

LA MATIERE

ANNEXES

ANNEXE 3

LA THEORIE QUANTIQUE

La théorie quantique des champs :

- Le champ :

A l'origine, cette notion a été développée pour résoudre le problème de l'action à distance posée par la gravitation et le magnétisme. Il a été d'abord conçu comme l'animation d'un milieu ténu baignant toute chose.

Puis elle devint la représentation de l'ensemble des valeurs que prend une grandeur physique dans une région de l'espace.

On distingue 3 types de champs :

° Champs scalaires : Ce sont des champs à paramètre unique. Par exemple, la température qui donne une valeur en tout point de l'espace.

° Champs vectoriels : Ils fournissent 2 paramètres, l'intensité et la direction d'action d'une force. Par exemple, le champ magnétique.

° Champs tensoriels : Ils peuvent fournir un grand nombre de paramètres en tout point de l'espace. Par exemple, le champ de gravitation.

- La théorie quantique des champs :

Les théories des 3 interactions non gravitationnelles sont coulées dans un même moule, appelé la théorie quantique des champs. Celle-ci repose sur l'idée que les interactions entre particules de matière s'expliquent par la médiation d'autres particules, des particules médiatrices. On distingue ainsi des particules de matière d'une part, que leur comportement collectif fait ranger dans la théorie statistique des fermions, et des particules messagères des interactions, que l'on range dans une autre famille, celle des bosons.

En vertu de la dualité onde-corpuscule, qui est le principe fondateur de la physique quantique, il est équivalent et plus commode de décrire les particules médiatrices des interactions sous leur aspect ondulatoire, comme des champs.

Le photon est ainsi la particule qui correspond au champ électromagnétique.

Pour le champ de l'interaction faible, on dénombre 3 particules médiatrices, appelées les bosons intermédiaires. Quant à l'interaction forte, elle requiert 8 bosons de plus, appelés des gluons.

Tous les comportements des particules de matière seront alors définis selon que celles-ci sont sensibles ou non à tel ou tel champ d'interaction, et selon l'intensité du couplage qu'elles entretiennent avec lui.

Chaque particule porte ainsi un petit drapeau, sa charge, qui signale à quel champ elle est sensible.

Quant à l'intensité du couplage, elle correspond à la probabilité d'interaction de la particule chargée avec la particule messagère de l'interaction. Elle est mesurée par un nombre, la constante de couplage.

Théories ondulatoire et corpusculaire :

- Mouvement ondulatoire :

Le mouvement ondulatoire représente un transfert d'énergie d'un point à un autre sans transfert de matière, par la propagation d'ondes mécaniques ou électromagnétiques. Cette oscillation ondulatoire peut affecter des molécules de gaz (comme le font les ondes sonores dans l'atmosphère), les molécules d'un liquide, (comme les vagues à la surface de la mer), ou les atomes d'un solide, (comme les ondes qui se propagent le long d'une corde ou d'un ressort). Dans tous les cas, les particules de matière ne font qu'osciller autour d'une position d'équilibre, l'énergie de la vibration se déplaçant au cours du processus. De telles ondes sont appelées mécaniques lorsque l'énergie est transmise par le biais d'un support matériel. Seule l'onde électromagnétique se dispense de support. Ses oscillations affectent des champs électriques et magnétiques, sans nul besoin d'un milieu solide, liquide ou gazeux.

- Les différents types d'onde :

Les ondes sont classées selon leur mode de vibration, déterminé par rapport à leur direction de propagation :

° Onde longitudinale :

Lorsque la vibration est parallèle à la direction du mouvement, l'onde est dite longitudinale. Ce type d'onde a nécessairement besoin d'un support matériel pour se propager, générant sur son passage des états alternatifs de compression (densité et pression maximales) et de raréfaction (densité et pression minimales). Les ondes sonores sont un bon exemple d'ondes longitudinales, les molécules de l'air se densifiant et se raréfiant de façon ondulatoire entre la source sonore et l'oreille de l'observateur.

° Onde transversale :

L'onde est transversale lorsque les vibrations se manifestent à angle droit par rapport à la direction de propagation. Une onde transversale peut être mécanique, comme celle qui fait vibrer une corde tendue, ou électromagnétique, comme c'est le cas pour la lumière, les rayons X et les ondes radio (la vibration des champs électriques et magnétiques s'y effectue à angle droit par rapport à la direction de propagation de l'onde).

° Combinaisons longitudinale et transversale :

De nombreux mouvements ondulatoires, comme ceux que l'on observe à la surface d'un liquide, sont une combinaison de mouvements longitudinaux et transversaux. Lors du passage d'une vague, par exemple, les molécules du liquide effectuent un mouvement en boucle, retournant à leur point de départ sans déplacement matériel, alors que l'onde, elle, se propage.

- Quantification d'une onde :

Une onde peut être définie par trois grandeurs : Son amplitude, sa longueur d'onde et sa fréquence.

° L'amplitude :

Dans la vibration transversale d'une onde mécanique, l'amplitude représente son déplacement ou battement maximal par rapport à l'axe de propagation. Dans le cas d'une onde électromagnétique, l'amplitude représente l'intensité maximale du champ électrique ou magnétique associé.

° La longueur d'onde :

Elle est définie, pour sa part, comme étant la distance entre deux points semblables de deux cycles successifs, comme par exemple entre deux points d'amplitude maximale (appelés ventres) ou entre deux points d'amplitude minimale (appelés nœuds). Dans le cas d'une onde longitudinale, la

longueur d'onde est définie de façon similaire comme étant la distance entre deux compressions ou deux raréfactions successives.

° La fréquence :

Les ondes, tant transversales que longitudinales, se déplacent à des vitesses données. On appelle fréquence du mouvement ondulatoire le nombre de cycles qui se succèdent en un point donné par unité de temps. Elle correspond donc au nombre de vibrations par seconde.

La fréquence est exprimée en hertz (Hz). Une fréquence de 1 Hz correspond à 1 cycle, ou oscillation, par seconde. On a défini également les kilohertz (kHz), ou milliers de cycles par seconde, les mégahertz (MHz), ou millions de cycles par seconde, et les gigahertz (GHz), ou milliards de cycles par seconde.

Dans tous les types de mouvement ondulatoire, la vitesse de l'onde, sa fréquence et sa longueur d'onde sont en corrélation. La longueur d'onde (distance entre deux crêtes d'onde consécutives) est inversement proportionnelle à la fréquence et proportionnelle à la vitesse de l'onde. Cette relation s'exprime par l'équation $V = \lambda \cdot \gamma$, où V est la vitesse, γ la fréquence et λ la longueur d'onde.

- Les champs de forces :

Un champ est une zone de l'espace dans laquelle s'exerce une force gravitationnelle, magnétique, électrostatique ou de toute autre nature. Ces zones sont traversées par des lignes de force imaginaires, dont l'écartement est proportionnel à la force du champ.

- Théorie ondulatoire et corpusculaire :

Il a été identifié que la lumière était de nature ondulatoire, et correspondait à un phénomène électromagnétique.

Il a été prouvé, par ailleurs que l'émission et l'absorption des radiations se produisent par quantités finies d'énergie, appelées quanta d'énergie.

Puis il fut mis en évidence l'existence du photon, particule qui véhicule le rayonnement électromagnétique. Cette théorie corpusculaire remet en question la nature ondulatoire de la lumière.

Ce différend entre théorie ondulatoire et théorie corpusculaire fut levé grâce au concept de dualité onde-particule. Ce principe fondamental de la théorie quantique stipule que toute particule se comporte comme une onde et réciproquement.

Présentation de la théorie quantique :

La théorie quantique est une théorie qui étudie les mouvements, dans l'espace et dans le temps, des objets corpusculaires, et des effets ondulatoires. Autrement-dit, elle s'efforce de prédire les comportements de la matière à l'échelle microscopique.

La théorie quantique est une théorie qui utilise le concept d'unités discrètes, appelées quanta, pour décrire les propriétés dynamiques de la matière et du rayonnement. La base de la théorie quantique a été fixée en 1900 par le physicien allemand Max Planck, qui affirmait que la matière et l'énergie rayonnante ont une structure discontinue. La théorie quantique est le fondement de toute la physique moderne.

Jusqu'au XIX^e siècles, la mécanique de Newton semble fournir une description exhaustive des mouvements des corps. Puis de nouvelles observations ont mis en lumière ses limites, parmi lesquelles le spectre de la lumière émise par les gaz chauffés ou dans lesquels une décharge électrique a lieu. On découvre la nature des particules alpha (constituées de noyaux d'hélium), et on énonce la loi des transformations radioactives.

Les physiciens découvrent une interrelation pertinente entre les deux théories de la lumière. La

théorie corpusculaire, qui présente la lumière comme un flot de particules, et la théorie ondulatoire, qui la considère comme constituée d'ondes électromagnétiques.

Au début du XX^e siècle, la nature ondulatoire de la lumière semble confirmée grâce à de nombreuses expérimentations. Les phénomènes d'interférence et de diffraction permettent la détermination de la longueur d'onde de la lumière. Les phénomènes de polarisation mettent en évidence sa transversalité. Il semble confirmé que la lumière est constituée d'ondes électromagnétiques. L'interaction entre lumière et matière n'est cependant pas encore élucidée.

La notion de quantum :

Planck résout certaines difficultés théoriques en introduisant la notion de quantum.

Son hypothèse indique que l'énergie est rayonnée seulement par quanta d'énergie $h.u$, où u (upsilon) est la fréquence du rayonnement et h le quantum d'action, connu aujourd'hui sous le nom de constante de Planck, que l'on retrouve dans l'équation suivante :

$$mv^2 / 2 = hu - W \text{ avec } h = 6,67.10^{-34} \text{ J.s}$$

L'énergie cinétique $mv^2 / 2$ des électrons est donc indépendante de l'intensité, mais pas de la fréquence u du rayonnement incident. La constante de Planck h a toujours la même valeur pour tous les métaux et est donc considérée comme une constante universelle. L'énergie de liaison électron-métal W prend différentes valeurs suivant les matériaux, et si sa valeur est supérieure à $h.u$, la fréquence de la lumière est insuffisante pour libérer les électrons du métal.

La contribution d' Einstein :

Einstein propose alors une explication de l'effet photoélectrique (phénomène observé expérimentalement et au cours duquel des électrons sont émis des surfaces métalliques sur lesquelles est dirigé un rayonnement). Il s'agit de l'hypothèse photonique.

Einstein explique qu'en partant de l'hypothèse que la lumière incidente est constituée de photons d'énergie $h.u$, on parvient à expliquer l'émission des électrons suite à l'irradiation lumineuse de la manière suivante : Les photons pénètrent dans la couche superficielle du corps et leur énergie se transforme, en partie du moins, en énergie cinétique des électrons. Le cas le plus simple est celui dans lequel un photon cède toute son énergie à un seul électron. En outre, pour quitter le corps, chaque électron doit accomplir un certain travail W , caractéristique du corps. Il s'ensuit que l'énergie cinétique des électrons sortants vaut : $mv^2 / 2 = h.u - W$.

L'existence des photons est reconnue.

L'atome de Bohr :

Au début du XX^e siècle, il est déterminé l'existence du noyau dense chargé positivement et autour duquel tournent les électrons chargés négativement.

Bohr postule que les électrons se déplacent sur des orbites placées à des distances déterminées du noyau et que chaque changement d'orbite d'un électron s'accompagne d'une absorption d'énergie (s'il s'éloigne du noyau) ou d'une émission d'énergie (s'il s'en approche).

La théorie de Bohr connaît un succès retentissant pour son application à l'atome d'hydrogène.

Cependant son application aux atomes de plus d'un électron révèle des difficultés.

La mécanique ondulatoire :

Comme les ondes électromagnétiques ont des caractéristiques de particules, le physicien français Louis de Broglie suggère que les particules pourraient aussi, dans certains cas, montrer des propriétés d'ondes. Quelques années plus tard, cette prédiction est vérifiée expérimentalement. On a démontré les propriétés ondulatoires des particules.

Des équations indiquent aussi que les quatre nombres quantiques de deux électrons ne peuvent pas être les mêmes (deux électrons ne peuvent pas occuper le même état énergétique). Cette règle, déjà établie empiriquement par le physicien Pauli est appelée principe d'exclusion.

La mécanique matricielle :

Parallèlement au développement de la mécanique ondulatoire, Werner Heisenberg développe une nouvelle méthode d'analyse mathématique connue sous le nom de mécanique matricielle. D'après la théorie d'Heisenberg cette formule n'est pas une équation différentielle mais plutôt une matrice. La mécanique matricielle introduit la notion de matrices infinies pour représenter la position et le moment d'un électron à l'intérieur d'un atome. Il existe différentes matrices, pour chacune des autres propriétés physiques observables associées au mouvement d'un électron, comme l'énergie et le moment cinétique. Ces équations matricielles sont solubles. En d'autres termes, il est possible de les manipuler pour obtenir les résultats prédits, comme par exemple les différentes fréquences des raies dans le spectre de l'hydrogène et les autres grandeurs observables.

A l'instar de la mécanique ondulatoire, la mécanique matricielle est en accord avec la première théorie quantique dans tous les processus pour lesquels cette dernière confirme les observations expérimentales. Elle est même utile pour expliquer les phénomènes que la première théorie quantique ne pouvait interpréter.

L'avènement de la mécanique quantique :

Par la suite, il fut prouvé que les mécaniques ondulatoire et matricielle sont deux versions mathématiques différentes de la même théorie, aujourd'hui appelée mécanique quantique. Même pour le simple atome d'hydrogène constitué de deux particules, les deux types d'interprétation mathématique sont extrêmement complexes. Le prochain atome le plus simple, celui d'hélium, possède trois particules. Pourtant, ce problème à trois corps (qui consiste à décrire les interactions mutuelles des trois corps séparés) n'est pas encore complètement résolu, même pas dans la dynamique classique dont l'expression mathématique est relativement simple. Il est cependant possible de calculer les niveaux d'énergie. Pour l'application mathématique de la mécanique quantique à des situations relativement complexes, le physicien peut utiliser l'une des nombreuses formulations. Son choix sera déterminé par celle qui permettra d'obtenir une solution approximative convenable.

Bien que la mécanique quantique décrive les phénomènes observés en termes purement mathématiques, il est possible de donner une description grossière de ce que l'atome est censé être aujourd'hui : Une série d'ondes stationnaires entourent le noyau. Ces ondes ont des sommets en certains points. Chaque onde stationnaire complète représente une orbite. La valeur absolue du carré de l'amplitude de l'onde en un point de l'espace à un moment donné est la probabilité d'y trouver l'électron. Ainsi apparaît désormais l'impossibilité de prédire la présence d'un électron en un point précis à un moment donné (principe d'incertitude).

Le principe d'incertitude :

L'impossibilité de localiser un électron avec exactitude à un moment précis est analysée par Werner Heisenberg qui formule le principe d'incertitude. Ce principe stipule l'impossibilité de déterminer simultanément la position exacte et le moment d'une particule. En premier lieu, il est impossible de mesurer la position d'une particule sans perturber sa vitesse. Les connaissances de la position et de la vitesse sont dites complémentaires, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas être précisées simultanément. Ce principe est aussi fondamental si l'on veut comprendre la mécanique quantique telle qu'elle est conçue aujourd'hui : Les caractères ondulatoire et corpusculaire du rayonnement électromagnétique peuvent être compris comme deux propriétés complémentaires du rayonnement.

Développements connexes :

Aucun déficit essentiel n'a été, à ce jour, découvert dans la théorie quantique.

Pourtant la question de savoir si cette théorie doit être considérée comme complète a été soulevée. La mécanique quantique a résolu tous les problèmes importants. Elle a continuellement amélioré la compréhension de la structure de la matière et fourni une base théorique nécessaire à la

compréhension de la structure de l'atome et des phénomènes des raies spectrales. Chaque raie du spectre correspond à l'énergie d'un photon transmise ou absorbée lorsqu'un électron passe d'un niveau d'énergie à un autre. L'interprétation des liaisons chimiques a été radicalement transformée par la mécanique quantique et est désormais fondée sur les équations d'onde de Schrödinger. En physique, de nouveaux domaines ont vu le jour : La physique du solide, la physique de la matière condensée, la supraconductivité, la physique nucléaire et la physique des particules élémentaires qui trouvent toutes en la mécanique quantique une base cohérente.

L'application de la mécanique quantique et de la relativité sur la théorie de l'électron a permis de formuler une équation qui sous-entend l'existence du spin de l'électron. Cette équation conduira à la découverte de l'existence du positron.

L'application de la mécanique quantique au domaine du rayonnement électromagnétique permet d'expliquer beaucoup de phénomènes tels que le rayonnement de freinage (rayonnement émis par les électrons freinés dans la matière) et la formation de paires particule-antiparticule (comme la formation d'un positron et d'un électron suite à l'interaction de radiations électromagnétiques avec la matière). Néanmoins, elle soulève un problème de taille appelé difficulté de divergence : Certains paramètres, comme la masse simple et la charge simple de l'électron, semblent être infiniment grands dans les équations de Dirac. Les expressions masse simple et charge simple se réfèrent à des électrons hypothétiques n'ayant d'interaction avec aucune matière et aucun rayonnement. En réalité, les électrons ont toujours une interaction, ne serait-ce qu'avec leur propre champ électrique. Ce problème a été partiellement résolu dans le cadre d'un programme nommé renormalisation. Dans ce programme, la masse et la charge simples de l'électron sont infiniment grandes, de sorte que les autres grandeurs physiques de l'équation sont négligeables. La renormalisation a permis d'augmenter considérablement la précision avec laquelle la structure de l'atome peut être analysée.

Perspectives quantiques :

La mécanique quantique sert de base aux tentatives actuelles visant à expliquer la force nucléaire et à développer une théorie unifiée pour toutes les interactions fondamentales de la matière. Toutefois, il existe encore des doutes sur l'intégralité de la théorie quantique. La difficulté de divergence, par exemple, n'est que partiellement résolue. Au moment où la mécanique de Newton est rectifiée par la mécanique quantique et la relativité, plusieurs scientifiques ont prédit de profonds changements dans la mécanique quantique. Des difficultés d'ordre théorique persistent, notamment entre la mécanique quantique et la théorie du chaos. Des efforts visant à développer un système capable de concilier la relativité et la mécanique quantique sont actuellement déployés par des théoriciens.