Physique pour tous

Séance 1 - Physique Newtonienne

Lior Benizri, Joaquin Bermejo, Baptiste Coquinot

Septembre 2023

École Normale Supérieure de Paris

Motivation au cours

Les poètes disent que la science ternit quelque peu la beauté des étoiles – de simples amas d'atome de gaz. Rien n'est "simple". Je peux, moi aussi, voir les étoiles la nuit dans le désert, et en éprouver une sensation. Mais en vois-je moins ou plus ? L'immense voûte céleste exalte mon imagination – fixé sur ce carrousel mon petit œil peut saisir de la lumière vieille d'un million d'années. Une vaste structure – dont je suis part- peut-être même la matière dont je suis fait, fut issue de certaines étoiles oubliées comme celle qui est en train de rayonner là. (...) Quelle est la structure, ou la signification, ou le pourquoi ? Cela ne fait point de mal au mystère d'en connaître un petit peu sur lui. Car la vérité est bien plus merveilleuse que ce que les artistes ont imaginé par le passé. Pourquoi les poètes du présent n'en parlent-ils pas ? Quels hommes sont ces poètes qui peuvent parler de Jupiter lorsqu'il prenait la forme d'un homme mais qui se taisent si c'est une immense sphère de méthane et d'ammoniac en rotation ?

– R.P. Feynman

Préambule

- Notre approche : en un mot, **historico-constructive**.
- Q : Pourquoi parler d'histoire ? Et de physique newtonienne ?
- R0 : Parce que c'est le plus pertinent pour nous vies et le plus simple.
- R1 : Préparer le terrain pour la suite.
- R2 : Pour apprendre à *penser en physicien* ! Dans les mots de Newton :

  If have seen further, it is by standing on the shoulders of Giants.

J’exhorte l’audience à poser des questions.

Posez des questions !

Aujourd'hui

1. Les lois de Newton
    - Le Monde aristotélicien
    - La Rupture galiléenne
    - Mouvement naturel et Référentiels
    - Modéliser les forces
2. Symétries et lois de conservation
    - De quoi s'agit-il ?
    - Pourquoi est-ce important ?
    - Comment exploiter ces idées dans la pratique ?
3. Gravitation Universelle
    - D'une pomme à la Lune
    - Modéliser la Gravitation
    - Lois de Kepler
    - Mécanique Céleste

Le monde selon Aristote

- Le paradigme pré-révolution scientifique suit de près le schéma aristotélicien.
- Le monde est schizophrène : opposition entre sublunaire imparfait et supralunaire incorruptible.
- A priori, aucune raison de supposer que les lois physique sont les mêmes partout dans l'Univers.
- La structure du monde présente une symétrie sphérique, avec la Terre au centre.
- Le mouvement naturel suit la structure du monde sphérique : vers le haut, vers le bas, ou circulaire.
- Conception relationniste de l'espace-temps.

Du Aristote dans le texte

Il est de toute nécessité qu'il existe un corps simple dont la nature soit de se mouvoir selon la translation circulaire, conformément à sa propre nature... En dehors des corps qui nous entourent ici-bas, il existe un autre corps, séparé d'eux, et possédant une nature d'autant plus noble qu'il est plus éloigné de ceux de notre monde.

– Traité du Ciel, Chapitre XIV, Livre II.
Traduction de Jules Barthélémy Saint-Hilaire.

La révolution scientifique

Les vraies révolutions sont toujours lentes et jamais sanglantes.

Petit Bitos, Jean Anouilh

Q : Qu'est-ce qui rend possible cette révolution ?

- Développement des méthodes expérimentales (catalogue d'observations de Tycho Brahé, lunette astronomique de Galilée).
- Remise en cause la centralité de la Terre : héliocentrisme (Copernic), lunes de Jupiter, cratère sur la Lune et tâches solaires (Galilée).
- Développement d'une méthode scientifique hypothético-déductive (GG).
- Affaissement de la distinction entre monde sublunaire et supralunaire : Galilée consacre l'universalité des lois physiques.
- Expérience de pensée (GG) : jet d'une pierre de la Terre vers la Lune.

Obsolescence des lois du mouvement

- Le schéma aristotélicien n'est plus applicable, dès lors que l'héliocentrisme se vérifie.
- Il faut construire une nouvelle cinématique.
- Galilée développe une théorie dans laquelle le mouvement naturel est circulaire, autour de la terre.
- Il s'appuie sur ses expériences avec les plans inclinés.
- Dans une certaine mesure, on peut dire qu'il ne se libère pas entièrement du paradigme aristotélicien : persistence de l'idée selon laquelle ces deux mondes obéissent à des lois *différentes*.
- C'est alors que le Roi Lion entre en scène.

Les lois de Newton

Le Roi Lion entre en scène

Première Loi

Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état.

- Autrement dit, le mouvement naturel et **universel** est le MRU ! Universel en ce qu'il est le même partout dans l'Univers et ne dépend pas du corps considéré.
- Notez que là où Aristote prescrit un mouvement naturel, Newton affirme la tendance des corps à maintenir leur état de mouvement : c'est le *principe d'inertie*.
- Problème : Mouvement rectiligne uniforme par rapport à quoi ?
- Avec sa première loi, Newton appose une structure spatio-temporelle absolue au monde.

L’arène spatio-temporelle

- L’espace exhibe une structure d’espace euclidien tridimensionnel qui persiste dans le temps.
- Le temps présente une structure d’espace métrique unidimensionnel.
- Newton distingue ainsi des concepts d’espace et de temps relatifs, perceptibles par nos sens, et des concepts d’espace et de temps absolus qui entrent dans les lois du mouvement.
- Ceci n’a pas d’incidence pratique puisque les lois physiques sont vectorielles.

Pour Lebinitz, la matière précède l’espace-temps.

Pour Newton, l’espace-temps précède la matière.

Du Newton dans le texte

Comme les parties de l'espace ne peuvent être vues ni distinguées les unes des autres par nos sens, nous y suppléons par des mesures sensibles. Ainsi, nous déterminons les lieux par les positions et les distances à quelque corps que nous regardons comme immobile, et nous mesurons ensuite les mouvements des corps par rapport à des lieux ainsi déterminés ; il est à propos d'en user ainsi dans la vie civile ; mais dans les matières philosophiques, il faut faire abstraction des sens ; car il se peut faire qu'il n'y aucun corps véritablement en repos, auquel on puisse rapporter les lieux et les mouvements.

– Philosophiæ Naturalis Principa Mathematica, page 10
Traduction de l'édition de 1726 par la marquise du Châtelet

Dynamique

A présent, il faut deviser des lois dynamiques, i.e. qui rendent compte de la modification de ce mouvement naturel sous une action extérieure.

Deuxième Loi

Les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice ; et se font dans la ligne droite dans laquelle cette force a été imprimée.

$$\vec{F} = m_I \cdot \vec{a}$$

La constante de proportionnalité, appelée masse inertielle, dépend du corps considéré.

Il faut comprendre qu'il est ici question de l'accélération *absolue*. De plus, la notion de force n'est définie qu'à travers la relation ci-haut. Si son contenu qualitatif est véritablement conceptuel (les forces sont des vecteurs !), son contenu quantitatif est définitionnel.

Référentiels

Référentiel

Un référentiel est défini par un ensemble hypothétique rigide de règles et d'horologes en mouvement dans l'espace-temps absolu. Il s'agit d'un repère par rapport auquel on peut effectuer des mesures relatives.

Un réferentiel est dit inertiel s'il est au repos ou en MRU par rapport à l'espace absolu. Dans un référentiel inertiel, les lois de Newton s'appliquent telles qu'elles.

Exemples : Un quai de gare, une fusée, le centre de la galaxie, ... Dans la pratique, on travaille dans des repères orthonormés qui sont de très bonnes approximations à un référentiel inertiel.

Lorsque le référentiel n'est pas inertiel, e.g. la Terre, une voiture dans un rond point, un bus qui ralentit, les lois de Newton sont modifiées : il faut prendre en compte des *pseudo-forces*.

Relativité Galiléenne

Principe de Relativité

Les lois physiques sont identiques dans tous les référentiels inertiels.

C'est l'un des principes fondamentaux de la physique : il servira de socle aux théories Einsteiniennes.

- Illustration : Giordano Bruno sur le bateau.
- Mise en équations :

$$\begin{cases} \vec{x}' = \vec{x} - \vec{v}t \\ t' = t \end{cases}$$

- Caractère absolu du temps $\Rightarrow$ Loi d'addition des vitesses :

$$\vec{v}_{tot} = \vec{v}_R + \vec{w}_{\mathcal{R}'/\mathcal{R}}$$

Troisième Loi

L'action est toujours égale à la réaction ; c'est-à-dire que les actions de deux corps l'un sur l'autre sont toujours égales et de sens contraires.

Applications

1. Calculer la vitesse d'un ballon.
2. Calculer la quantité de carburant nécessaire pour aller sur la Lune.

Symétries et lois de conservation

Symétries

- Une symétrie est une transformation qui laisse un système physique invariant.
- De plusieurs types : algébriques, géométriques, etc.

Figure 1 – Tout à gauche, le Taj Mahal. Au centre, une fleur et à droite, l'hôtel de ville de Bruxelles.

Symétries physiques

- Uniformité du temps : les lois physiques sont invariantes sous les translations dans le temps $t \mapsto t + a$.
- Homogénéité de l'espace : les lois physiques sont invariantes sous les translations dans l'espace $\vec{x} \mapsto \vec{x} + \vec{a}$.
- Isotropie de l'espace : les lois physiques sont invariantes sous les translations dans l'espace $\vec{x} \mapsto \mathcal{R} \cdot \vec{x}$.
- Invariance de phase : les lois physiques sont invariantes sous les changements de phase globale de la fonction d'onde : $\psi \mapsto e^{i\alpha}\psi$.

Amy Noether (1882-1935)

Quel intérêt ? Lien entre symétries et lois de conservation [Noether, 1915].

Lois de conservation

Lois de conservation

Une quantité conservée est une grandeur invariante au cours de l'évolution d'un système physique.

- Un exemple familier : *l'énergie* — pas de production *ex nihilo*, transformation en diverses *formes* plus ou moins utiles.
- Autres exemples : charge électrique, impulsion, moment cinétique,...
- Intérêt :
  - Facilitent la résolution de problèmes.
  - Permettent d'obtenir des informations sur un système, même lorsqu'il n'existe pas de solution *analytique*.
- Peuvent être contextualisées : il y a une énergie cinétique une énergie électrique, une énergie thermique, etc.
- Mais ça n'explique ni l'origine du concept, ni sa conservation.

Théorème de Noether

A toute symétrie d'un système physique correspond une quantité conservée.

Ainsi, dans un système isolé,

1. Uniformité du temps $\rightarrow$ conservation d'une quantité E, qu'on *définit* comme l'énergie.
2. Homogénéité de l'espace $\rightarrow$ conservation d'une quantité $\vec{p}$, l'impulsion.
3. Isotropie de l'espace $\rightarrow$ conservation d'une quantité $\vec{\sigma}$, le moment cinétique.
4. Invariance de phase $\rightarrow$ conservation de la charge électrique.

Énergie

- Bien sûr, le théorème fournit également une définition *quantitative* ! L'énergie est ainsi donnée par :

$$E = T + U$$

  - T est *l'énergie cinétique*, dû au mouvement de l'objet, défini par :

$$T = \sum_i \frac{1}{2} m_i |\vec{v}_i|^2 \overset{c.p.}{=} \frac{1}{2} m |\vec{v}|^2$$

  - U est une *énergie potentielle* : gravitationnelle, électrique, ...

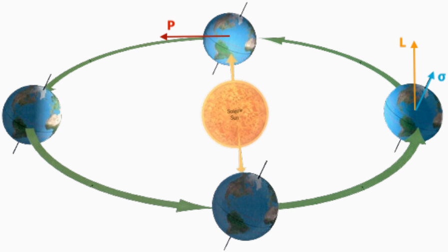
- Et les forces dans tout ça ? C'est une autre approche de la dynamique :

$$F = -\vec{\nabla} U \overset{1D}{=} -\frac{dU}{dx}$$

- Exemple : Corps en chute libre dans un champ gravitationnel.

Impulsion et moment cinétique

- $\vec{P} = \sum_i m_i \vec{v}_i \overset{c.p.}{=} m\vec{v}$
  Bis repetita : ballon, fusée.
- $\vec{\sigma} = \sum_i m_i \vec{r}_i \times \vec{v}_i \overset{c.p.}{=} m\vec{r} \times \vec{v}$.



Théorème

Le moment cinétique d'un corps soumis à un potentiel central est conservé.

Corollaire

Le mouvement d'un corps dans un champ gravitationnel est nécessairement bidimensionnel.

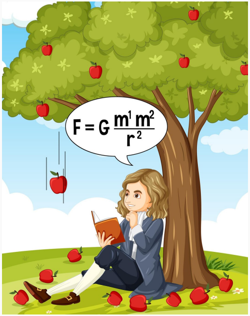
Gravitation Universelle

D’une pomme à la Lune

La légende veut que Newton, assis sous un pommier, voit une pomme tomber. Imaginons-nous sous le pommier. **Nous** allons essayer de dérouler le raisonnement qu’il aurait pu tenir (Lettres à une princesse d’Allemagne).

- ☐ Par les lois de la dynamique, il doit existe une force qui s’exerce sur la pomme et qui est orientée vers le centre de la Terre.
- ■ Mais s’il en est ainsi, que se passe-t-il pour un un arbre *très* haut ?
- ☐ Tous en choeur : Rien ne devrait changer...
- ■ Mais on pourrait alors imaginer un arbre arrivant jusqu’à la lune... Pourquoi la lune ne tombe-t-elle pas ? !

C’est là que réside le génie de Newton : il brise les frontières entre les mondes. La lune obéit aux mêmes lois physique qu’une pomme : les corps célestes sont des corps *quelconques* ! En particulier, la Terre est un *objet physique*.



- On n'a pas répondu à la question : pourquoi ne tombe-t-elle pas ?
- Elle tombe !
- Et pourtant elle tourne !
- Elle a une vitesse tangente à la force qui l'attire/la pousse vers la Terre, d'où le MCU.

Il y a masse et masse I

- ■ Mais, si c'était vrai, rien ne justifierait une asymétrie de *nature* entre Terre et pomme... Les forces *devraient* être réciproques !
- ☐ Et alors ?
- ■ Alors la Terre ne peut évidemment pas se diriger vers toutes les pommes du monde...
- ☐ C'est que la gravitation doit dépendre de la *quantité de matière* contenue dans un corps.
- ■ Quantité de matière ? Tu veux dire la masse inertielle ?
- ☐ Pas nécessairement. Ça pourrait aussi dépendre d'autres propriétés du corps. Appelons-ça la *masse gravitationnelle* μ. On peut supposer que $F \propto \mu_1 \mu_2$, par symétrie.
- ■ De toute façon, ça fait trop de paramètres à ajuster...

Il y a masse et masse II

- ☐ Ne pourrait-on pas prendre deux corps *identiques* et mesurer la force d'attraction pour en déduire μ ?
- ■ Non, cette force est beaucoup trop faible.
- ☐ Eurêka ! Galilée, n'a-t-il pas montré que tous les corps tombent à la même vitesse dans le vide ?
- ■ Si. Et alors ?
- ☐ Alors $F = m_I a$! Donc si $F = \mu \cdot E$, où E est indépendant du corps qui chute, on doit avoir $\frac{\mu}{m} = C^{\text{te}}$.
- ■ Je vois. On peut donc définir $\mu = m_I$, et introduire une unique constante G, à déterminer expérimentalement. C'est fort !

Principe d'équivalence

Il y a égalité entre masse gravitationnelle et masse inertielle.

Modéliser la Gravité III

On va essayer de *modéliser* cette interaction gravitationnelle.

Point de vue des forces :

- $\vec{F}$ est dirigée selon la droite joignant les deux corps : $\vec{F} \propto -e_{\vec{r}}$.
- La force dépend de la masse de chacun des corps : $F \propto m_1 m_2$.
- La force doit dépendre de la distance. Pouvez-vous me dire pourquoi ?
- La relation la plus simple possible est une décroissance en $1/r^k$.
- Dès lors, on s'attend à :

$$\vec{F} = -G\frac{m_1 m_2}{r^k} e_{\vec{r}}$$

Où G est la constante de Cavendish à déterminer expérimentalement.

Modéliser la Gravité IV

Point de vue de l'énergie :

- L'énergie potentielle est une quantité scalaire qui doit dépendre des paramètres du système, en particulier des masses gravitationnelles m_1 et m_2. On suppose donc $U \propto m_1 m_2$
- U ne peut dépendre que de la distance entre les corps, et pas de l'angle que leur axe forme par rapport à un système d'axes fixé, par invariance des lois physique sous les rotations.
- On en déduit une loi de la forme :

$$U = C^{te} \frac{m_1 m_2}{r^l}$$

Comment déterminer k/l ?

Théorème [Bertrand]

Les seules lois admettant des trajectoires fermées sont le potentiel coulombien $U \propto \frac{1}{r}$ et la loi de Hooke $U \propto r^2$.

Loi de la Gravitation Universelle

Loi de gravitation universelle : deux corps quelconques de masse m_1 et m_2 s'attirent selon :

$$U = -G\frac{m_1 m_2}{r}$$
$$\vec{F} = -G\frac{m_1 m_2}{r^2}e_{\vec{r}}$$

Bonus : Dériver les lois de Kepler

Modéliser le système solaire

- Dans notre traitement de la gravitation universelle, on a supposé implicitement que les masses étaient ponctuelles.
- De fait, pour le système Terre-Lune :

	Lune	Soleil
$d_{\oplus -}$ (km)	$384 \cdot 10^3$	$150 \cdot 10^6$
Rayon (km)	1740	$696 \cdot 10^3$
ratios	60	215

- Remarque :

$$\frac{d_{\text{Terre-Lune}}}{R_{lune}} \simeq \frac{384000}{1737} = 221$$

  C'est la proximité de ces nombres qui permet les éclipses solaires.
- Dans le contexte de la mécanique céleste, le volume propre (l'étendue) des objets astronomiques est négligeable.

Problème à deux corps

- Intégrer les équations du mouvement pour un potentiel non-trivial et un système de n points est impossible *en général*.
- Il y a deux exceptions :
    1. Les solides ou corps rigides.
    2. Le cas $n = 2$: C'est le problème à deux corps.
- En particulier, tenir compte des autres planètes du systèmes solaire est infaisable analytiquement *en pratique*. Et puis, pourquoi pas inclure leurs satellites, les comètes, etc ?

$\rightarrow$ Question générale : quel niveau de détail inclure dans un modèle ?

$\rightarrow$ La philosophie est de partir d'un modèle aussi simple que possible, et d'incrémenter la complexité au besoin.

- Ici, la présence des autres planètes du système solaire a une influence négligeable sur le mouvement de la Terre autour du soleil, puisque :

$$\frac{M_\odot}{m_{♃}} \simeq 10^3$$

Réduction du problème

- Pour être rigoureux, il faudrait procéder à la *réduction* du problème à deux corps, pour tenir compte du mouvement du Soleil dû à la gravitation terrestre.
- Cependant, $\frac{M_\odot}{m_\oplus} \sim 10^5$. On supposera donc, pour simplifier, que le Soleil est immobile.
- En réalité, et la Terre et le Soleil orbitent autour du centre de gravité du système, mais la très faible amplitude du mouvement du Soleil justifie notre approximation.
- En outre, la présence des autres planètes a une influence du même ordre de grandeur que celle de la Terre sur le mouvement du Soleil, et on ne peut dès lors tirer d'informations quantitatives sur le mouvement du Soleil de notre étude.

Seconde Loi de Kepler

Mouvement planaire

Le mouvement de la Terre s'effectue dans un plan.

- En effet, $\vec{\sigma} = m\vec{r} \times \vec{v} = \vec{C}^{te} \Rightarrow r$ est contenu dans le plan $\Pi \perp \vec{C^{te}}$.
- De plus, la norme de $\vec{\sigma}$ est également conservée. On a :

$$\sigma = mrv_\theta = mr^2\dot{\theta} = C^{te}$$

Cette équation relie la vitesse angulaire de la planète à la distance qui la sépare du Soleil.

- Or, l'aire balayée par une planète en un intervalle de temps dt est $d\mathcal{A} = \frac{1}{2}r^2 d\theta$. Dès lors,

$$\frac{d\mathcal{A}}{dt} = \frac{\sigma}{2m} = C^{te}$$

Seconde Loi de Kepler

Loi des aires

L'aire balayée par le rayon-vecteur reliant le Soleil à une planète balaie des aires égales en des temps égaux.

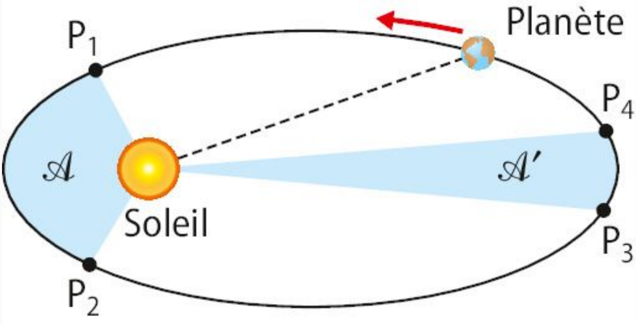


Figure 2 – Loi des aires : L'aire de la surface $\mathcal{A}$ est égale à celle de $\mathcal{A}'$.

Problème effectif

- Conservation de l'énergie :

$$E = \frac{1}{2}m(v_r^2 + v_\theta^2) + U(r) = \frac{1}{2}m(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) + U(r)$$

$$\Rightarrow E = \frac{1}{2}m\left(\dot{r}^2 + \frac{\sigma^2}{m^2 r^2}\right) + U(r)$$

Où $U(r) = -G\frac{M_\odot m_\oplus}{r}$

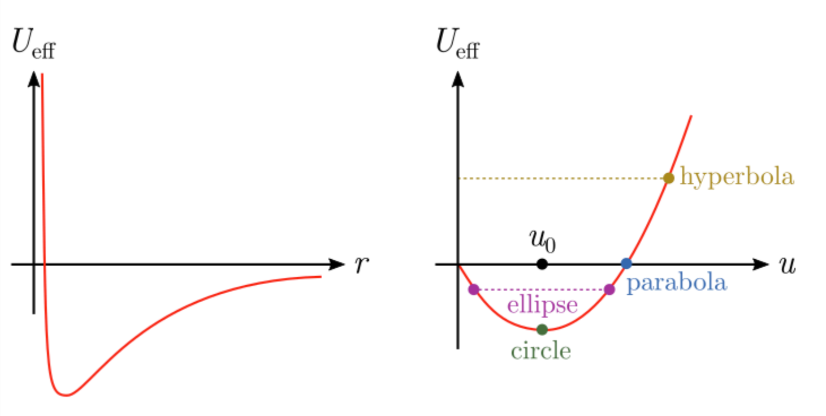
- *Tout se passe comme si* nous avions affaire à une particule en mouvement $1D$ soumise à un potentiel *effectif*

$$U_{eff}(r) = U(r) + \frac{\sigma^2}{2mr^2} \Leftrightarrow \vec{F}_{eff}(r) = \vec{F}_{grav}(r) + \frac{\sigma^2}{mr^3}\vec{e}_r$$

- En inversant les relation (34,34), on obtient :

$$v_r(r) = \frac{dr}{dt} = \sqrt{\frac{2[E - U(r)]}{m} - \frac{\sigma^2}{m^2 r^2}}$$

Graphique de potentiel



Intégrer les équations du mouvement

- *Intégration par quadrature* : (34) donne $t(r)$ *sous forme intégrale*.
- Puis, en écrivant $d\theta = \frac{\sigma}{mr^2} dt$, obtient :

$$\theta(r) = \int \frac{\sigma / r^2}{\sqrt{2m[E - U(r)] - \sigma^2 / r^2}} dr$$

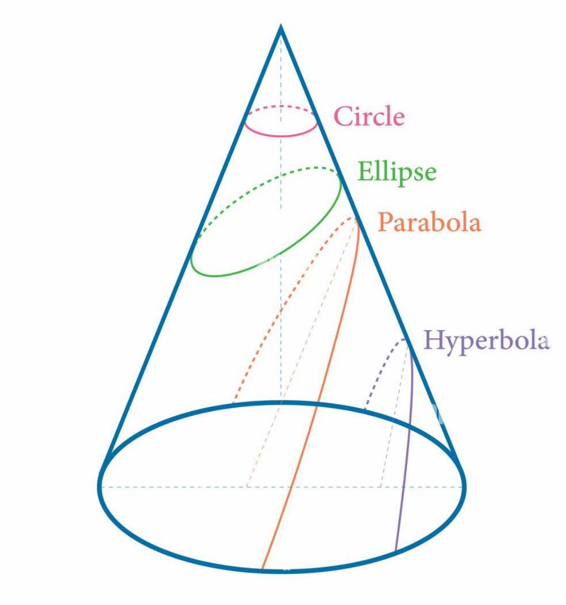
- La solution est donnée par :

$$r = \frac{p}{1 + e \cos \theta}$$

  Où $p = \sigma^2 / GMm^2$ et $e = \sqrt{1 + \frac{2E\sigma^2}{G^2 M^2 m^3}} = \sqrt{1 + E / E_{min}}$.

- Ceci est l'équation d'une conique dont les paramètres peuvent être ajustés aux données :
  - $e > 1 \Leftrightarrow E > 0$: hyperbole.
  - $e = 1 \Leftrightarrow E = 0$: parabole.
  - $e < 1 \Leftrightarrow E < 0$: ellipse (dégénérée en cercle pour $E = E_{min}$).

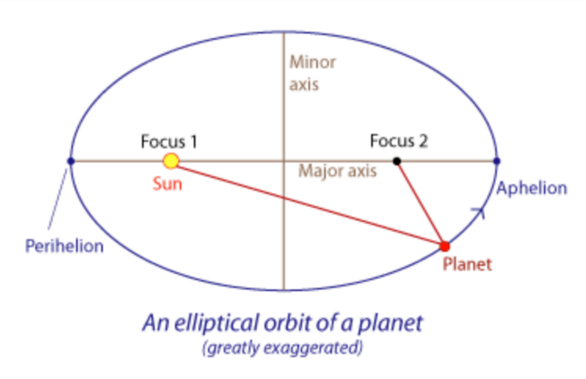
Interlude : Les Coniques



Première Loi de Kepler

Loi des orbites

Les planètes décrivent des orbites elliptiques dont le Soleil occupe l'un des foyers.



Troisième Loi de Kepler

- Intégrant la loi des aires, nous obtenons :

$$\mathcal{A} = \frac{2\sigma T}{m} = \pi ab$$

  où a et b sont les longueurs des axes de l'ellipse.

- Or, $b = \sqrt{p \cdot a}$. Par conséquent :

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{G}} \sqrt{\frac{a^3}{M}}$$

- On en déduit :

$$M = \frac{4\pi^2}{G} \frac{a^3}{T^2}$$

- Conséquence fondamentale : Ayant mesuré G sur Terre (Cavendish, 1798), ainsi que le demi grand-axe a par des observations astronomiques (parallaxe), on peut déterminer la masse du Soleil !
- De façon plus universelle, avec des outils élémentaires, on peut déterminer la masse de tout astre possédant un satellite.

Troisème Loi de Kepler

Loi des périodes

La quantité $\frac{a^3}{T^2}$ est, en excellente approximation, indépendante de la planète considérée. Plus précisément,

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M_\odot + m)$$

Où la masse de la planète $m \ll M_\odot$.

Et un, et deux et trois corps ?

- Le problème à trois corps est *instable* (Poincaré, 1890).
- Il existe une solution analytique, mais pas de forme fermée. On a donc recours à des intégrations numériques des équations.
- La théorie a accumulé les succès : prédiction puis découverte de Neptune par Urbain le Verrier en 1846.
- Au cours du $XIX^{\text{ème}}$, la mécanique céleste est, avec la mécanique des fluides, la préoccupation principale de la physique : étude du problème à trois corps, de la stabilité des orbites (perturbations), etc.
- Cette démarche culmine avec la publication du *Traité de mécanique céleste* de Laplace, entre 1798 et 1825.
- A l'aube du $XX^{\text{ème}}$ siècle, il y a cependant un problème minime dans les observations : l'avance du périhélie de Mercure.

Un mécanisme d'action ?

- Il est évident qu'un corps ne peut agir sur un autre à distance, dans le vide, sans que l'interaction soit médiée par quelque substance.
- C'est là le fameux *Hypotheses non fingo* de Newton, qui préfère éviter la spéculation à outrance.
- La théorie mise en place par Newton décrit la statique de la gravitation, mais pas sa dynamique.
- Mais comme il n'existe pas de mécanisme d'action connu, la force semble instantanée.
- C'est le caractère supposément instantané de la gravitation qui conduira Einstein à étudier la possibilité d'une nouvelle théorie, la relativité générale.

Pour en savoir plus

Quelques suggestions de lecture :

- *The Philosophy of Spacetime*, par T. Maudlin.
- *Les somnambules*, d'A. Koestler.
- *Du Monde Clos à l'Univers infini*, A. Koyré.
- *Feynman's lost lecture*, 3Blue1Brown (Grant Sanderson).
- Sophie Roux, e.g. *Découvrir le principe d'inertie*.
- *To explain the world*, de Steven Weinberg.

Les références techniques :

- Tome I du Landau & Lifshitz.
- *Classical Mechanics*, H. Goldstein.
- *Mathematical Methods of Classical Mechanics*, V. Arnold.
- Le *discorsi* de Galilée.

Merci de nous avoir écoutés !

Teaser