

50

CLÉS POUR COMPRENDRE LA
PHYSIQUE

JOANNE
BAKER

Traduit de l'anglais par Julien Randon-Furling

DUNOD

Table des matières

Introduction 3

MATIÈRE EN MOUVEMENT

- 01 Le principe de Mach 4
- 02 Les lois de Newton 8
- 03 Les lois de Kepler 12
- 04 La gravitation universelle 16
- 05 La conservation de l'énergie 20
- 06 Le mouvement harmonique simple 24
- 07 La loi de Hooke 28
- 08 La loi des gaz parfaits 32
- 09 Le second principe
de la thermodynamique 36
- 10 Le zéro absolu 40
- 11 Le mouvement brownien 44
- 12 La théorie du chaos 48
- 13 L'équation de Bernoulli 52

SUR LES ONDES

- 14 La théorie des couleurs de Newton 56
- 15 Le principe de Huygens 60
- 16 La loi de Snell-Descartes 64
- 17 La loi de Bragg 68
- 18 La diffraction de Fraunhofer 72
- 19 L'effet Doppler 76
- 20 La loi d'Ohm 80
- 21 La règle de la main droite 84
- 22 Les équations de Maxwell 88

ÉNIGMES QUANTIQUES

- 23 La loi de Planck 92
- 24 L'effet photoélectrique 96

- 25 L'équation d'onde de Schrödinger 100
- 26 Le principe d'incertitude 104
- 27 L'interprétation de Copenhague 108
- 28 Le chat de Schrödinger 112
- 29 Le paradoxe EPR 116
- 30 Le principe d'exclusion de Pauli 120
- 31 La supraconductivité 124

ATOMES ATOMISÉS

- 32 L'atome de Rutherford 128
- 33 L'antimatière 132
- 34 La fission nucléaire 136
- 35 La fusion nucléaire 140
- 36 Le modèle standard 144
- 37 Les diagrammes de Feynman 148
- 38 La particule Dieu 152
- 39 La théorie des cordes 156

ESPACE ET TEMPS

- 40 La relativité restreinte 160
- 41 La relativité générale 164
- 42 Les trous noirs 168
- 43 Le paradoxe de Chéseaux-Olbers 172
- 44 La loi de Hubble 176
- 45 Le big bang 180
- 46 L'inflation cosmique 184
- 47 La matière noire 188
- 48 La constante cosmologique 192
- 49 Le paradoxe de Fermi 196
- 50 Le principe anthropique 200

Glossaire 204

Index 206

Introduction

Quand j'ai parlé de ce livre à mes amis, ils m'ont dit en plaisantant que la première chose à savoir absolument en physique est qu'il s'agit d'une discipline difficile. Pourtant, chacun d'entre nous utilise la physique quotidiennement. Lorsque nous nous regardons dans un miroir ou lorsque nous chaussons une paire de lunettes, nous faisons appel à la physique des phénomènes optiques. Quand nous réglons nos réveils, nous sommes à la poursuite du temps ; lorsque nous suivons un itinéraire sur une carte, c'est l'espace géométrique que nous explorons, cependant que nos téléphones portables nous relient à des satellites au-dessus de nos têtes, *via* des fils électromagnétiques invisibles. Mais la physique n'est pas l'apanage de la technologie. Sans la physique, il n'y aurait ni lune, ni arcs-en-ciel, ni diamant. Même le sang qui coule dans nos veines obéit aux lois de la physique, la science du monde physique.

Nombreuses sont les surprises que réserve la physique moderne. La théorie quantique a chamboulé notre monde en interrogeant le concept même de l'existence d'un objet. La cosmologie cherche à connaître l'univers : comment est-il apparu et pourquoi sommes-nous là ? Notre univers est-il tout à fait singulier ou était-il, en quelque sorte, inévitable ? En scrutant l'intérieur des atomes, les physiciens ont découvert tout un monde fantomatique de particules élémentaires. Et la table d'ébène la plus solide qui soit n'en demeure pas moins constituée essentiellement de vide, ses atomes reposant sur un échafaudage de forces nucléaires. La physique est née de la philosophie et, d'une certaine manière, elle y revient, en produisant des représentations nouvelles et inattendues qui dépassent notre vécu.

Cependant, la physique n'est pas une simple collection d'idées originales et pleines d'imagination. Elle s'ancre dans le réel et l'expérience. La méthode scientifique permet de mettre à jour continuellement les lois de la physique, comme on le fait pour les logiciels, en résolvant les bogues et en ajoutant de nouveaux modules. Si les preuves sont là, des changements majeurs de perspective peuvent être opérés, même s'il faut du temps pour qu'ils soient acceptés. Il fallut plus d'une génération pour que fût largement reconnue l'idée de Copernic selon laquelle la Terre tournait autour du Soleil ; le rythme s'est toutefois accéléré et une décennie a suffi pour que soient acceptées la physique quantique et la relativité. Cependant, même les lois les plus reconnues de la physique ne cessent d'être testées.

Ce livre propose un aperçu du monde de la physique, depuis les concepts fondamentaux comme la gravité, la lumière et l'énergie, jusqu'aux idées modernes de la mécanique quantique, du chaos et de l'énergie sombre. J'espère que, comme tout bon guide, cet ouvrage vous donnera envie d'en voir et savoir plus. Car la physique ne se contente pas d'être fondamentale – elle est aussi fondamentalement amusante.

01 Le principe de Mach

Un enfant sur un manège est tiré vers l'extérieur par l'attraction d'étoiles lointaines : c'est un exemple du principe de Mach, selon lequel « la masse là-bas agit sur l'inertie ici ». Par le biais de la gravitation, des corps distants affectent le mouvement, la rotation des choses ici-bas. Pourquoi en est-il ainsi ? Comment savoir si une chose est ou non en mouvement ?

Si vous vous êtes déjà trouvé(e) assis(e) dans un train en gare, à contempler à travers la fenêtre un wagon voisin du vôtre en train de s'éloigner, vous savez qu'il est parfois difficile de dire si c'est votre train qui part ou l'autre qui arrive. Existe-t-il une manière de déterminer avec certitude lequel des deux trains est en mouvement ?

Ernst Mach, philosophe et physicien autrichien, s'est débattu avec cette question au XIX^e siècle. Il réglait ses pas sur ceux du grand Isaac Newton qui avait cru, contrairement à Mach, que l'espace constituait une toile de fond absolue. Comme du papier millimétré, l'espace newtonien intégrait un ensemble de coordonnées et Newton décrivait tout déplacement comme un mouvement par rapport à cette grille. Mach, lui, ne partageait pas ce point de vue, et soutenait qu'un mouvement n'avait de sens que par rapport à un autre objet, et non à un quelconque quadrillage. Car que signifie se déplacer, si ce n'est par rapport à autre chose ? En ce sens, Mach, influencé par les idées du rival de Newton, Gottfried Leibniz, était un précurseur d'Albert Einstein. Il considérait que seul les mouvements relatifs avaient un sens. Mach disait que puisqu'une balle roule de la même manière en France ou en Australie, faire appel à un espace absolu est inutile. La seule chose dont on puisse concevoir qu'elle affecte le mouvement de la balle est la gravitation. La balle peut tout à fait rouler différemment sur la Lune car la force de gravitation y est plus faible. Chaque corps dans l'Univers exerce une attraction gravitationnelle sur tous les autres, chaque corps ressent donc la présence des autres à travers leur attraction mutuelle. C'est de la distribution de la matière, ou de sa masse, que le mouvement doit dépendre *in fine* et non des propriétés de l'espace lui-même.

chronologie

vers 335 av. J.-C.

Selon Aristote, le mouvement des objets est dû à l'action de forces

1640

Galilée formule le principe d'inertie

« L'espace absolu, sans relation aux choses externes, demeure toujours similaire et immobile. »

Isaac Newton, 1687

Masse Qu'est-ce que la masse ? C'est une mesure de la quantité de matière d'un objet. La masse d'un morceau de métal est égale à la somme des masses des atomes qui le constituent. La différence entre masse et poids est subtile : le poids mesure la force de gravitation qui s'exerce sur un corps – un astronaute pèse moins sur la Lune que sur Terre parce que la force de gravitation exercée par la Lune, plus petite que la Terre, est moindre. Mais la masse de l'astronaute reste la même – le nombre d'atomes qui le constituent n'a pas changé. Selon Albert Einstein, qui a montré que masse et énergie étaient interchangeables, la masse peut être transformée en énergie pure. La masse est donc, en dernière instance, de l'énergie.

Inertie L'inertie, d'un mot latin signifiant « indolence », ressemble à la masse, mais, plus exactement, elle nous dit à quel point il est difficile de déplacer une chose en lui appliquant une force. Un corps doté d'une grande inertie résiste au mouvement. Même dans l'espace interstellaire, un objet corpulent nécessitera une force conséquente pour être mis en mouvement. Pour dévier un astéroïde géant, il faudrait une grande poussée, qu'elle soit le fait d'une explosion nucléaire ou d'une force moindre exercée pendant plus longtemps. Un vaisseau plus petit, ayant moins d'inertie que l'astéroïde, se laisse lui manœuvrer par de petits moteurs à réaction.

Galilée, l'astronome italien, formula le principe d'inertie au XVII^e siècle : un corps livré à lui-même, sur lequel ne s'exerce aucune force, conservera le même état de mouvement : s'il se meut, il continuera avec la même vitesse et dans la même direction ; s'il est au repos, il y demeurera. Newton exprima une version raffinée de cette idée dans la première de ses lois.

Le seuil de Newton C'est Newton qui codifia et formalisa la gravitation. Il s'aperçut en effet que les corps possédant une masse s'attiraient les uns les autres. Une pomme tombe de l'arbre sur le sol parce qu'elle est attirée par la masse de la Terre. Cette dernière est également attirée par la masse de la pomme, mais il nous serait bien difficile de mesurer le déplacement microscopique de la Terre en direction de la pomme.

1687

Newton publie son
« argument du seuil »

1893

Mach publie *La Mécanique*

1905

Einstein publie sa théorie de
la relativité restreinte

Newton démontra que l'intensité de l'attraction gravitationnelle décroît rapidement avec la distance : la force de gravité de la Terre est donc bien plus faible lorsqu'on flotte loin au-dessus d'elle que lorsqu'on se trouve sur sa surface. Mais, bien qu'amoindrie, l'attraction terrestre reste perceptible. Plus l'on s'éloigne, plus elle devient faible, mais elle peut toujours influencer un mouvement. En fait, tous les objets existant dans l'Univers exercent sur nous une petite attraction gravitationnelle susceptible d'affecter légèrement, subtilement, notre mouvement.

Newton essaya de comprendre les relations entre corps et mouvement en considérant un seau d'eau en rotation. Au début, lorsque le seau commence à tourner, l'eau reste immobile quand bien même son contenant bouge. Puis l'eau se met, elle aussi, à tourner. Sa surface se creuse tandis que le liquide tente de s'échapper en grim pant le long des parois, mais la force du seau la confine à l'intérieur. Newton avança que la rotation de l'eau ne pouvait être comprise que si elle était vue dans un référentiel fixe : celui de l'espace absolu. On pouvait dire que le seau était en rotation simplement en observant la concavité de la surface de l'eau, produite par l'action des forces en jeu.

Des siècles plus tard, Mach revint sur ce raisonnement. Qu'en serait-il si le seau rempli d'eau était le seul objet dans l'univers ? Comment sa rotation serait-elle perceptible ? Ne pourrait-on pas tout aussi bien considérer que l'eau est en rotation par rapport au seau ? La seule manière de trancher serait de placer un autre objet dans l'univers du seau, comme par exemple les murs d'un laboratoire ou même une étoile lointaine. Le seau serait alors clairement en rotation par rapport à cet autre corps. Mais sans les points de repères que constituent une pièce stationnaire et les étoiles fixes, qui pourrait dire lequel, de l'eau ou du seau, est en rotation ? Nous faisons la même expérience lorsque nous observons le Soleil et les étoiles traversant le ciel sur des trajectoires circulaires : sont-ce les étoiles ou bien la Terre qui tournent ? Comment savoir ?

Pour Mach, et Leibniz, il faut au mouvement des points de repères extérieurs pour qu'il ait un sens à nos yeux ; l'inertie n'est donc qu'un concept vide de sens dans un univers ne contenant qu'un seul objet. Par conséquent, si l'univers ne contenait pas d'étoiles, nous n'aurions aucune chance de savoir que la Terre tourne. Ce sont les étoiles qui nous disent que nous sommes en rotation par rapport à elles. L'idée de mouvement relatif plutôt qu'absolu exprimée dans le principe de Mach a inspiré de nombreux physiciens depuis son énoncé, notamment Einstein (qui a forgé l'expression « principe de Mach »). Einstein s'est basé sur l'idée que tout mouvement est relatif pour établir ses théories de la relativité restreinte et générale. Il a également résolu un des grands problèmes posés par le principe de Mach : rotation et accélération doivent générer des forces supplémentaires, mais quelles et où sont-elles ? Einstein a montré que si tout dans l'univers était en rotation par rapport à la Terre, nous serions en effet soumis à une petite force qui entraînerait un certain type d'oscillations de notre planète.

ERNST MACH (1838-1918)

Outre le principe qui porte son nom, le physicien autrichien Ernst Mach est connu pour ses travaux sur l'optique, sur l'acoustique, sur la physiologie de la perception sensorielle, ainsi que pour ses recherches en philosophie des sciences et, surtout, celles sur la vitesse supersonique. Il publie en 1877 un article important dans lequel il décrit l'onde de choc produite dans son sillage par un corps se déplaçant plus vite que le son. C'est cette onde de choc dans l'air qui est à l'origine du boum que produit un avion supersonique. Le rapport entre la vitesse du projectile, ou de l'avion, et celle du son s'appelle aujourd'hui le nombre de Mach : Mach 2 correspond à deux fois la vitesse du son.

La nature de l'espace intrigue les scientifiques depuis des millénaires. Les spécialistes contemporains de physique des particules le considèrent comme une marmite bouillonnante où sont continuellement créées et détruites des particules subatomiques. Masse, inertie, forces et mouvement pourraient toutes, *in fine*, être des manifestations d'une soupe quantique en ébullition.

idée clé
la masse influe
sur le mouvement

02 Les lois de Newton

Isaac Newton fut l'un des savants les plus marquants, les plus polémiques et les plus influents de tous les temps. Il contribua à l'invention du calcul différentiel, expliqua la gravitation et identifia les couleurs constituant la lumière blanche. Ses trois lois du mouvement énoncent les principes qui font qu'une balle de golf suit une trajectoire courbe, que nous nous retrouvons pressés contre les portes d'une voiture dans un virage et que nous sentons une force dans la raquette lorsque l'on frappe la balle.

Même si ni les vélos ni les motos n'existaient à l'époque de Newton, ses trois lois expliquent comment un cascadeur peut tenir avec sa machine sur la pente verticale du mur de la mort et comment les cyclistes peuvent pédaler sur les pistes inclinées des Jeux olympiques.

Newton, qui vécut au XVII^e siècle, est considéré comme l'un des plus grands esprits de la science. Il fallut toute sa curiosité et son opiniâtreté pour comprendre certains des aspects de notre monde qui, derrière une simplicité apparente, cachent une grande profondeur, tels la trajectoire d'une balle qu'on lance ou la raison pour laquelle les choses tombent par terre plutôt qu'elles ne s'envolent, ou encore le mouvement des planètes autour du Soleil.

Dans les années 1660, Newton, étudiant lambda à l'université de Cambridge, entreprit de lire les grands textes des mathématiques. Ceux-ci l'amènèrent de l'étude des lois judiciaires à celles de la physique. Puis, lors d'une année sabbatique passée chez lui suite à la fermeture de l'université pour cause d'épidémie de peste, Newton fit les premiers pas qui devaient le conduire vers ses lois du mouvement.

Forces Empruntant à Galilée son principe d'inertie, Newton formula sa première loi. Elle dit qu'un corps ne se met en mouvement ni ne modifie sa vitesse à moins qu'une force n'agisse sur lui. Les corps immobiles restent au repos tant qu'aucune force ne leur est appliquée ; les corps se mouvant à une certaine vitesse continuent à se mouvoir à

chronologie

350 av. J.-C.

Aristote suggère dans sa *Physique* que le mouvement est dû à des changements permanents

1640

Galilée formule le principe d'inertie.

Les lois de Newton

Première loi Les corps se déplacent en ligne droite à vitesse constante, ou demeurent immobiles, à moins qu'une force ne s'exerce qui modifie leur vitesse ou leur direction.

Deuxième loi Les forces entraînent des accélérations en proportion inverse de la masse d'un corps ($F = m \cdot a$).

Troisième loi L'action d'une force entraîne une réaction égale et opposée.

cette même vitesse à moins qu'une force ne s'exerce sur eux. Une force (par exemple une poussée) apporte une accélération qui modifie la vitesse d'un objet. L'accélération est justement le changement de la vitesse sur un certain intervalle de temps.

Il nous est difficile de faire l'expérience de ce principe : si nous lançons un palet sur une patinoire, il glisse mais finit quand même par ralentir à cause des frottements avec la glace. Les frottements sont à l'origine d'une force qui ralentit le palet. Mais la première loi de Newton peut être vue comme un cas particulier dans lequel il n'y a pas de frottements. Le cas de figure le plus proche de cette situation idéale est celui de l'espace, mais même là des forces comme la gravitation s'exercent. Néanmoins, cette première loi fournit une base à partir de laquelle on peut comprendre forces et mouvement.

Accélération La deuxième loi de Newton établit une relation entre la grandeur d'une force et l'accélération qu'elle produit. La force requise pour accélérer un objet est proportionnelle à la masse de cet objet. Il faut une force plus grande pour accélérer les objets lourds – ou plutôt ceux ayant une grande inertie – que pour accélérer des objets plus légers. Ainsi, faire passer une voiture à l'arrêt à une vitesse de 100 km/h nécessiterait une force égale à la masse de la voiture multipliée par l'augmentation de sa vitesse par unité de temps. Algébriquement, la deuxième loi de Newton s'écrit « $F = m \cdot a$ », c'est-à-dire : la force (F) égale la masse (m) fois l'accélération (a). En renversant cette définition, la deuxième loi dit, en d'autres termes, que l'accélération est égale à la force

1687

Newton publie ses *Principia*

1905

Einstein publie sa théorie de la relativité restreinte

par unité de masse. À une accélération constante correspond une force par unité de masse inchangée. Ainsi la même force est nécessaire pour déplacer une masse d'un kilogramme, qu'elle fasse partie d'un corps petit ou gros. Ceci permet d'expliquer l'expérience imaginaire de Galilée quant à savoir lequel, du boulet de canon ou de la plume, arriverait le premier au sol si on les lâchait en même temps d'une même hauteur. On peut être tenté de penser que le boulet de canon arriverait avant la plume, mais ceci est simplement dû à la résistance de l'air qui ralentit la plume. Sans air, les deux objets tomberaient à la même vitesse et atteindraient le sol en même temps : soumis à la même accélération, celle de la pesanteur, ils tombent côte à côte, comme le marteau et la plume dans l'expérience réalisée par les astronautes d'*Apollo 15* sur la Lune, où aucune atmosphère n'est venu ralentir la plume.

Action-réaction La troisième loi de Newton dit que toute force appliquée à un corps entraîne une force de réaction égale et opposée de la part de ce corps. En d'autres termes, pour toute action, il y a réaction. C'est cette force opposée que l'on ressent dans le recul. Si une patineuse en pousse une autre, elle même partira vers l'arrière en poussant contre le corps de sa partenaire. De même, un tireur sent un recul du fusil dans son épaule lorsqu'il tire et ce recul est égal en grandeur à la force exercée sur la balle. Dans les films policiers, la victime qui essuie un coup de feu est souvent projetée en arrière par la force de l'impact ; ceci est trompeur, car si la force était vraiment si grande alors le tireur serait lui aussi projeté en arrière par le recul de son arme. Autre exemple, lorsque nous sautons en l'air, nous exerçons une force sur la Terre, mais la planète étant bien plus massive que nous, cette force n'a quasiment aucun effet sur elle.

Grâce à ces trois lois, plus celle de la gravitation, Newton put expliquer le mouvement de pratiquement tous les objets, des noisettes aux boulets de canon. Armé de ses trois équations, il aurait pu en toute confiance chevaucher une puissante cylindrée et gravir le mur de la mort, si ces choses avaient existé à son époque. Quelle confiance accorderiez-vous aux lois de Newton ? La première dit que la moto et son pilote veulent poursuivre leur route dans une certaine direction à une certaine vitesse. Mais pour maintenir la moto sur sa trajectoire circulaire, il faut, d'après la deuxième loi, une force confinante qui viennent continuellement modifier la direction du mouvement – ici, c'est la piste qui exerce cette force, à travers les roues. La force nécessaire est égale à la masse de la moto et de son pilote multipliée par leur accélération. La troisième loi explique, en réaction, la pression exercée par la moto sur la piste. C'est cette pression qui plaque le cascadeur sur le mur et, si la moto va suffisamment vite, lui permet même de grimper un mur vertical.

Encore aujourd'hui, la connaissance des lois de Newton est suffisante pour prendre un virage en voiture à vive allure – et même, malheureusement, pour le rater. C'est pour les objets se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière ou ayant une masse très faible que les lois de Newton ne sont plus valables : dans ces cas extrêmes, ce sont la relativité d'Einstein et la mécanique quantique qui prennent le relais.

Isaac Newton (1643-1727)

Isaac Newton fut le premier savant à être annobli en Grande-Bretagne. Bien qu'ayant été un élève « oisif » et « dissipé » à l'école, et un étudiant peu remarquable à Cambridge, Newton s'épanouit soudainement au moment où la peste contraignit l'université à fermer ses portes, à l'été 1665. De retour chez lui, dans le Lincolnshire, Newton se consacra aux mathématiques, à la physique et à l'astronomie, et posa même les fondations du calcul différentiel. Il établit des versions préliminaires de ses lois du mouvement et déduisit la loi en inverse carré de la gravitation. Après ces avancées remarquables, Newton fut élu à la chaire lucasienne de mathématiques, en 1669, à seulement 27 ans. Tournant son attention vers l'optique, il découvrit à l'aide d'un prisme que la lumière blanche se

composait des couleurs de l'arc-en-ciel, point sur lequel il eut une célèbre querelle avec Robert Hooke et Christiaan Huygens. Newton écrivit deux œuvres majeures, les *Philosophiae Naturalis Principia mathematica*, ou plus simplement les *Principia*, et l'*Optique*. Vers la fin de sa carrière, Newton s'engagea sur le plan politique. Il défendit la liberté académique lorsque le roi James II essaya d'intervenir dans les nominations universitaires, et entra au Parlement en 1689. Personnalité paradoxale, souhaitant d'un côté être au centre de l'attention et de l'autre se plaçant en retrait et cherchant à éviter toute critique, Newton usa de sa position pour combattre sans merci ses rivaux scientifiques et demeura jusqu'à sa mort une figure polémique.

idée clé
Le mouvement capturé

03 Les lois de Kepler

Johannes Kepler tenta de trouver en toute chose des motifs. Examinant des tables astronomiques où étaient consignées les boucles parcourues par Mars dans le ciel, il découvrit trois lois qui régissent le mouvement des planètes. Kepler décrivit les orbites elliptiques qu'elles parcourent, les plus lointaines se mouvant plus lentement autour du Soleil. Non seulement les lois de Kepler transformèrent l'astronomie, mais elles posèrent également les bases de la loi de la gravitation universelle de Newton.

Dans leur mouvement autour du Soleil, les planètes les plus proches de l'étoile se déplacent plus rapidement que celles qui sont plus éloignées. Mercure fait le tour du Soleil en seulement 80 jours terrestres. Si Jupiter se déplaçait à la même vitesse,

il ne lui faudrait qu'environ 3,5 années terrestres pour parcourir son orbite, alors qu'il lui en faut 12 en réalité. Dans leur ballet, les planètes passent les unes devant les autres, et lorsque la Terre dépasse une de ses consœurs, celle-ci effectue, dans le ciel terrestre, une trajectoire rétrograde. Ces mouvements rétrogrades constituaient une grande énigme à l'époque de Kepler. C'est en résolvant cette énigme que Kepler découvrit les idées qui devaient le conduire à ses trois lois du mouvement planétaire.

« Je compris soudain que ce joli petit pois bleu était la Terre. Je levai mon pouce en l'air et fermai un œil : mon pouce masqua notre planète. Je n'eus pas l'impression d'être un géant. Je me sentis très, très petit. »

Neil Armstrong, né en 1930

Des motifs polygonaux Le mathématicien allemand Johannes Kepler essaya de déceler des motifs dans la nature. Il vécut à la fin du XVI^e et au début du XVII^e siècle, l'astrologie jouissait alors d'une considération assez sérieuse, tandis que l'astronomie en tant que science en était à ses balbutiements. En matière de révélation des lois de la nature, les idées religieuses et spirituelles comptaient tout autant que l'observation. Lui-même empreint d'un certain mysticisme, Kepler était convaincu que la structure sous-jacente de l'Univers reposait sur des formes géométriques parfaites ; il essaya toute sa vie de dégager d'imaginaires motifs polygonaux cachés dans les œuvres de la nature.

chronologie

vers 580 av. J.-C.

Aristote énonce que les planètes sont en orbite sur des sphères cristallines parfaites

vers 150 av. J.-C.

Ptolémée observe le mouvement rétrograde et suggère que les planètes se meuvent sur des épicycles

Johannes Kepler (1571-1630)

Johannes Kepler s'intéressa à l'astronomie dès l'enfance, allant jusqu'à noter dans son journal, alors qu'il n'avait pas dix ans, le passage d'une comète ainsi qu'une éclipse de Lune. Il publia, durant les années où il enseigna à Graz, une théorie cosmologique dans un ouvrage intitulé *Mysterium Cosmographicum* (*Les mystères du Cosmos*). Il devint ensuite l'assistant de Tycho Brahe dans son observatoire situé près de Prague ; il lui succéda en tant que Mathématicien impérial en 1601, chargé de préparer l'horoscope de l'empereur. Kepler analysa les

tables astronomiques de Tycho et publia ses théories relatives aux orbites non circulaires ainsi que sa première et sa deuxième loi dans *Astronomia Nova* (*La nouvelle astronomie*). En 1620, la mère de Kepler, bien au fait des vertus médicinales des plantes, fut accusée de sorcellerie et emprisonnée et Kepler dut mener une grande bataille judiciaire pour la faire libérer. Il parvint néanmoins à poursuivre ses travaux et sa troisième loi fut publiée dans son célèbre *Harmonices Mundi* (*L'harmonie des mondes*).

Les travaux de Kepler vinrent un siècle après la formulation par l'astronome polonais Nicolas Copernic de son hypothèse selon laquelle le Soleil était au centre de l'Univers, la Terre tournant autour de lui, plutôt que l'inverse. Auparavant, depuis le philosophe grec Ptolémée, le modèle prévalant était celui de sphères de cristal portant le Soleil et les étoiles en orbite autour de la Terre. Copernic n'osa pas publier cette hypothèse radicale de son vivant, laissant le soin à ses collègues de le faire juste avant sa mort, de peur de s'opposer à la doctrine de l'Église. Copernic causa néanmoins une grande agitation en suggérant que la Terre n'était pas le centre de l'Univers, ce qui impliquait que les humains n'en étaient pas les créatures les plus importantes, comme la vision d'un dieu anthropocentrique le voulait.

Kepler avait adopté le système héliocentrique de Copernic, mais continuait de croire que les planètes tournaient autour du Soleil sur des trajectoires circulaires. Il imagina un système dans lequel les orbites de planètes se trouvaient sur une série de sphères emboîtées comme des poupées russes, et espacées selon des rapports calculés à partir d'objets tridimensionnels devant tenir dans chacune d'elles. Il imagina donc une série de polygones ayant un nombre croissant de côtés et qui pouvaient se loger dans les sphères successives. L'idée selon laquelle les lois de la nature devaient suivre des rapports géométriques fondamentaux était apparue dans l'antiquité grecque.

1543

Copernic propose un système héliocentrique

1576

Tycho Brahe effectue un relevé des positions des planètes

1609

Kepler découvre que les planètes décrivent des orbites elliptiques

1687

Newton explique les lois de Kepler grâce à sa théorie de la gravitation

« **Nous ne sommes qu'une race avancée de chimpanzés, sur une planète mineure en orbite autour d'une étoile tout à fait moyenne. Mais nous sommes capables de comprendre l'Univers, ce qui fait de nous quelque chose de très particulier.** »

Stephen Hawking, 1989

Le terme « planète » vient du mot grec signifiant « vagabond » : beaucoup plus proches de la Terre que les étoiles lointaines, les planètes semblent vagabonder dans le ciel nocturne. Nuit après nuit, elles se fraient un chemin à travers les étoiles ; mais, régulièrement, elles font demi-tour et parcourent une petite boucle vers l'arrière. On crut longtemps que ces mouvements rétrogrades étaient de mauvais présages. Dans le modèle de Ptolémée, ce comportement était incompréhensible, les astronomes ajoutaient donc des « épicycles » – des boucles – à l'orbite d'une planète pour reproduire son mouvement. Ceci ne fonctionnait pas très bien et, même si le modèle héliocentrique de Copernic nécessitait moins d'épicycles que l'ancien, géocentrique, il ne parvenait pas à expliquer les mouvements en détail.

Essayant de démontrer ses idées géométriques à l'aide des orbites des planètes, Kepler utilisa les données les plus précises disponibles à son époque : des tables complexes et imbriquées, établies à force de patience et de persévérance par Tycho Brahe. Dans ces colonnes de chiffres, Kepler discerna des motifs qui lui suggérèrent ses trois lois.

C'est en élucidant le mouvement rétrograde de Mars que Kepler réalisa une avancée décisive. Il comprit que les boucles rétrogrades correspondraient aux orbites des planètes si celles-ci étaient elliptiques et non circulaires. L'ironie est que cela contredisait l'idée d'une nature formée sur la base de formes parfaites : Kepler dut être à la fois ravi et profondément déçu car toute sa philosophie géométrique se révélait fausse.

Orbites La première loi de Kepler dit que les planètes se meuvent sur des orbites elliptiques dont le Soleil occupe l'un des deux foyers.

Sa deuxième loi décrit la vitesse à laquelle une planète parcourt son orbite. Le long de sa trajectoire, une orbite balaie une aire constante en un temps donné. L'aire est mesurée en utilisant la portion angulaire comprise entre le Soleil et les deux positions de la planète (AB ou CD), comme une part de gâteau. Les orbites étant elliptiques, il faut, pour balayer une aire donnée, qu'elle parcoure une distance plus grande quand la planète est

Les lois de Kepler

Première loi Les orbites des planètes sont des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers.

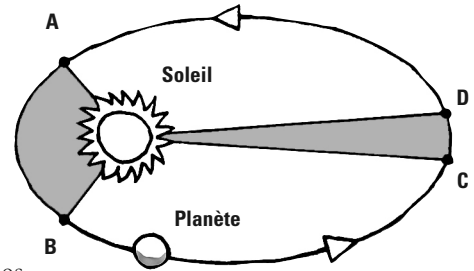
Deuxième loi En parcourant son orbite, une planète balaie des aires égales en des durées égales.

Troisième loi Les périodes orbitales sont liées à la taille des ellipses, le carré de la période étant proportionnel au cube du demi grand axe de l'orbite.

proche du soleil que lorsqu'elle est loin. Une planète se déplace donc plus vite lorsqu'elle est plus proche du Soleil. La loi de Kepler lie la vitesse d'une planète et sa distance au Soleil et, bien que Kepler ne l'ait pas réalisé, ceci est dû au fait que l'accélération d'une planète par la gravitation est d'autant plus grande qu'elle est proche du Soleil et de sa masse.

La troisième loi de Kepler nous dit comment les périodes orbitales varient selon les ellipses, donc selon les planètes avec toute leur gamme de distances au Soleil. Elle énonce que les carrés des périodes orbitales sont inversement proportionnels aux cubes des grands axes des orbites elliptiques. Plus l'orbite est grande, plus la période est longue, c'est-à-dire plus le temps mis à parcourir l'orbite est long. Ainsi, une planète deux fois plus éloignée du Soleil que la Terre mettrait 8 fois plus de temps à parcourir son orbite. Les planètes plus éloignées se déplacent plus lentement que les plus proches. Il faut près de 2 années terrestres à Mars pour opérer une révolution, 29 pour Saturne et 165 pour Neptune.

Avec ses trois lois, Kepler parvint à décrire les orbites de toutes les planètes de notre système solaire. Ses lois s'appliquent également à tout corps en orbite autour d'un autre, qu'il s'agisse de comètes, d'astéroïdes ou de lunes dans notre système solaire, de planètes autour d'autres étoiles ou même de satellites en orbite autour de la Terre. Kepler réussit à unifier des principes sous la forme de lois géométriques, mais il ne savait pas pourquoi ces lois étaient valables. Il pensait qu'elles émanaient des motifs géométriques sous-tendant la nature tout entière ; il fallut attendre Newton pour que fussent unifiées en une théorie universelle de la gravitation les trois lois de Kepler.



« Je mesurais
les cieux,
je mesure
à présent
les ombres
de la Terre.
L'esprit était
céleste,
ci-gît l'ombre
du corps. »

Épitaphe de Kepler, 1630

idée clé
La loi des mondes

04 La gravitation universelle

Isaac Newton fit un pas de géant en unissant les trajectoires des boulets de canon ou celle du fruit tombant de l'arbre et les mouvements des planètes, reliant ainsi la Terre et les Cieux. Sa loi de la gravitation demeure un des concepts les plus puissants de la physique et explique une grande partie du comportement physique de notre monde. Newton proposa que les corps s'attirent les uns les autres *via* la force de gravitation, l'intensité de cette force décroissant avec le carré de la distance.

On raconte que l'idée d'une gravitation universelle vint à Isaac Newton en voyant une pomme tomber d'un arbre. Que cette histoire soit vraie ou non, Newton sut englober dans sa réflexion les mouvements célestes autant que terrestres pour forger sa loi de la gravitation.

« **La gravité est une habitude dont il est difficile de se défaire.**»

Terry Pratchett, 1992

Newton savait que les objets étaient attirés vers le sol par une force accélératrice (cf. page 8). Puisque les pommes tombent de l'arbre, que se passerait-il si l'arbre était beaucoup plus grand ? S'il atteignait la Lune ? Pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas sur la Terre comme une pomme ?

Laisser tomber C'était dans ses lois du mouvement, qui établissaient le lien entre forces, masse et accélération, que Newton devait trouver la réponse. Un boulet envoyé par un canon parcourt une certaine distance avant de toucher le sol. Qu'arriverait-il si sa vitesse initiale était plus grande ? Il irait plus loin. Et s'il était propulsé si vivement qu'il allât suffisamment loin en ligne droite pour voir la surface de la Terre s'incurver sous sa trajectoire, où tomberait-il ? Newton réalisa qu'il continuerait à être attiré par la Terre mais poursuivrait sa route sur une orbite circulaire. Exactement comme un satellite ressent une attraction continue sans jamais tomber.

chronologie

350 av. J.-C.

Aristote discute les raisons de la chute des corps

1609

Kepler découvre les lois des orbites planétaires