

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique : V- Les mouvements perturbés

Georges Patrel, Observatoire de Lyon

Résumé: *Dans ce cours, très bref, nous découvrirons les succès, les difficultés résolues et enfin les impossibilités plus fondamentales de la mécanique de Newton. Les difficultés proviennent de la portée infinie de l'attraction gravitationnelle, qui oblige à prendre en compte, en principe, toutes les masses pour calculer la trajectoire d'une seule d'entre elles.*

Introduction

Nous avons rencontré, lors des cours précédents, différentes lois physiques qui semblent gouverner le monde céleste, et même le monde tout court. Après Newton, il a semblé que tout pouvait être expliqué par quelques lois de mécanique, en l'occurrence les trois lois fondamentales du mouvement, plus l'expression de l'attraction universelle. Nous ferons un petit rappel de ces lois. Nous mettrons en lumière quelques-unes de leurs propriétés qui déboucheront sur des conséquences embarrassantes.

L'application de ces nouvelles lois de la mécanique n'était pas toujours facile. Les calculs étaient d'une telle complexité que parfois certains astronomes doutèrent de la validité de certaines lois. Pourtant, à force d'acharnement et d'habileté mathématique, tout parut valider ces lois newtoniennes. Les succès furent nombreux et brillants. Mais bientôt, quelques failles apparurent, qui obligèrent à une révision bouleversante.

Les lois de Newton

Nous avons déjà parlé des lois que Newton avait mises à la base de sa mécanique. Elles étaient au nombre de trois. Nous les rappelons :

Première loi : La Loi d'inertie. En l'absence de force extérieure, la quantité de mouvement (produit de la masse par la vitesse) d'un système demeure constante.

Deuxième loi : Relation fondamentale de la dynamique. Si une force agit sur un corps, le corps

accélère dans la direction de la force, sa quantité de mouvement changeant proportionnellement à cette force.

Troisième loi : Loi de la réaction. Les forces sont toujours mutuelles. Si un corps exerce une force sur un autre corps, ce dernier réagit sur le premier avec une force égale et opposée.

Newton, pour comprendre le mouvement de la Lune et retrouver les lois de Kepler, a dû postuler, en plus, que tous les corps s'attiraient mutuellement en raison inverse du carré de leur distance et proportionnellement au produit de leur masse. C'est la fameuse loi d'attraction universelle. Par des considérations cinématiques, Newton est parvenu à calculer l'accélération produite sur un corps par une force perpendiculaire à la direction de sa vitesse (voir le cours III du CC106).

Ces trois lois faisaient intervenir les concepts précis de "force", "quantité de mouvement" et "masse". La loi d'inertie de Galilée pouvait s'exprimer à partir de ce concept nouveau de quantité de mouvement. Deux de ces quantités, la masse et la quantité de mouvement, se conservent (demeurent constantes) malgré l'évolution du système :

La masse, qui mesure la quantité de matière d'un corps, se conserve. Ce n'est pas une notion aussi évidente que ce que l'on pourrait penser. On peut l'expérimenter avec un enfant qui pensera que la quantité de pâte à modeler dépend de la forme. Nous verrons bientôt, que cette notion de

conservation de la masse a été englobée dans une notion encore plus générale, celle de la conservation de l'énergie, par la célèbre relation d'Einstein $E=mc^2$.

La quantité de mouvement est une notion encore plus abstraite : le produit d'une masse par une vitesse ! Pourtant nous pouvons essayer d'imaginer une situation où cette loi peut se "ressentir". Imaginez que vous êtes sur une surface parfaitement glacée, sans frottement. Si vous poussez une personne, de même masse que vous, vous reculerez, chacun dans des directions opposées, avec une vitesse égale. Si au lieu de pousser une personne vous poussiez un mammouth (je dis mammouth plutôt qu'éléphant, à cause du sol gelé !) vous reculerez à grande vitesse alors que le mammouth resterait presque immobile. C'est la loi de la conservation de la quantité de mouvement.

Origine des lois de conservation

La mathématicienne Emmy Noether montra, par des considérations très générales, que ces lois de conservation résultent de propriétés de l'espace et du temps. La démonstration sort du propos de ce cours élémentaire, mais il est important de connaître l'origine profonde de ces lois qui nous gouvernent.



crédits : www.agnesscott.edu
Emmy Noether 1882-1935

La conservation de l'énergie (et indirectement de la masse) est liée au fait que le temps s'écoule de manière uniforme. N'importe quel instant peut servir d'origine. C'est l'uniformité du temps.

La conservation de la quantité de mouvement est liée au fait que tous les points de l'espace sont équivalents. N'importe quel point peut servir d'origine des positions. C'est l'homogénéité de l'espace.

Il existe une autre loi de conservation, applicable pour les systèmes en rotation, c'est ce qu'on appelle la conservation du moment cinétique et qui est liée

au fait que toutes les directions sont équivalentes. C'est l'isotropie de l'espace.

Quelques propriétés gênantes des lois de la mécanique

La loi de la gravitation universelle et la conservation de la quantité de mouvement avaient des propriétés qui portaient en elles des complications insoupçonnées.

L'expression même de la loi d'attraction universelle montre que si la distance entre les corps est nulle, la force d'attraction devient infinie. C'est une difficulté pour la microphysique mais pas pour l'astrophysique dont nous allons parler. C'est au contraire à l'opposé, quand la distance devient infinie, que nous rencontrerons des problèmes. La force tend vers zéro, mais il n'y a pas de limite à la portée de cette attraction. Tous les corps de l'univers agissent les uns sur les autres. Le moindre déplacement d'une masse quelque part dans l'univers doit, en principe, retentir sur tous les autres corps. Si par exemple je me déplace dans mon bureau, en toute rigueur la trajectoire des planètes doit en être modifiée. Evidemment, ma faible masse, comparée à celle des planètes, rend mon influence infime, mais pas nulle.

La conservation de la quantité de mouvement pose également un problème dans la définition du repère de référence. Expliquons un peu plus en détail. Tant que l'homme se croyait sur une Terre immobile, au centre de l'univers, il n'y avait pas de problème. Mais du fait de la conservation de la quantité de mouvement, la réalité est que le Soleil et la Terre tournent tous deux autour du centre de gravité commun. Si la Terre se déplace un peu, elle induit un petit déplacement du Soleil. La Lune en "tournant autour de la Terre" induit un petit mouvement à la Terre. Le plan de l'écliptique, ce plan si important pour les observations, n'est donc pas exactement le plan défini par l'orbite de la Terre, mais par celui, moins directement accessible, de l'orbite du couple Terre-Lune.

Notons que cette particularité a été mise à profit par M. Mayor et D. Queloz, pour réaliser la première détection de planètes extrasolaires (exoplanètes), en mesurant, pour des étoiles proches, les petits déplacements périodiques induits par ces planètes invisibles.

Les succès de la mécanique de Newton

Les premières analyses détaillées furent appliquées au mouvement de la Lune et aux planètes. La

trajectoire de chaque planète étant définie par les différents paramètres qui la caractérisent (voir le cours précédent), il était possible de prévoir précisément les positions de chacune d'elles, à tous moments.

En 1790, l'orbite de la planète d'Uranus fut calculée avec précision par Delambre. Cette planète, découverte par hasard neuf ans plus tôt par W. Herschell, ne semblait pas suivre exactement les prédictions. Les perturbations causées par Jupiter et Saturne n'expliquaient pas les écarts. Vers les années 1840, les désaccords entre observation et prédiction étaient de l'ordre de 2', donc très significatifs. Un jeune étudiant anglais, J.C. Adams, proposa que le désaccord provenait d'une perturbation par une planète inconnue, orbitant au-delà de l'orbite d'Uranus. Il calcula la position de cette hypothétique planète et alla voir son professeur, Sir G. Airy. Celui-ci n'accorda aucun crédit à cette prédiction. Un an plus tard, un astronome connu, Le Verrier, fit le même calcul que celui d'Adams et obtint une prédiction similaire. L'observation fut faite. La planète nouvelle fut découverte. Elle fut appelée Neptune. Airy remarqua que la prédiction de son étudiant, un an avant celle de Le Verrier, était correcte. Il eut l'honnêteté de le faire savoir, au risque de se discréditer. Justice fut ainsi rendue au jeune étudiant.

Les mesures qui ne rentrent pas dans le rang

La planète Mercure, la plus proche du Soleil, montrait un curieux phénomène. Le grand axe de son orbite dérivait de 574" par siècle ; il devait s'agir des perturbations des autres planètes. Les corrections étant faites, il restait encore une petite anomalie de 43" par siècle, les perturbations connues expliquant, à elles seules, 531"/siècle.

La première idée fut qu'une planète nouvelle devait exister, très proche du Soleil, qui pourrait expliquer les 43"/siècle. Cette mystérieuse planète reçut même un nom : Vulcain, dieu des Enfers. Mais cette planète ne fut jamais observée. Quand Einstein développa sa théorie de la Relativité Générale, il pensa que l'anomalie de Mercure s'expliquerait simplement par les nouvelles lois. En effet, Mercure est très près du Soleil. Le champ de gravitation y est très intense, et c'est là justement que les nouvelles lois devaient montrer une différence par rapport à la mécanique de Newton. Einstein fit le calcul de la correction impliquée par sa nouvelle mécanique. Le résultat était étonnant :

43"/siècle. Non seulement, il n'y avait plus besoin de Vulcain, mais une telle planète était même exclue.

Les faits à jamais inexpliqués

La portée infinie de l'attraction gravitationnelle pose un nouveau problème. Si on considère les petites planètes, ce qu'on appelle aussi les astéroïdes, les perturbations causées par l'ensemble des masses du système solaire peuvent devenir grandes, mêmes celles provenant de petites masses encore inconnues.

En d'autres termes, il devient impossible de prédire les positions des petites planètes. Dans le détail ultime, la trajectoire d'un corps céleste quelconque obéit à une trajectoire imprévisible.

A courte échéance, il est possible de prendre en compte les effets principaux, ceux résultant des grosses planètes mais aussi ceux produits par les petites planètes déjà identifiées. Mais au-delà d'un certain temps, les petites perturbations encore inconnues peuvent modifier suffisamment les positions, pour rendre impossible toute prédiction. Il n'est pas possible de connaître la trajectoire d'une planète avec une précision infinie. Dans le détail, les trajectoires planétaires sont dites chaotiques.

Pour les corps de petite taille, l'incertitude est très grande. C'est le cas par exemple de l'astéroïde "Toutatis", qui passe tous les quatre ans à proximité de la Terre et qui pourrait un jour la percuter. Nous proposons un exercice (voir l'article suivant) dans lequel nous essayons d'évaluer l'ampleur du séisme que provoquerait la collision de Toutatis avec la Terre. Le résultat est un peu effrayant, même si la probabilité de rencontre est faible.

Nos ancêtres les Gaulois avaient bien raison de se méfier ...

■ ERRATA

Dans le précédent Cours (CC108) nous avons commis deux erreurs, que nous avons oublié de corriger, en dépit de leur détection par P. Causeret :

Page 7, colonne 1, ligne 1 : En hiver, les jours solaires vrais sont plus longs que les jours solaires moyens. En effet, le Soleil vrai avançant plus vite sur l'écliptique, il faut plus de temps pour que la rotation de la Terre sur elle-même nous fasse retrouver le Soleil au méridien.

Page 8 (encadré) : sur la figure, il faut lire périhélie (ou plus généralement périastre) et non aphélie.

Avec nos excuses pour cet oubli.