

# De la physique classique à la physique quantique

## Une histoire abrégée

### 1. A l'aube du XX<sup>ème</sup> siècle, Y-avait-il encore des choses à découvrir ?

Cette photo du Congrès Solvay de 1927, c'est l'image de la transition de la physique classique à la physique quantique. Des plus anciens issus de la physique classique aux plus jeunes formés aux concepts nouveaux, ils seront presque tous prix Nobel.

Comment cela s'est-il passé ? A l'aube du 20<sup>ème</sup> siècle beaucoup de scientifiques pensaient : Y avait-il encore des choses à découvrir ? En effet les lois de la physique classique c'est à dire la mécanique et la gravitation de Newton, l'électromagnétisme de Maxwell, la chimie (Lavoisier), la thermodynamique (Sadi Carnot) et la physique statistique (Boltzmann), permettaient de comprendre les phénomènes observés et les comportements de la matière. Et les évolutions technologiques majeures le confirmaient.

*Machine à vapeur (J. Watt, 1769), chemin de fer (début du 19<sup>ème</sup>, première ligne en France 1827), lampe à incandescence (Edison 1879), développement du réseau électrique (Bourganeuf, 1889), moteur à explosion (à partir de 1860), téléphone (Bell 1876), « la jamais contente, première voiture électrique record de vitesse en 1999, etc.*

*Et ces réussites ne se cantonnaient pas dans le seul registre de la physique et de la chimie. Qu'on pense au début de la vaccination (variole, rage), aux débuts de l'anesthésie (chloroforme), ainsi qu'à la théorie de l'évolution de Darwin.*

A la suite de Démocrite (vers -400), qui considérait que la matière était composée de petites particules invisibles et indivisibles séparées par du vide, appelées atomes, (du grec Atomos qui veut dire indivisible), en cette fin de 19<sup>ème</sup> siècle, la théorie prévalente était celle du chimiste John Dalton.

S'appuyant sur ses propres observations et celles d'autres chimiste comme Lavoisier (« Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »), J. Dalton émet les hypothèses suivantes :

- Les atomes d'un même élément sont identiques. Ils ont les mêmes propriétés et la même masse.
- Les atomes d'éléments différents ont des propriétés et des masses différentes.
- Les atomes peuvent se combiner pour former une nouvelle substance. La molécule produite possède des propriétés différentes des atomes qui la constituent.
- Toute réaction chimique doit alors pouvoir être identifiée comme étant un nouvel agencement d'atomes, ces derniers ne subissant aucune altération.

Les atomes d'un même élément étaient identiques et ce qui les distinguait d'autres atomes d'autres éléments c'était leur masse. C'est pour cela que la masse a servi à classer les éléments. On a très vite remarqué des comportements périodiques dans la chimie des éléments.

Pour traduire ces comportements, on a construit des tableaux dont le plus célèbre est celui du chimiste russe Dimitri Mendeleïev (1869). Sur une même ligne on disposait les éléments qui avaient des propriétés chimiques similaires et l'emplacement de chaque élément dans le tableau est donné par la lettre Z (qui à l'époque ne veut pas encore dire ce qu'on sait aujourd'hui mais qui venait simplement de l'allemand atome zahl numéro atomique). Dans les tableaux périodiques modernes les lignes et les colonnes ont été échangées.

## 2. Quelques nuages dans la théorie

### La catastrophe du corps noir

Quand on regarde l'histoire, on se rend compte que la physique quantique aurait pu apparaître à plusieurs occasions. Mais historiquement il s'est trouvé qu'elle est advenue à propos d'un problème apparemment beaucoup moins fondamental : celui du spectre du rayonnement issu d'un four : quelle est la lumière qui est contenue dans un four ? c'est ce qu'on appelle le problème du corps noir.

On a constaté qu'un corps chauffé émettait de la lumière. A mesure que la température augmente, apparaît une lumière rouge sombre puis de plus en plus éclatante, virant à l'orange puis tirant vers le blanc. Très vite on a pensé qu'il existait une relation entre les longueurs d'onde émises (l'ensemble du spectre) et la température du corps. Pour l'étudier, on a inventé le concept idéal de corps noir, qu'on simule à l'aide d'un four dont on observe la lumière émise.

On constate que le spectre continu ne dépend que de la température et pas de la matière constituante des parois.

*Cette propriété est connue depuis longtemps. On peut en voir la preuve au château de Guesdelon, qui est une expérience d'archéologie expérimentale, dans laquelle un château fort est construit selon les méthodes en vigueur du temps de Philippe Auguste. Par exemple les poteries, (éléments comme les briques, les tuyaux, les gouttières) sont cuites dans des fours et la cuisson est déterminée par la couleur du rayonnement au sein du four.*

Les premiers modèles fonctionnent pour certaines des longueurs d'onde longues (rouge, proche infrarouge, Wien 1896), ou pour les longueurs d'onde plus importantes Infrarouge lointain, Lord Rayleigh, 1900), mais donnent des résultats aberrants pour les longueurs d'onde plus faibles. Le corps noir était censé émettre des rayonnements toujours plus

importants à mesure que la longueur d'onde diminue, notamment dans le domaine ultraviolet. Cela amènera Paul Ehrenfest à créer le terme de « catastrophe ultraviolette » (1911).

C'est Planck qui en 1900 introduit un modèle du corps noir, caractérisé par une nouvelle formule (dite de Planck) qui fait intervenir une constante  $h$  (hilfe, au secours) qui signifiera que les échanges d'énergie entre la lumière et la matière ne sont pas quelconques, ils sont quantifiés. Il a utilisé cette constante pour sauver la situation dans un acte de désespoir. Dans un calcul intermédiaire qui lui a permis d'établir la formule, il écrit  $E = h\nu$  qui représente ce qu'il appelle l'énergie d'un résonnateur qui est proportionnelle à la fréquence. En résumé, dans le corps noir toutes les fréquences sont possibles, toutes les températures sont possibles, mais les échanges lumière-matière sont quantifiés.

### L'effet photo électrique

Connu depuis le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle (Becquerel 1839, Hertz 1887), l'effet photo-électrique désigne l'émission d'un courant électrique par un matériau sous l'action de la lumière : certains matériaux irradiés peuvent émettre un courant qui dépend de la longueur d'onde du rayonnement avec un effet de seuil et du matériau utilisé. L'émission d'électrons ne dépend pas de l'intensité du flux lumineux. C'est Einstein (1905, prix Nobel) qui proposa une explication, en utilisant le concept de particule de lumière, appelé aujourd'hui photon, et celle du quantum d'énergie initialement introduits par Max Planck.

La même année Einstein propose :

- La théorie de la relativité restreinte et l'équivalence énergie matière :  $E = mc^2$ .
- La théorie du mouvement brownien.

### L'éther n'existe pas

Un autre problème était celui de la nature ondulatoire de la lumière. Les vagues se propagent dans l'eau, le son se propage dans l'air et donc les physiciens de l'époque pensaient que la lumière se propageait dans un milieu, l'éther, qui était supposé être le support matériel des vibrations d'une onde électromagnétique. La vitesse de la lumière issue des équations de Maxwell était définie par rapport à un référentiel, celui de l'éther. Dans un référentiel en mouvement, classiquement les vitesses s'ajoutent, on devait donc pouvoir mesurer une vitesse de la lumière différente suivant les directions d'observation. Beaucoup d'expérience ont été réalisées pour le mettre en évidence mais elles ont toutes échouées. L'expérience la plus connue, l'expérience ratée la plus connue, est celle de l'interférométrie de Michelson et Morley. Ils n'ont pas pu mettre en évidence de différence de vitesse de la lumière selon des directions de propagation. Si la terre se déplace dans l'éther, un interféromètre à deux bras perpendiculaires, dont l'un est dans le sens de la vitesse de la terre, devrait faire apparaître des franges d'interférence liées à la différence de chemins optiques entre les deux branches. Mesurés à plusieurs reprises, dans des positions différentes de la terre, il n'apparut jamais aucune interférence. Il fallut en

conclure que la **lumière se propageait dans le vide à la même vitesse quel que soit la direction**. Ce qui contribua aux hypothèses d'Einstein sur la relativité restreinte.

### 3. Des observations qui questionnent : le tube de Crookes

Expérimentalement, les premières interrogations vinrent de l'ancêtre du tube cathodique, le tube de Crookes. Dans un tube en verre on place deux électrodes aux bornes desquelles on applique une tension.

Il apparaît un rayonnement inconnu et pénétrant qui impressionne les plaques photo, appelé X.

Il apparaît aussi un faisceau qui émane de la borne négative qui se propage en ligne droite. Quand il heurte les parois du tube, il émet une lueur fluorescente.

Était-ce des ondes ou des particules ? Jean Perrin (1870 – 1942) démontra que ce sont des particules de charges négatives en les déviant par un champ magnétique. Très vite à Cambridge Thomson perfectionne les techniques du vide et réussit à superposer en plus du champ magnétique un champ électrique. En jouant sur les amplitudes des champs il mesure le rapport charge sur masse de ces particules et trouve le même résultat quel que soient le matériau et le gaz résiduel dans le tube. **Il en conclue que ces corpuscules comme il les appelait étaient les constituants des atomes (qui donc n'étaient plus indivisibles) et sont les porteurs de la charge électrique élémentaire. Il élabore un modèle de l'atome connu sous le nom de Plum-Pudding ou les électrons étaient répartis dans une glue de charge positive comme les raisins dans un gâteau du même nom.**

Henri Poincaré présente ces résultats à l'Académie des Sciences.

Il suggère une corrélation entre ces rayons X et la lueur fluorescente du tube de Crookes. H. Becquerel spécialiste de la fluorescence, décide de prendre un matériau bien connu pour ses propriétés de fluorescence pour voir s'il peut en savoir un peu plus sur ses rayons X : l'uranium. **Il se rend compte que l'uranium, sans exposition préalable à la lumière, émet un autre rayonnement capable également d'impressionner une plaque photographique et aussi capable d'ioniser de l'air et de décharger un électroscope.**

### 4. Et Marie Curie vint : La radioactivité

#### La radioactivité

C'est là que rentre en scène Marie (et Pierre) Curie : elle cherchait un sujet de thèse et elle va décider d'étudier ses rayons uraniques. Elle s'aperçoit assez rapidement que le thorium émet aussi un même genre de rayonnement. Elle va procéder à la mesure

quantitative du rayonnement en mesurant précisément les quantités d'ionisation produites par les différents matériaux. (Ce dispositif de mesure est toujours visible au musée à Paris).

Elle arrive à identifier deux substances beaucoup plus actives que le thorium et l'uranium quel baptise le polonium en l'honneur de son pays de naissance et le radium parce que littéralement il rayonnait. Elle baptise également ce phénomène **radioactivité** puisque c'est un phénomène beaucoup plus général que seulement propre à l'uranium et au thorium.

Par la suite, E. Rutherford découvre qu'il y a deux types de radioactivité : alpha ( $\alpha$ ) chargée positivement ( $\text{He}^{++}$ ) et bêta ( $\beta$ ) chargée négativement (électrons de haute énergie), et plus tard P. Villard découvrira une troisième forme de radioactivité gamma ( $\gamma$ ) celle-ci neutre sans charge, des photons très énergiques.

### Loi de décroissance et transmutation

Ces radioactivités se distinguent aussi par leur pouvoir de pénétration : c'est à dire qu'un faisceau de particules alpha sera atténué dans des épaisseurs très fines de matériaux, les beta peuvent aller beaucoup plus loin mais il faut carrément des épaisseurs de béton pour arrêter les gamma.

On se rend compte alors que la radioactivité est accompagnée **d'une transmutation** c'est à dire qu'un élément chimique va devenir un autre élément chimique et Rutherford et Soddy établissent la **première chaîne de décroissance**, ici du radium qui après émission d'une particule alpha se transforme en un gaz, le Radon

### Diffusion des $\alpha$ par une feuille d'or, le modèle de l'atome de Rutherford.

L'expérience de Rutherford, également connue sous le nom d'expérience de la feuille d'or, menée en 1909 par Hans Geiger et Ernest Marsden sous sa direction, montra que la partie chargée positivement de la matière est concentrée en un espace de petit volume (maintenant appelé noyau atomique).

Antérieurement à cette expérience, la matière était vue comme constituée d'atomes eux-mêmes faits de deux parties chargées électriquement de façons opposées, la partie chargée négativement pouvant être arrachée à l'atome (rayons cathodiques) : le modèle « Plum- Pudding », (voir ci-dessus)

La diffusion d'un faisceau de particules  $\alpha$  par une feuille d'or conduit à éliminer cette hypothèse.

De la matière radioactive émettant des particules  $\alpha$  est placée dans une boîte et le faisceau de particule  $\alpha$  est orienté en direction d'une très fine feuille d'or ( $6\,000\text{ \AA}$ ). Derrière cette couche d'or, un écran est placé ; il est enrichi d'une substance chimique (sulfure de

zinc : ZnS) permettant de visualiser, par un scintillement lumineux, la collision par les particules  $\alpha$ .

Plusieurs minutes après la disposition du matériel, différents points lumineux apparaissent sur l'écran et ces points ne sont pas tous dans l'orientation du faisceau, mais certains déviés sur de grands angles. Rutherford eut ainsi la surprise d'observer une sorte de rebond des particules alpha : « *C'était presque aussi incroyable que si vous aviez tiré un obus de trois cent soixante-quinze kilos sur un morceau de papier de soie et qu'il était revenu vous frapper !* ».

La majorité des particules  $\alpha$  traversent la feuille d'or sans être déviées, mais une partie de ces particules, de l'ordre de 0,01 %, sont déviées : la matière est une structure lacunaire. Elle est constituée essentiellement de vide, et c'est pour cela que la plupart des particules ne sont pas déviées. Il existe de même des îlots de charge positive qui repoussent les particules  $\alpha$ . L'ordre de grandeur de ces îlots est très petit par rapport à l'atome (de l'ordre de 100 000 fois plus petit).

Et là il faut s'arrêter quelques instants : de la définition de l'atome « insécable », plus petite partie d'un corps simple pouvant se combiner chimiquement avec un autre (Dalton, on arrive à une conception d'un atome composé **d'un noyau central dense, de faible dimension ( $10^{-15}$  m) chargé positivement et entouré d'électrons de charges négatives de taille et de masse faibles par rapport au noyau : l'atome ( $10^{-10}$  m) est constitué de vide.**

## 5. BOHR, Sommerfeld, 1913 -1916 : L'atome d'hydrogène, et les quantas

Depuis le 18<sup>ème</sup> siècle, en mesurant les spectres de différentes sources lumineuses comme le soleil ou la lampe à hydrogène, on comprend que les spectres des éléments chimiques, sont discrets et formés de raies spectrales. On comprend que le spectre d'un est la signature d'éléments chimiques : chaque élément chimique possède un spectre unique et caractéristique. Toutefois, pour chaque élément, **le nombre et la position des raies restaient inexpliqués**. Le plus simple d'entre eux, le spectre de l'hydrogène, fut alors intensivement étudié et on trouva bientôt des « séries » de raies comme celles de Lyman, Balmer, Paschen, etc., du nom de leurs découvreurs. J. Balmer trouve en 1855 une expression empirique simple qui explique la répartition des raies dans le visible et l'UV.

En 1913, Niels Bohr introduit un modèle compatible avec les observations du spectre de l'hydrogène et les hypothèses de Rutherford :

- Il existe des orbites stables sur lesquelles l'électron ne rayonne pas. Chacune d'elles correspond à une énergie bien définie de l'électron.

- L'électron peut passer d'une orbite stable à une autre, par absorption ou émission d'un **quantum d'énergie appelé photon**. L'absorption d'un photon fait ainsi passer l'électron d'une orbite basse d'énergie faible à une orbite haute d'énergie plus élevée et inversement en, émission le surplus d'énergie étant expulsé sous forme d'un photon.
- Les seuls état possibles sont ceux pour lesquelles le moment cinétique de l'électron a une valeur discrète multiple de la constante de Planck réduite  $h/2\pi$ .

En 1916, Sommerfeld, raffina la théorie de Bohr, et rendit ainsi compte de la structure fine des spectres.

## 6. L'après-guerre

*La guerre [la première guerre mondiale] avait laissé un certain désespoir au cœur de chacun ; l'après-guerre fut, néanmoins, un époque d'espérance, de foi secrète. L'Occident croyait encore que tout pouvait être sauvé. **Les toniques, après tout, ne manquaient pas : les révolutionnaires avaient Lénine, les industriels avaient Ford, les savants Einstein, les psychologues Freud, la peinture continuait sa prospérité fabuleuse.*** (Emmanuel Berl, Sylvia, 1952)

Pourquoi cette remarque ? A la suite des remises en cause du modèle classique de la fin du 19<sup>ème</sup> et au début du 20<sup>ème</sup>, **une physique nouvelle est née.**

Au 5<sup>ème</sup> congrès Solvay de 1927, dont le thème est intitulé « Electrons et photons », et où dix-sept des vingt-neuf scientifiques présents étaient ou allaient devenir prix Nobel, les initiateurs étaient présents (Einstein (48 ans), Marie Curie (60), Planck (67)), mais les bâtisseurs de la nouvelle physique étaient de hommes jeunes, voire très jeunes : Dirac avait 25 ans, Heisenberg 26, Pauli 27, de Broglie 35, Chadwick (36), Schrödinger (40) ;

**Oppenheimer 23 ans en 1927, absent de ce congrès, fait partie de cette nouvelle génération.**

Selon Galilée, **les mathématiques sont le langage de l'Univers**. C'est dans cette langue que s'imposa la nouvelle physique en développant un formalisme décrit dans des espaces mathématiques multidimensionnels, (espaces de Hilbert).

Elle a introduit un choc conceptuel énorme : celui de l'indéterminisme statistique d'Heisenberg. Les physiciens de l'école de Copenhague remirent en cause le principe fondateur de la science, la causalité, laissant sceptiques les pères fondateurs, Einstein, de Broglie, et Schrödinger.

C'est au cours de ce congrès (surement l'un des plus célèbres), que furent débattus les principes de la mécanique quantique. C'est à cette occasion qu'eurent lieu les échanges entre les représentants de l'« école de Copenhague » (Bohr, Heisenberg, Ehrenfest, ...) et

les partisans d'une physique à caractère déterminisme (Einstein, de Broglie, Schrodinger, ...) :

« Dieu ne joue pas aux dés, (Einstein)

Qui êtes-vous Einstein pour dire à Dieu ce qu'il doit faire (Bohr) »

*En résumé :*

*Le modèle standard : En résumé ce que l'on sait aujourd'hui.*

*Quatre interactions fondamentales régissent l'Univers :*

- *L'interaction électromagnétique, qui régit tous les phénomènes électriques et magnétiques. Elle peut être attractive ou répulsive. Cette interaction est liée à l'existence de charges électriques et est notamment responsable de la cohésion des atomes. Le photon est la particule élémentaire associée à l'interaction électromagnétique. Il est de charge électrique nulle et sans masse, ce qui fait que cette interaction a une portée infinie.*
- *L'interaction faible, responsable de la radioactivité Bêta, est donc à l'origine de la désintégration de certains noyaux radioactifs.*
- *L'interaction nucléaire forte, qui permet la cohésion du noyau de l'atome. Elle agit à courte portée au sein du proton et du neutron par l'échange de particules (les gluons).*
- *L'interaction gravitationnelle, décrite par la théorie de la relativité générale, négligeable à l'échelle atomique.*

*Les interactions électromagnétique, forte et faible couplée à la relativité restreinte sont décrites par le modèle standard de la physique des particules, qui est en cohérence avec la physique quantique.*

*Il existe deux grandes familles de particules les fermions (briques élémentaires de la matière, 6 quarks et 6 leptons) et les bosons (véhicules des champs de force, 4 bosons vecteurs + Higgs) qui permettent aux premiers d'interagir et de s'assembler.*