

Étude de Systèmes Binaires de Trans-Neptuniens

Simulations de problèmes à N corps non sphériques

Victor Lanvin
Encadré par Nicolas Rambaux

28 Juin 2017



IMCCE, Observatoire de Paris

Le problème

- Plus de 1500 objets trans-Neptuniens découverts (+10/an)¹
- Étude fondamentale pour comprendre la formation du système solaire²

¹IAU Minor Planet Center

²Margot et al. 2015

Le problème

- Plus de 1500 objets trans-Neptuniens découverts (+10/an)¹
- Étude fondamentale pour comprendre la formation du système solaire²
- Leur composition influence leur forme

⇒ On cherche la possibilité d'existence d'une signature dans leur mouvement orbital

¹IAU Minor Planet Center

²Margot et al. 2015

Déroulement de l'étude

Trois axes principaux :

- Adaptation et implémentation du formalisme basé sur la mécanique quantique
- Tests de validité des simulations (et du formalisme)
- Applications à un système connu

Déroulement de l'étude

Trois axes principaux :

- Adaptation et implémentation du formalisme basé sur la mécanique quantique
- Tests de validité des simulations (et du formalisme)
- Applications à un système connu

Développement incrémental !

Outline

- 1 Introduction
- 2 Problème à N corps non sphériques
- 3 Étude du système Quaoar-Weywot
- 4 Conclusion

Outline

- 1 Introduction
- 2 **Problème à N corps non sphériques**
- 3 Étude du système Quaoar-Weywot
- 4 Conclusion

Pourquoi ?

Les corps trans-Neptuniens ont une vitesse de rotation élevée (période de quelques heures).

Pourquoi ?

Les corps trans-Neptuniens ont une vitesse de rotation élevée (période de quelques heures).

⇒ Aplatissement aux pôles par force centrifuge.

Pourquoi ?

Les corps trans-Neptuniens ont une vitesse de rotation élevée (période de quelques heures).

⇒ Aplatissement aux pôles par force centrifuge.

L'aplatissement dépend de leur répartition de densité et de leur composition.

Pourquoi ?

Les corps trans-Neptuniens ont une vitesse de rotation élevée (période de quelques heures).

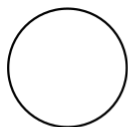
⇒ Aplatissement aux pôles par force centrifuge.

L'aplatissement dépend de leur répartition de densité et de leur composition.

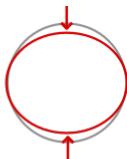
Est-il possible de détecter une signature dans leur orbite ?

Principe

Décomposition du potentiel gravitationnel en harmoniques sphériques



$$C_{0,0} \times Y_{0,0}(\theta, \phi)$$



$$\begin{aligned}
 &+C_{2,0} \times Y_{2,0}(\theta, \phi) \\
 &+C_{4,0} \times Y_{4,0}(\theta, \phi) \\
 &+\dots
 \end{aligned}$$

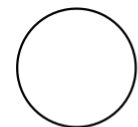
Asymétrie = harmoniques
impaires $C_{1,0}, \dots$

Symétrie triaxiale = termes
couplés $C_{2,2}, \dots$

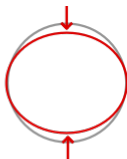
Figure: Potentiels et harmoniques sphériques

Principe

Décomposition du potentiel gravitationnel en harmoniques sphériques



$$C_{0,0} \times Y_{0,0}(\theta, \phi)$$



$$+C_{2,0} \times Y_{2,0}(\theta, \phi)$$

$$+C_{4,0} \times Y_{4,0}(\theta, \phi)$$

$$+\dots$$

Asymétrie = harmoniques
impaires $C_{1,0}, \dots$

Symétrie triaxiale = termes
couplés $C_{2,2}, \dots$

Figure: Potentiels et harmoniques sphériques

→ Utilisation des opérateurs quantiques usuels (gradient, moment cinétique, ...)

Comment le tester ?

On a fixé la vitesse de rotation des corps \implies énergie non constante !

Comment le tester ?

On a fixé la vitesse de rotation des corps \implies énergie non constante !

Plusieurs possibilités :

- Étude du système à l'ordre 0 (normalement équivalent au cas ponctuel)
- Stabilité par rotation du système, 3ème loi de Newton, ...

Comment le tester ?

On a fixé la vitesse de rotation des corps \implies énergie non constante !

Plusieurs possibilités :

- Étude du système à l'ordre 0 (normalement équivalent au cas ponctuel)
- Stabilité par rotation du système, 3ème loi de Newton, ...
- Étude d'orbites particulières et connues

Validité

On sait exprimer la perturbation à long terme d'une orbite (mettant en jeu deux corps) due à l'aplatissement d'un corps³.

$$\frac{d\omega}{dt} \propto C_{2,0} \left(\frac{5}{4} \sin^2 i - 1 \right)$$

³Duriez, 2002

Validité

On sait exprimer la perturbation à long terme d'une orbite (mettant en jeu deux corps) due à l'aplatissement d'un corps³.

$$\frac{d\omega}{dt} \propto C_{2,0} \left(\frac{5}{4} \sin^2 i - 1 \right)$$

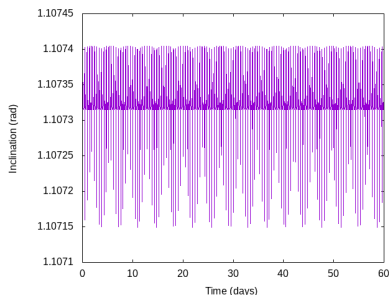
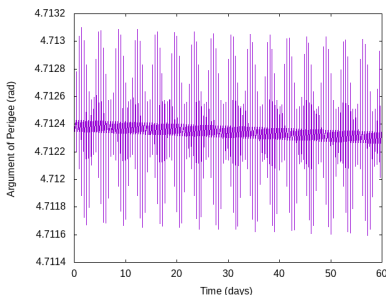


Figure: Variations de ω et i pour un satellite en orbite de Molniya

³Duriez, 2002

Outline

- 1 Introduction
- 2 Problème à N corps non sphériques
- 3 Étude du système Quaoar-Weywot**
- 4 Conclusion

Hypothèses et modèles (1)

Quaoar = trans-Neptunien découvert en 2002⁴, moitié moins grand que Pluton. Possède une lune, Weywot.

⁴Braga-Ribas et al. 2013

Hypothèses et modèles (1)

Quaoar = trans-Neptunien découvert en 2002⁴, moitié moins grand que Pluton. Possède une lune, Weywot.

On suppose les vitesses de rotation fixées (~ 8 h pour Quaoar) et Weywot en rotation synchrone.

On obtient des paramètres orbitaux à partir d'observations indirectes (occultations)

⁴Braga-Ribas et al. 2013

Hypothèses et modèles (2)

Hypothèse : les TNOs sont composés de glace ($\sim 920 \text{ kg/m}^3$) et de silicates ($\sim 3000 \text{ kg/m}^3$)

Hypothèses et modèles (2)

Hypothèse : les TNOs sont composés de glace ($\sim 920 \text{ kg/m}^3$) et de silicates ($\sim 3000 \text{ kg/m}^3$)

On distingue deux modèles :

- Homogène (glace et silicate répartis de manière homogène)
- Stratifié (noyau de silicate + couche de glace)

Hypothèses et modèles (2)

Hypothèse : les TNOs sont composés de glace ($\sim 920 \text{ kg/m}^3$) et de silicates ($\sim 3000 \text{ kg/m}^3$)

On distingue deux modèles :

- Homogène (glace et silicate répartis de manière homogène)
- Stratifié (noyau de silicate + couche de glace)

On obtient (géophysique) les coefficients $C_{2,0}$, $C_{4,0}$, \dots pour chaque modèle (+ terme couplé $C_{2,2}$ pour Weywot).

Étude du noeud ascendant de Weywot

On s'intéresse au paramètre de l'orbite de Weywot qui semble varier le plus : **la longitude du noeud ascendant, Ω**

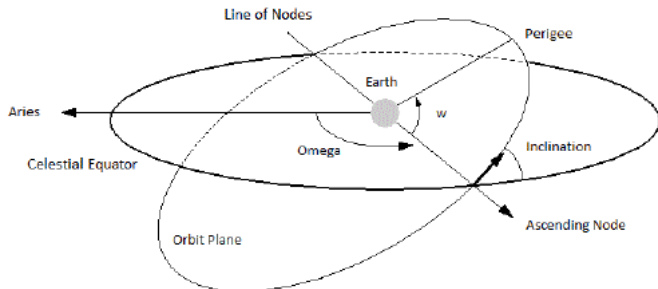


Figure: Longitude du noeud ascendant pour un satellite terrestre⁵

⁵Radicella et al. 2014

Variation rapide

A court terme, on a des variations rapides de Ω

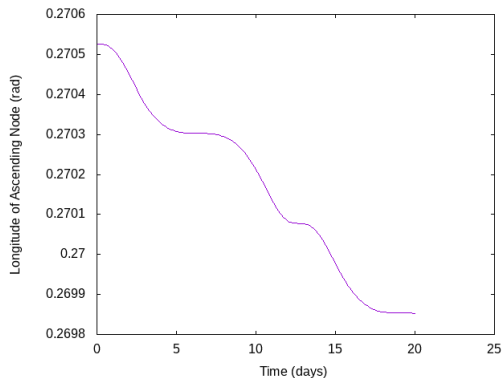


Figure: Variation de Ω sur de faibles périodes

Variation séculaire (1)

A plus long terme, si on compare deux modèles, on a des variations dites “séculaires”

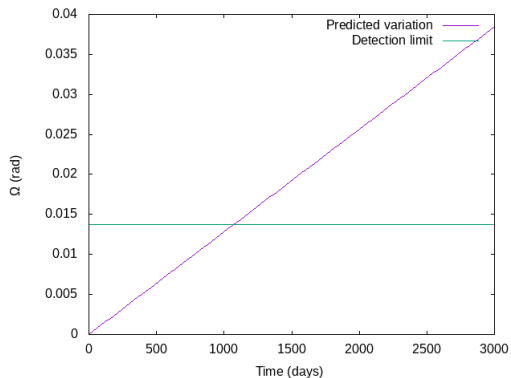


Figure: Variation relative de Ω entre deux modèles

Variation séculaire (2)

Problème : ces variations sont-elles sensibles aux hypothèses ?

Variation séculaire (2)

Problème : ces variations sont-elles sensibles aux hypothèses ?

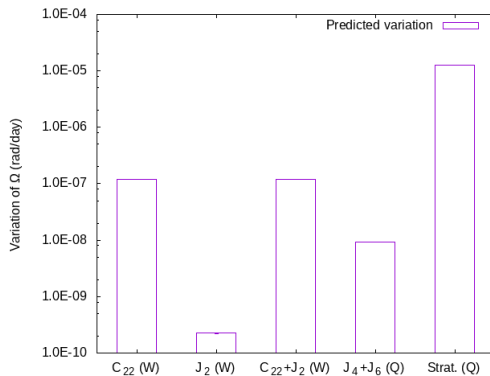


Figure: Comparaison des vitesses de variation de Ω




Conclusion

- Système valide, fiable et performant
- Possible signature permettant de discriminer les modèles de composition des TNOs

Conclusion

- Système valide, fiable et performant
- Possible signature permettant de discriminer les modèles de composition des TNOs
- Quelques travaux futurs :
 - Intégration des orientations (et couples)
 - Vérification des hypothèses de travail
 - Application à d'autres systèmes

Quelques références

-  Wesley C Fraser, Konstantin Batygin, Michael E Brown, and Antonin Bouchez, *The mass, orbit, and tidal evolution of the Quaoar–Weywot system*, *Icarus* **222** (2013), no. 1, 357–363.
-  N Rambaux, F Chambat, and JC Castillo-Rogez, *Third-order development of shape, gravity, and moment of inertia for highly flattened celestial bodies. application to ceres*, *Astronomy & Astrophysics* **584** (2015), A127.
-  Dmitriř Aleksandrovich Varshalovich, Anatolij Nikolaevič Moskalev, and Valerii Kel'manovich Khersonskii, *Quantum theory of angular momentum*, World scientific, 1988.