

# Chapitre I

## La métamorphose de la physique

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, les physiciens s'appuyaient sur un jeu de connaissances provenant des améliorations apportées par les générations précédentes. Ils vivaient dans un environnement bien tranquille où tout, ou presque, recevait une réponse simple. Certains d'entre eux allaient les faire sortir de ce monde rassurant pour les plonger dans un nouveau monde déroutant. Ces quelques perturbateurs iconoclastes poussèrent la physique d'une situation sans inquiétude vers des terres inconnues.

### Un environnement bien tranquille

Le rôle du physicien, sa raison d'être, est d'expliquer (mettre en équations\*) les phénomènes qui l'entourent, mais son parti pris d'esthète est de leur trouver une formulation mathématique la plus simple possible.

Grâce à l'observation de la conservation de certaines quantités physiques dans le monde autour de lui, il a trouvé une explication particulière pour chacun des phénomènes naturels. Depuis Galileo Galilei (« Galilée », 1564-1642), les physiciens vivaient dans un monde rassurant : lors d'un choc entre deux corps il y avait conservation de la masse\*, de l'énergie\* et du moment angulaire\*, le temps était une variable immuable. Mais ces conservations et l'immuabilité du temps avaient un côté magique. L'univers visible (la Terre et les étoiles) obéissaient, pour une raison obscure, à la mécanique galiléenne.

Depuis les Grecs, notamment avec Thalès vers -600, l'univers est composé de quatre éléments (l'air, l'eau, le feu et la terre). Démocrite, vers -400, avance l'idée que ces éléments sont constitués de minuscules entités indivisibles : il les appelle « atomes ». Un peu plus tard, il découvre aussi que les intervalles musicaux sont gouvernés par une relation numérique simple. C'est l'émerveillement devant la simplicité de la nature et ce désir de simplicité taraudera les physiciens qui allaient suivre jusqu'à nos jours. Ce qui pose une grande question philosophique : *Pourquoi la nature est-elle explicable par les mathématiques ?*

Comme l'entourage immédiat semble bien suivre des lois mathématiques simples (et magiques), qu'en est-il de l'univers visible ? Claudius Ptolemaeus (« Ptolémée », (85 ?-165 ?) met la Terre au centre de l'univers avec les planètes qui tournent autour d'elle en suivant des cercles. Pour lui, les cercles sont une géométrie parfaite puisqu'elle est créée par Dieu. La description de Ptolémée restera la référence pendant plus de mille ans. Elle permet de faire de bonnes prévisions astronomiques sur la position des planètes.

Ce monument est renversé par Nicolas Copernic (1473-1543) avec sa « thèse héliocentrique<sup>1</sup> » qu'il publie en 1543 (juste avant de mourir) : le Soleil est au centre de l'univers (c'est une hérésie pour l'Église qui voudrait la Terre au centre) et toutes les planètes tournent autour de lui sur des orbites circulaires. La Terre tourne sur elle-même. Le modèle rend correctement compte de la position des planètes avec moins d'hypothèses que celui de Ptolémée et sera amélioré par Galilée et Kepler.

Johannes Kepler (1571-1630) améliore le modèle en remplaçant les orbites circulaires par des orbites en « vilaines » ellipses. (Les fameuses lois de Kepler : une sur les orbites, une autre sur la vitesse orbitale et la troisième sur le temps de passage devant l'étoile.) Par la généralité de ses lois, il introduit une *harmonie céleste*.

Isaac Newton (1642-1727) découvre, en 1687, la formulation mathématique qui décrit la gravitation et qui explique l'origine des mystérieuses lois de Kepler : les orbites *doivent* suivre des ellipses.

Une comète (Halley), vue en 1682, revient en 1759 à la date prévue par la loi de Newton. Ouf ! l'univers visible suit une mécanique galiléenne et il suit la loi de Newton.

En 1873, James Clerk Maxwell (1831-1879) publie un traité qui démontre que les forces électriques et magnétiques sont les effets d'une seule interaction :

---

1. La thèse héliocentrique est souvent attribuée à Copernic malgré quelques précurseurs grecs dans l'Antiquité (Héraclide du Pont et Aristarque de Samos). Les dates entre parenthèses concernent la naissance et le décès (si décès il y a avant 2007). Un astronome danois, Tycho Brahé (1546-1601), a essayé de marier cette thèse avec celle, géocentrique, de Ptolémée.

l'interaction électromagnétique qui a le même comportement que la lumière. La lumière est interprétée comme une vibration qui se propage comme une onde dans un milieu qui baigne tout : l'éther. Cette interprétation de la lumière est vérifiée, à de nombreuses reprises, par son comportement (réflexion\*, réfraction\*, interférences\*). Seul l'éther n'est pas mis en évidence, mais ceci pourrait être une conséquence de l'insuffisance technique de l'époque.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, tout semble bien compréhensible aux physiciens « bien au chaud » emmaillotés dans le monde rassurant et magique de la physique classique de Galilée et de Newton.

## Le saut dans l'inconnu

Le vingtième siècle allait les sortir de leur cocon en les obligeant à vivre dans un monde déconcertant : celui de la physique moderne.

La première secousse annonciatrice de leur sortie prochaine se produit en 1881 avec « l'échec » de l'expérience *d'Albert Abraham Michelson*<sup>2</sup> (1852-1931) sur la vitesse de la lumière<sup>3</sup>.

La première à tirer efficacement sur le fil du cocon est Amalie Emmy Noether (1882-1935) qui, en 1918, publie un théorème\*. Il donne une justification mathématique à ces conservations qui perdent, ainsi, leur côté magique. C'est la porte ouverte aux grands principes\* et, avec elle comme guide rassurant, ce sont les premiers pas du physicien moderne.

Le fil du cocon est résistant et *Antoine Henri Becquerel* (1852-1908) avait déjà aidé Emmy Noether à le dévider : il range, en 1896, dans un tiroir des plaques photographiques vierges à l'intérieur d'une enveloppe en carton. Dans ce tiroir, il y avait des cristaux de sel d'Uranium. En sortant les plaques H. Becquerel les trouve impressionnées et il sait interpréter ce phénomène comme dû à la radioactivité de l'Uranium. Cette découverte est due au hasard, mais Henri Becquerel a osé l'expliquer par un phénomène inconnu à l'époque : la radioactivité naturelle.

Cette « trouvaille » complique les choses. En plus de la gravitation de Newton et de l'électromagnétisme de Maxwell, il y a un phénomène inconnu : la radioactivité. De nouvelles interactions, les unes après les autres, et de nouveaux

- 
2. Les noms des scientifiques en italique ont été honorés par un prix Nobel. La liste de ces scientifiques est donnée, dans l'appendice V, avec la date d'attribution du prix et le motif. (L'écriture en italique n'est faite que lors de la première mention de ce scientifique.)
  3. Cette mesure, faite dans deux directions perpendiculaires à 6 mois d'intervalle, aurait dû mettre en évidence l'existence de l'éther dans lequel baigne la Terre. (Comme la mesure du déplacement d'un objet, lancé d'une barque sur une rivière, met en évidence l'existence d'un courant d'eau.)

« rayonnements » viendront brouiller le paysage. Les corps radioactifs (c'est-à-dire ceux qui impressionnent une plaque photographique<sup>4</sup>) deviennent l'objet de l'attention de nombreux physiciens et chimistes comme *Pierre* (1859-1906) et *Marie* (1867-1934) *Curie*.

Ces derniers découvrent deux nouveaux corps radioactifs (le Polonium et le Radium) et découvrent trois nouveaux types de radioactivité qu'ils appellent alpha, bêta et gamma. (À défaut de leur trouver un nom significatif, ceux-ci garderont longtemps les noms d'origine :  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma^5$ .) L'avantage de la radioactivité  $\alpha$  c'est qu'elle fournit des projectiles (les noyaux\* d'Hélium-4) faciles à se procurer puisqu'ils proviennent d'une matière naturelle (l'Uranium-238). Les physiciens vont les utiliser pour sonder la matière. Comme ils viennent de sortir de leur cocon, ils vont aller de surprise en surprise.

En 1909, en étudiant les déviations des « rayons »  $\alpha$  (note 5) par des feuilles d'or, *Ernest Rutherford* (1871-1937) découvre que certains d'entre eux sont déviés avec un angle plus grand que  $90^\circ$  : tout se passe comme s'ils rebondissaient en arrière. Selon lui, ce comportement est explicable s'ils rencontrent quelque chose de très petit et très dur dans lequel se trouve toute la charge\* électrique de l'atome\* et aussi presque toute sa masse : c'est le noyau de l'atome.

Le modèle de l'atome avec un noyau très petit entouré d'électrons\* en « orbite » fait son entrée en physique<sup>6</sup>. Mais les orbites des électrons étaient instables avec des électrons tombant sur le noyau très rapidement.

En 1900, *Max Karl Ernst Ludwig Planck* (1858-1947) avait osé présenter le concept d'un transfert d'énergie qui n'est possible que par paquets<sup>7</sup> (quanta) d'une nouvelle constante de la nature (la constante de Planck). La physique quantique<sup>8</sup> entre en scène (note 7, avec des transferts d'énergie qui ne sont pas continus) et va stupéfier les physiciens tout juste sortis de leur cocon « classique ». Un article d'Einstein, tenant compte de ces quanta, en 1905 va augmenter leur trouble.

Depuis 1887, l'effet photoélectrique (émission d'électrons par de la lumière frappant un métal) était bien connu et dormait dans les placards des laboratoires

- 
4. La plaque photographique a été le « détecteur » le plus populaire, parce que le plus simple, au début du siècle.
  5. Tous ces « rayons » ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) sont produits lors de désintégrations des noyaux de la chaîne de l'Uranium-238 qui aboutit au plomb. La radioactivité est abordée dans le paragraphe « radioactivité » (étape 3 du chapitre III) et l'appendice II décrit la chaîne de l'Uranium-238. Les rayons  $\alpha$  (noyaux d'Hélium :  ${}^4_2\text{He}$ ) viennent de la désintégration de  ${}^{238}\text{U}$  en  ${}^{234}\text{Th}$ .
  6. La description d'un atome est donnée dans un paragraphe spécifique du chapitre IX.
  7. Auparavant, l'énergie était considérée comme variant régulièrement, d'une façon analogue au poids d'un seau d'eau dont le contenu sort, en filet, par un trou. Les quanta de Planck sont analogues aux billes dans un sac dont le poids varie par paquets lorsqu'on ajoute, ou enlève, une ou plusieurs billes.
  8. La physique quantique fait l'objet des chapitres VI à IX.

faute d'explication. En 1905, *Albert Einstein* (1879-1955) le fait sortir des placards en lui trouvant une explication révolutionnaire : la lumière, sous forme de grains, heurte un électron de l'atome qui est éjecté comme lors d'un choc entre deux boules.

Mais les scientifiques étaient sceptiques : la lumière s'était toujours comportée comme une onde.

En 1923, *Arthur Holly Compton* (1892-1962) veut mettre l'hypothèse, iconoclaste d'Einstein en difficulté. Il mesure l'augmentation de la longueur d'onde<sup>9</sup> de photons énergiques (rayons X) lorsqu'ils sont diffusés par le métal. Ses mesures ont l'effet contraire à celui qu'il espérait : elle ne met pas l'hypothèse d'Einstein en difficulté, mais elle la renforce et la prouve puisque la longueur d'onde des rayons X diffusés suit bien<sup>10</sup> les prescriptions d'un choc entre deux *corpuscules* (l'électron et le rayon X).

La lumière devient un « grain », une particule\*. Le photon « moderne » est né et les pauvres physiciens qui se raccrochent à leur passé (nostalgiques de leur cocon rassurant) ne sont pas au bout de leur désarroi. En 1905, Einstein va les confronter, une fois de plus, à un scandale encore plus grand : il propose une nouvelle formulation de la transformation des variables d'espace et de temps (lors d'une translation\*) pour remplacer les transformations galiléennes : c'est la relativité restreinte. Le temps tombe de son piédestal : il n'est plus une variable immuable, une horloge en mouvement par rapport à une autre ne donne pas la même heure que celle qui est au repos. Bien sûr, les physiciens méticuleux savaient, déjà, qu'une horloge dans un train en mouvement ne marquait pas le même temps qu'une autre horloge sur le quai, mais à leurs yeux ce n'était qu'un artifice de calcul. Einstein affirme que le temps dans le train est différent de celui sur le quai : leur cœur ne bat pas au même rythme dans le train et sur le quai !

La relativité<sup>11</sup> va connaître un immense succès dans la population et Einstein va être reçu, partout, comme une star. Les physiciens sentent bien que leur physique est en mutation et qu'il va falloir s'y faire : avant Einstein, le temps pouvait être considéré comme une gigantesque horloge cosmique battant la seconde partout de la même façon. Après Einstein, cette horloge cosmique est remplacée par une multitude d'horloges asynchrones battant chacune « leur » seconde. La sereine harmonie d'autrefois devient une cacophonie.

---

9. Cette mesure aurait prouvé que la lumière (sous la forme de rayons X) était bien une onde.

10. Le deuxième paragraphe du chapitre VII est consacré à cet effet Compton dont la mathématique est reportée en appendice IV.

11. La relativité restreinte fait l'objet du chapitre IV et la relativité générale est décrite dans le chapitre V.

1905 restera dans l'histoire comme l'année où Einstein a provoqué un bouleversement majeur des conceptions physiques classiques. La physique moderne naît, ce siècle avait 5 ans ! Les physiciens devront, vraiment, vivre avec elle. Huit ans plus tard, le modèle de l'atome comme un système planétaire reçoit une description mathématique qui va les conforter pour leur permettre de penser comme dans leur cocon.

En 1913, *Niels Henrik David Bohr* (1885-1962) présente sa description mathématique de l'atome d'Hydrogène<sup>12</sup> en introduisant une condition de quantification qui n'autorise, parmi toutes les orbites des électrons possibles, que celles pour lesquelles le moment angulaire de l'électron est un multiple d'une grandeur liée à une nouvelle constante de la physique (les « billes » de la note 7). Cette description est magnifiquement vérifiée par l'expérience.

Les physiciens classiques se rassurent : malgré toutes ces idées révolutionnaires (et extravagantes), ils peuvent continuer à raisonner comme avant en imaginant l'atome comme un noyau entouré d'électrons en orbites stables à l'image du système solaire. Mais ils ne pourront pas rester trop longtemps dans cet équilibre schizophrénique. Cette tendance à raisonner « comme avant » dans certains cas et « à la Einstein » dans les autres cas ne résistera pas des années : qu'ils le veuillent ou non, le temps n'est plus une variable immuable, le photon est un corpuscule. Einstein, toujours lui, et Dirac vont les accabler. En 1915, Einstein élargit la sacro-sainte gravitation de Newton avec la relativité générale : la lumière ne va plus en ligne droite, elle est déviée par la masse d'une étoile et la gravitation est effacée dans un ascenseur en chute libre. En 1927, *Paul Adrien Maurice Dirac* (1902-1984) publie l'article fondateur de la théorie quantique des champs\* : « *La théorie quantique de l'émission et de l'absorption du rayonnement.* » C'est certain, pour expliquer les phénomènes naturels, les physiciens devront apprendre à manipuler ces nouveaux outils quantiques, bien compliqués et déroutants. Ces outils ont des conséquences qui heurtent tellement le bon sens que leurs inventeurs sentent le besoin de s'isoler pour réfléchir au calme. À Copenhague, Niels Bohr regroupe une équipe de scientifiques, dont *Max Born* (1882-1970), *Werner Karl Heisenberg* (1901-1976) et *Pascual Jordan* (1902-1980), pour essayer de mieux comprendre la toute nouvelle mécanique quantique : elle est étrange et choque le sens commun<sup>13</sup>. Confrontés à une réalité hallucinante, ils doivent réfléchir loin du bouillonnement des nouvelles idées.

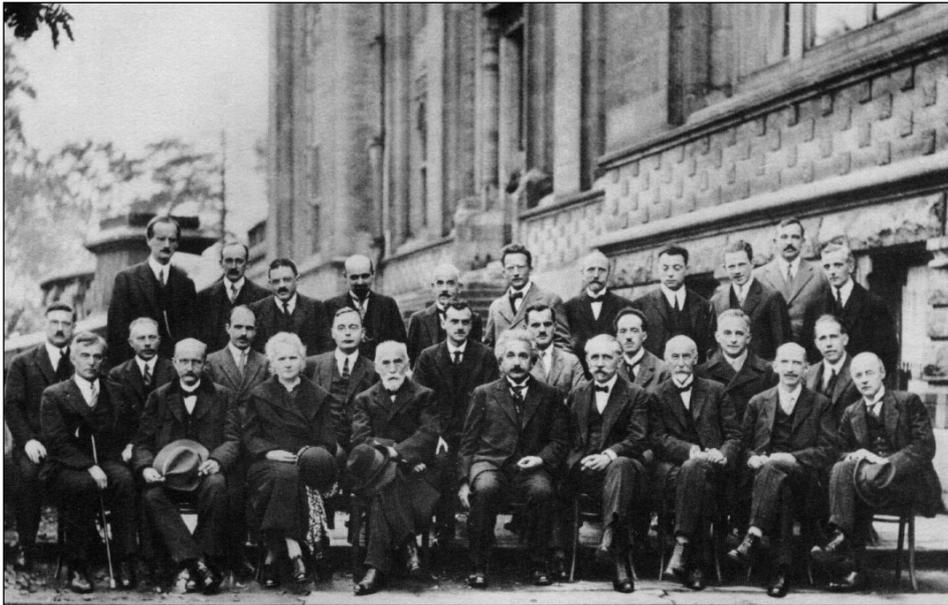
---

12. Le premier paragraphe du chapitre IX est consacré à ce modèle. Le calcul des orbites électroniques est reporté en appendice IV. Un atome d'Hydrogène est composé d'un proton\* et d'un électron.

13. Les chapitres VI et VII essaient de faire comprendre au lecteur toute la « bizarrerie » de la description des phénomènes naturels par la mécanique quantique. Une boutade (dont l'auteur est inconnu) résume bien le caractère nécessaire mais inexplicable, en termes sensés, de la physique quantique : « *Shut up and calculate !* » (Ferme-la et calcule ! – ou : ne te pose pas de questions, travaille !)

La physique classique s'est effacée devant la physique moderne au cours des trente années « glorieuses » (de 1896 à 1927) qui ont vu la naissance de la physique quantique, de la théorie quantique des champs et de la relativité (restreinte et générale). Dès sa naissance, la physique moderne a été présentée sur les fonts baptismaux du congrès Solvay, en octobre 1927, consacré aux électrons et photons et, implicitement, à la mécanique quantique. Les plus prestigieux scientifiques de l'époque participaient à ce congrès. La photographie des participants est montrée dans la figure 1. Cette célèbre photographie est impressionnante par la qualité des personnes réunies (17 des 29 personnes présentes se virent attribuer un prix Nobel ou en avaient déjà un) :

- N. Bohr (prix Nobel de physique 1922).
- M. Born (prix Nobel de physique 1954).
- W.L. Bragg* (prix Nobel de physique 1915).
- A. Compton (prix Nobel de physique 1927).
- M. Curie (prix Nobel de physique 1903 et de chimie 1911).
- L. de Broglie* (prix Nobel de physique 1929).
- P. Debye* (prix Nobel de chimie 1936).
- P. Dirac (prix Nobel de physique 1933).
- A. Einstein (prix Nobel de physique 1921).
- W. Heisenberg (prix Nobel de physique 1932).
- I. Langmuir* (prix Nobel de chimie 1932).
- H. Lorentz* (prix Nobel de physique 1902).
- W. Pauli* (prix Nobel de physique 1945).
- M. Planck (prix Nobel de physique 1918).
- O. W. Richardson* (prix Nobel de physique 1928).
- E. Schrödinger* (prix Nobel de physique 1933).
- C. T. R. Wilson* (prix Nobel de physique 1927).



**Figure 1 :** Photographie (par Benjamin Couprie) des participants au congrès Solvay d'octobre 1927. (Avec la gracieuse autorisation des Instituts Solvay, Bruxelles.)

Au premier rang : I. Langmuir, M. Planck, M. Curie, H. Lorentz, A. Einstein, P. Langevin, C. E. Guye, C.T.R. Wilson, O.W. Richardson.

Au deuxième rang : P. Debye, M. Knudsen, W.L. Bragg, H.A. Kramers, P. Dirac, A. Compton, L. de Broglie, M. Born, N. Bohr.

Au troisième rang : A. Piccard, E. Henriot, P. Ehrenfest, Ed. Herzen, Th. De Donder, E. Schrödinger, E. Verschaffelt, W. Pauli, W. Heisenberg, R. H. Fowler, L. Brillouin.

Un petit film de ce congrès historique (pris par I. Langmuir et commenté par N.T. Greenspan) peut se voir<sup>14</sup> à <http://www.cern.ch/guillaud/solvay>.

---

14. Ce film restera visible via mon site tant que son propriétaire me laissera y accéder.