
 - ▶ E.g. Cérès (hydraté) et Vesta (sec)
 - ▶ Nouvelle méthode pour irréguliers
- Imagerie à haute résolution angulaire
 - ▶ Moyen **direct** et **efficace** pour propriétés physiques
 - ▶ **Densité** (1) Cérès, (2) Pallas et (41) Daphne
 - ▶ **Cartes albédo** (1) Cérès & (2) Pallas
 - ▶ **Base** de contraintes sur composition
- Spectro-imagerie permet étude plus détaillée (minéralogie)
 - ▶ **Astéroïdes hétérogènes** (Vesta)
 - ▶ **Systèmes multiples** (Haumea)

Projets en cours & perspectives

- Une étude extensive de (1) Cérès
 - ▶ Recherche d'exosphère (UVES/ESO)
 - ▶ Spectro-imagerie (SINFONI/ESO)
- L'étude par KOALA des astéroïdes
 - ▶ (52) Europa & (21) Lutetia
 - ▶ Survey des propriétés physiques
 1. Densité \Rightarrow composition
 2. Support mission Gaia (DPAC)
- Amélioration de KOALA
 - ▶ Coordination amateurs (LC & Occ)
 - ▶ Large Program @ ESO pour imagerie
 - ▶ Nouvelles sources de données

2007 Nov 13 - 03:07 UT

SEP: [118, +3]
SSP: [120, +1]
Pn: 339

Cérès



(21) Lutetia

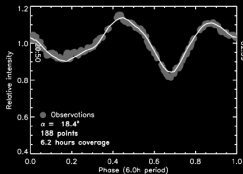


KOALA

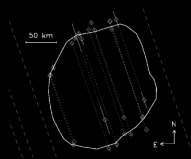
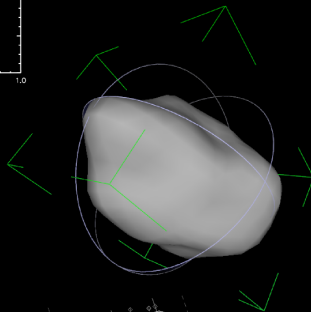
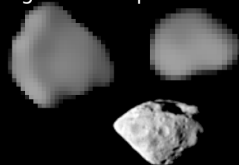


Prochaine étape : KOALA v2.0

Courbes de lumière



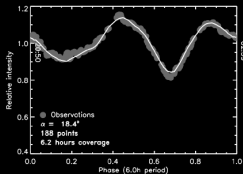
Images du disque résolu



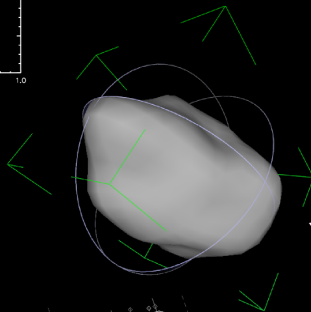
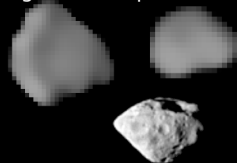
Occultations stellaires

Prochaine étape : KOALA v2.0

Courbes de lumière

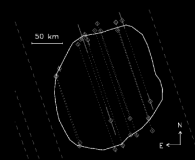
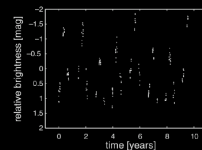


Images du disque résolu



Mesure **indirecte**
Forme
Spin

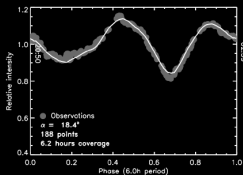
Photométrie éparse



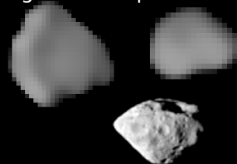
Occultations stellaires

Prochaine étape : KOALA v2.0

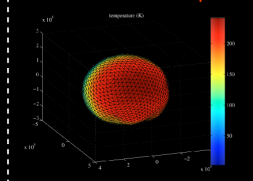
Courbes de lumière



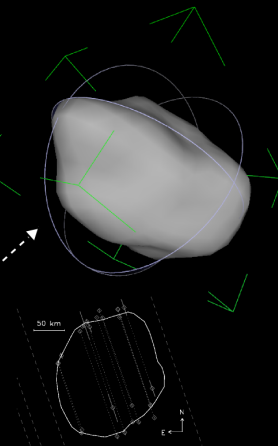
Images du disque résolu



Mesures thermiques

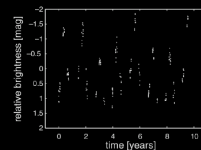


Mesure **indirecte**
 Taille
 Spin



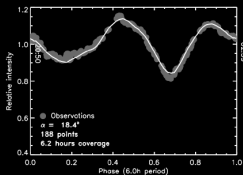
Occultations stellaires

Photométrie éparse



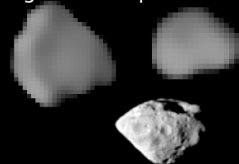
Prochaine étape : KOALA v2.0

Courbes de lumière

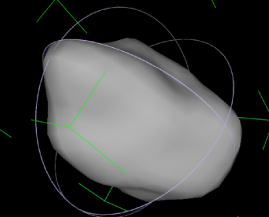
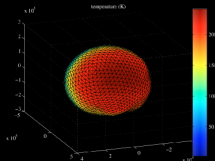


Radar
Interférométrie
...

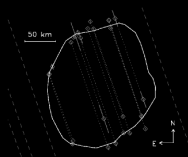
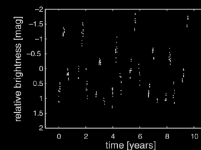
Images du disque résolu



Mesures thermiques



Photométrie éparse



Occultations stellaires

Merci



à Paranal...