



CLAUDE ASLANGUL

La théorie quantique

Initiation et premières applications

**[LICENCE
PRÉPAS
CAPES]**

- Cours
- Rappels historiques

La théorie quantique

Chimie

- BLETRY M., PRESSET M., *Chimie des solutions. De l'élémentaire aux calculs numériques*
- CACHAU-HERREILLAT D., *Des expériences de la famille Acide-Base*. 3^e éd.
- CHAQUIN P., VOLATRON F., *Chimie organique : une approche orbitale*
- CHAQUIN P., VOLATRON F., *La théorie des groupes en chimie*
- DEPOVERE P., *Chimie générale*. 3^e éd.
- DEPOVERE P., *Chimie organique*. 2^e éd.
- GIRARD F., GIRARD J., *Chimie inorganique et générale*
- KIEL M., *L'oxydoréduction*
- MARTINAND-LURIN É., GRÜBER R., *40 expériences illustrées de chimie générale et organique*
- MOUSSARD C., *Biochimie structurale et métabolique*. 3^e éd.
- MOUSSARD C., *Biologie moléculaire. Biochimie des communications cellulaires*
- PIARD J., *Chimie générale expérimentale. Tout pour réussir les TP aux concours*
- RABASSO N., *Chimie organique. Généralités, études des grandes fonctions et méthodes spectroscopiques*. 3^e éd.
- RABASSO N., *Chimie organique. Hétéroéléments, stratégies de synthèse et chimie organométallique*. 2^e éd.

Physique

- ASLANGUL C., *Mécanique quantique 1. Fondements et premières applications*. 3^e éd.
- ASLANGUL C., *Mécanique quantique 2. Développements et applications à basse énergie*. 4^e éd.
- ASLANGUL C., *Mécanique quantique 3. Corrigés détaillés et commentés des exercices et problèmes*. 2^e éd.
- BECHERRAWY T., *Optique géométrique*
- BIÉMONT É., *Spectroscopie atomique. Instrumentation et structures atomiques*
- BIÉMONT É., *Spectroscopie moléculaire. Structures moléculaires et analyse spectrale*
- CHAMPEAU R.-J., CARPENTIER R., LORGERÉ I., *Ondes lumineuses. Propagation, optique de Fourier, cohérence*
- MAYET F., *Physique nucléaire appliquée*
- RIEUTORD M., *Une introduction à la dynamique des fluides*
- TAILLET R., *Optique physique. Propagation de la lumière*. 2^e éd.
- WATZKY A., *Thermodynamique macroscopique*

Claude Aslangul

La théorie quantique

Initiation et premières applications

Pour toute information sur notre fonds et les nouveautés dans votre domaine de spécialisation, consultez notre site web : **www.deboecksuperieur.com**

© De Boeck Supérieur s.a., 2021
Rue du Bosquet, 7 – B-1348 Louvain-la-Neuve

Tous droits réservés pour tous pays.

Il est interdit, sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, de reproduire (notamment par photocopie) partiellement ou totalement le présent ouvrage, de le stocker dans une banque de données ou de le communiquer au public, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.

Dépôt légal :

Bibliothèque Nationale, Paris : octobre 2021

ISBN : 978-2-8073-3983-5

Bibliothèque royale de Belgique, Bruxelles : 2021/13647/153

À Laurence[†]

*“Experiment is the only means of knowledge
at our disposal.
Everything else is poetry, imagination.”*

Max PLANCK (1858-1947)

Préambule

Cet ouvrage s’adresse aux étudiants et élèves des établissements d’enseignement supérieur où est dispensée une introduction à la Théorie quantique. Il leur est proposé un exposé concis, cohérent et aussi peu technique que possible des bases et des premières applications de cette théorie en physique de basse énergie (atomes, molécules et solides), le tout étant articulé autour des thèmes figurant habituellement dans les programmes.

Ce choix délibéré n’est pas sans difficultés en raison du formalisme caractéristique qui charpente cette théorie et lui assure sa robustesse logique et son pouvoir explicatif. On s’est efforcé d’expliquer en termes simples le contenu de développements techniques volontairement réduits à leur plus simple expression. Il a aussi fallu, ici et là, énoncer sans démonstration des affirmations en tentant de les rendre acceptables par le contexte, certaines étant d’ailleurs destinées à piquer la curiosité du lecteur voire à provoquer une réflexion, même brève. En outre, comme pour tout apprentissage, la lecture ne doit pas être exclusivement linéaire mais doit procéder par des allers-retours permettant d’éclairer un point resté obscur à la première lecture.

D’une façon générale, si l’exposé est avant tout scolaire par nécessité, il se veut également quelque peu culturel afin de replacer les idées et les concepts dans une perspective plus large destinée à montrer comment ceux-ci s’inscrivent dans l’évolution naturelle des connaissances. Ces diversions peuvent justifier que certains passages soient survolés en première lecture ; il en va ainsi pour le chapitre 2, certainement le moins concret de tous mais qui ne peut être que le reflet de l’extraordinaire audace intellectuelle de Heisenberg et de Schrödinger. On est tenté d’en dire autant des sections 3.4 et 3.5 quoique ces dernières essaient de pointer les caractères si surprenants (et au fond si mystérieux) de la théorie quantique. Il est espéré que le lecteur saura discriminer par lui-même ce qui, sans être à proprement parler accessoire, peut être reporté à une relecture ultérieure. En outre, la simple mention ici et là de sujets non développés a pour seul but de donner quelques mots-clés permettant d’en savoir plus en consultant des ouvrages ou en faisant une recherche sur Internet.

Le premier chapitre revient sur les principaux échecs de la physique classique à propos de l’infiniment petit afin d’expliquer pourquoi, à l’aube du XX^e siècle, la nécessité s’est imposée de construire une nouvelle théorie susceptible de rendre compte des phénomènes observés.

Le chapitre 2, certainement le plus ardu, expose de façon résumée les deux démarches suivies par Heisenberg et Schrödinger pour élaborer un cadre théorique cohérent

susceptible de résoudre les difficultés. Il se termine par une introduction au spin qui, avec la fonction d'onde, est l'un des deux piliers de la théorie quantique. Il est souhaité que, une certaine familiarité avec la théorie quantique étant acquise, le lecteur y revienne par la suite pour pouvoir mieux apprécier l'extraordinaire accomplissement heuristique de Heisenberg, Schrödinger et Dirac.

Dans le chapitre 3, après une analyse détaillée de l'expérience des fentes d'Young, on passe en revue quelques comportements surprenants d'une particule avant de bien distinguer la notion de hasard suivant qu'il intervient dans les domaines classique ou quantique. Après une brève présentation de l'effet Zénon quantique, on discute certains aspects inédits de la théorie quantique et leurs conséquences (non séparabilité, intrication et téléportation). Enfin, on donne quelques clés permettant de comprendre pourquoi le monde visible est d'apparence non quantique.

Le chapitre 4 est consacré aux premières applications de l'équation de Schrödinger, après distinction entre états non stationnaires et états propres : puits de potentiel, double puits, marche et barrière (effet tunnel).

Les atomes sont essentiellement le sujet du chapitre 5 après une brève introduction phénoménologique consacrée au noyau. On montre d'abord le mode de construction des états stationnaires à partir de la notion de configuration électronique ; les structures fine et hyperfine sont ensuite présentées. Les phénomènes d'absorption et d'émission sont abordés (coefficients d'Einstein). Enfin, on dit quelques mots sur deux applications d'imagerie médicale utilisant l'une la résonance magnétique nucléaire, l'autre l'annihilation de positrons.

Le chapitre 6 présente les bases de la physique des molécules, tant en ce qui concerne les propriétés électroniques que les mouvements du squelette moléculaire. Pour les premières, on traite quelques exemples simples servant d'illustration aux méthodes de la chimie quantique, dont la méthode LCAO. Ceci fait, il est possible de discuter en détail la nature physique de la liaison chimique. Les fondements et l'utilité de la spectroscopie infrarouge et micro-onde sont enfin discutés.

Le chapitre 7 aborde la physique de la matière condensée ordinaire. La théorie élémentaire de la cohésion des différents types solides cristallisés est exposée. On explique ensuite l'importance de l'ordre spatial donnant lieu à la diffraction des rayons X et des neutrons. La physique des électrons dans un métal est ensuite décrite dans ses grandes lignes, débouchant sur la théorie des bandes et l'explication fondamentale de la distinction isolant/conducteur.

Le dernier chapitre est une sorte de conclusion revenant sur les caractères surprenants de la théorie quantique tout en insistant sur ses succès pour expliquer une immensité de phénomènes, de l'infiniment petit à l'infiniment grand – loin de toute tentative débridée d'un réductionnisme pur et dur.

On n'a pas hésité à donner de nombreuses références, y compris celles des articles originaux, afin de permettre au lecteur curieux d'aller plus loin et d'approfondir des points qui n'ont pu être développés faute de place.

Remerciements

Je suis redevable à Mme Christiane Caroli de m'avoir suggéré la rédaction de cet opuscule et d'en avoir suivi avec attention son élaboration ; c'est peu dire que ses remarques et critiques m'ont été d'une grande utilité, tout comme celles d'Oscar Bouverot-Dupuis, Jean-Noël Fuchs et Julien Vidal. Enfin, ma gratitude va à Fabrice Chrétien des Éditions De Boeck Supérieur pour avoir porté et défendu ce projet.

Table des matières

1 Pourquoi la théorie quantique ?	1
1.1 Les échecs de la physique classique	1
1.1.1 La lumière des atomes	2
1.1.2 Instabilité de l'atome classique	3
1.1.3 Inexistence du magnétisme microscopique. Violation de la loi de Dulong et Petit	4
1.1.4 L'effet photoélectrique	5
1.1.5 L'expérience de Stern et Gerlach	5
1.1.6 L'effet Compton	6
1.1.7 Le rayonnement du corps noir	7
1.2 L'hypothèse de Planck	8
1.3 Les premières tentatives : Einstein et Bohr	10
1.3.1 L'interprétation par Einstein de l'effet photoélectrique	10
1.3.2 Le modèle de Bohr (1913)	11
2 La construction de la théorie quantique	17
2.1 Heisenberg : la mécanique des matrices (été 1925)	18
2.1.1 Résumé de la démarche de Heisenberg	19
2.1.2 Introduction des représentants quantiques	21
2.1.3 Mise en évidence des matrices	22

2.2	Schrödinger : la mécanique ondulatoire (Noël 1925-1926)	24
2.2.1	Mécanique analytique et Principe de Moindre Action (PMA) . . .	25
2.2.2	Optique et Principe de Moindre Durée (PMD)	28
2.2.3	La percée de Schrödinger	29
2.2.4	Équation d'onde (équation aux valeurs propres)	31
2.2.5	Premières applications de l'équation d'onde	31
2.2.6	L'équation de Schrödinger	32
2.3	Dirac : le grand unificateur	34
2.3.1	Conséquences de la linéarité de l'équation de Schrödinger. Postulats	35
2.3.2	Fluctuations quantiques et relation d'indétermination de Heisenberg	36
2.4	Le spin	37
2.4.1	Spin et magnétisme	38
2.4.2	Bosons et fermions	38
3	Premières surprises	41
3.1	L'expérience des fentes d'Young	41
3.1.1	L'expérience historique	41
3.1.2	La même expérience avec des particules	43
3.1.3	Retour sur l'expérience historique avec une faible source lumineuse	44
3.2	Autres exemples de bizarreries quantiques	45
3.2.1	La réduction du paquet d'ondes	45
3.2.2	Ce que peut faire une "bille" quantique	47
3.2.3	L'effet Zénon quantique	48
3.3	La non séparabilité, l'intrication et la téléportation	50
3.3.1	Deux systèmes inséparables	51
3.3.2	Le paradoxe EPR	51
3.4	Hasard classique et hasard quantique	52
3.5	Pourquoi le monde visible est-il "non quantique"	55

4	Premières applications de l'équation de Schrödinger	59
4.1	États non stationnaires et états propres	59
4.2	Fonction d'onde d'une particule libre	61
4.2.1	Combinaison d'ondes planes : paquet d'ondes	62
4.2.2	Définition formelle de la vitesse de groupe	63
4.3	Puits de potentiel fini	64
4.4	Puits de potentiel infini	73
4.4.1	Comparaison des situations quantique et classique	74
4.4.2	Exemple d'état non stationnaire représenté par une série de Gauss	75
4.5	Marche de potentiel	77
4.6	Barrière de potentiel. Effet tunnel	81
4.6.1	L'effet tunnel	82
4.6.2	Applications de l'effet tunnel	84
4.7	Double puits symétrique	85
5	Les atomes	89
5.1	Phénoménologie du noyau	89
5.1.1	Classification empirique des rayonnements radioactifs	90
5.1.2	Découverte des isotopes	90
5.1.3	Les nucléons. Physiologie du noyau	91
5.1.4	Édification et stabilité des noyaux	92
5.2	Construction des états d'un atome	93
5.2.1	Le "Principe d'exclusion" de Pauli (1925)	94
5.2.2	Configuration électronique d'un atome	97
5.2.3	États excités d'un atome	99
5.3	Structure fine et hyperfine	102

5.4	Émission spontanée d'un atome	104
5.4.1	La Règle d'or de Fermi	105
5.4.2	Les règles de sélection	106
5.5	Les coefficients d'Einstein	106
5.6	De l'atome à l'imagerie médicale	107
5.6.1	L'imagerie par résonance magnétique (IRM)	108
5.6.2	La tomographie par émission de positrons (TEP)	109
6	Les molécules et la chimie	111
6.1	L'approximation de Born et Oppenheimer	111
6.1.1	Ordres de grandeur des énergies d'une molécule	112
6.1.2	Degrés de liberté nucléaires	113
6.1.3	Hamiltonien d'une molécule	115
6.1.4	Transitions électroniques	117
6.1.5	Mouvements nucléaires	118
6.2	Structure électronique des molécules	119
6.2.1	L'ion moléculaire H_2^+	120
6.2.2	Méthodologie pour une description approchée	121
6.2.3	La molécule de dihydrogène : la méthode de Heitler-London	124
6.2.4	La molécule de benzène	129
6.3	Nature physique de la liaison chimique	133
6.4	Mouvement des noyaux. Spectres de vibration et de rotation	135
7	Les solides	141
7.1	Préliminaires	141
7.2	Énergie de cohésion des solides ordonnés	145
7.2.1	Présentation	145

7.2.2	Cohésion des solides moléculaires	146
7.2.3	Cohésion des cristaux ioniques	150
7.2.4	Cohésion des métaux	151
7.3	Ordre spatial d'un cristal. Diffraction	155
7.3.1	Réseaux. Structure physique d'un réseau	155
7.3.2	Diffraction par un réseau	158
7.3.3	Facteurs de structure (géométrique et atomique)	163
7.4	Électrons dans un métal : théorie des bandes	165
7.5	Conducteurs, semi-conducteurs et isolants	169
7.5.1	Conductivité σ	170
7.5.2	Distinction isolant/conducteur	171
7.5.3	Dynamique et dissipation	174
8	Une si étrange théorie	177
	Bibliographie	183
	Index	189

Chapitre 1

Pourquoi la théorie quantique ?

“Quantum theory –
that most exact and
mysterious of physical theories”
(Roger PENROSE, 1931-)

Ce chapitre est d'abord consacré à un bref inventaire des graves difficultés rencontrées par les théories classiques pour expliquer certains phénomènes impliquant l'infiniment petit et le rayonnement. Dans un deuxième temps, l'hypothèse révolutionnaire de Planck est énoncée, reprise par Einstein pour son explication de l'effet photoélectrique. Enfin, le modèle atomique de Bohr est brièvement décrit.

1.1 Les échecs de la physique classique

Jusque vers la fin du XIX^e siècle, la physique classique était triomphante : la mécanique de Newton, l'électromagnétisme de Maxwell et la thermodynamique de Carnot, Kelvin et Clausius rendaient parfaitement compte de tous les phénomènes observés et avaient même connu des succès spectaculaires – que l'on pense à la prévision de l'existence de Neptune par Le Verrier (1846) par l'étude fine des irrégularités du mouvement d'Uranus. En revanche, à partir de 1860 environ, il est devenu possible de mener des expériences impliquant – sans qu'on le sache toujours – le monde microscopique ; elles mirent peu à peu en évidence l'incapacité des théories alors en vigueur à rendre compte de certaines observations expérimentales.

1.1.1 La lumière des atomes

Chronologiquement, l'une des premières difficultés résidait dans la compréhension de la lumière émise par les atomes¹ (leur *spectre*) dont **l'étude fut initiée par Ångström², vite suivi par Balmer³**. En effet, selon la théorie classique, un atome devrait émettre de la lumière répartie *continûment* en fréquence : dans tout modèle mécanique de l'atome vu comme un dipôle électrique oscillant, toutes les conditions initiales étant possibles, toutes les fréquences le sont également puisque ces conditions initiales déterminent précisément les fréquences du mouvement mécanique. Or il est apparu que le spectre des atomes est au contraire constitué de raies distinctes bien séparées – de la lumière en certains endroits et rien ailleurs – formant une sorte de peigne aux dents irrégulièrement espacées (voir figure 1.1). L'existence de fréquences autorisées et de fréquences interdites est donc classiquement incompréhensible.

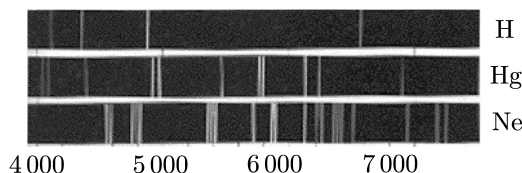


Figure 1.1 – Spectre de raies dans le visible pour l'hydrogène, le mercure et le néon. La longueur d'onde est en abscisse, exprimée en Å ($1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$).

Fait d'ailleurs remarquable, cet ensemble de raies est caractéristique d'un atome et constitue en quelque sorte l'empreinte digitale de l'élément chimique correspondant ; cette spécificité permet de détecter à distance la présence d'un atome⁴ par des méthodes purement spectroscopiques et non destructrices.

¹ Rappelons toutefois qu'à l'époque, le débat était vif sur l'existence même des atomes. On doit à Boltzmann d'avoir enfoncé un coin définitif dans les thèses défendues par ceux qui n'y croyaient pas ; la belle biographie de Boltzmann par Cercignani [1] porte d'ailleurs le sous-titre "*The man who trusted the atoms*".

² Anders Jonas Ångström (1814-1874) était un physicien suédois. Pionnier de l'étude des spectres atomiques, c'est lui qui découvrit en 1862 la présence d'hydrogène dans l'atmosphère du Soleil et, la même année, il affirma aussi que l'atmosphère du Soleil contenait de l'azote.

³ Après un doctorat portant sur la cycloïde, Johann Jakob Balmer (1825-1898) fut toute sa vie maître d'école à Bâle, où il enseigna les mathématiques, et était passionné de numérologie [2].

⁴ Dans un tube scellé contenant une source radioactive α apparaît la lumière caractéristique de l'hélium, dans les atmosphères d'étoiles on "voit" l'hydrogène (Ångström, 1862) ; le nom "hélium" vient de *helios* car l'hélium a été identifié par Lockyer grâce à l'observation dans l'atmosphère solaire d'une raie jaune à 584.75 nm ne correspondant à aucun élément connu à l'époque – mais cette raie mystérieuse avait déjà été signalée par l'astronome Pierre Jules Janssen lors de l'éclipse solaire totale du 18 août 1868. L'inertie chimique et la faible masse de l'hélium expliquent en partie que ce gaz rare ne fut pas détecté plus tôt par des expériences courantes. La découverte de la présence d'hélium sur la Terre est due à Ramsay, qui en trouva dans un minerai d'uranium (1895).

1.1.2 Instabilité de l'atome classique

S'agissant toujours de l'atome, une grave difficulté était sa **pérennité**. En effet, le sachant électriquement neutre, on l'imaginait comme étant le siège de mouvements de particules les unes chargées positivement, les autres négativement en nombre égal, mouvements dont on ignorait d'ailleurs la nature précise ; ces particules étant confinées dans l'espace, leur accélération n'est pas nulle. Or, depuis Maxwell et ses équations, on savait qu'une particule chargée accélérée est une source de rayonnement vers l'extérieur et donc perd peu à peu son énergie initiale ; en conséquence l'électron orbite en se rapprochant sans cesse du centre qui l'attire de sorte que, tôt ou tard, l'atome n'existe plus en tant que tel. En mettant des nombres dans le problème, et quel que soit le modèle précis adopté⁵, on arrive à la conclusion que la durée de vie de l'atome est de l'ordre de 10^{-9} seconde. L'atome classique, considéré comme un système purement mécanique, est donc électrodynamiquement instable.

En rapport avec cette **instabilité électrodynamique** foncière de l'atome classique, des développements dans le même cadre ont mis en évidence d'autres problèmes de première importance, cette fois au plan des principes fondamentaux auxquels doit satisfaire toute méthodologie scientifique. On peut ainsi citer le **modèle d'Abraham-Lorentz** décrivant la réaction sur une particule accélérée de son propre rayonnement, l'idée étant de représenter la perte d'énergie de la particule de vitesse $\vec{v} \equiv \dot{\vec{r}}$ comme l'effet d'une force de freinage $\vec{F}_{\text{rad}}$, dont le travail élémentaire est $\vec{F}_{\text{rad}} \cdot \vec{v} dt$. Par un bilan d'énergie et la comparaison avec la formule classique de Larmor donnant la puissance rayonnée en raison de l'accélération, on trouve $\vec{F}_{\text{rad}} = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \ddot{\vec{v}} \propto \ddot{\vec{r}}$; l'apparition d'une dérivée *troisième* provoque la surprise (elle est d'ordre *supérieur* au terme d'inertie!), mais il y a bien plus grave puisque, introduite dans l'équation de Newton, elle provoque ni plus ni moins qu'une violation de la causalité. On trouve en effet que, soumise à une force-échelon F_0 , une particule chargée se met en mouvement *avant* l'application de F_0 ... Si cet intervalle de temps⁶ τ est tout petit, de l'ordre de 10^{-24} s, ceci n'en est pas moins gravissime : nul ne peut admettre que l'effet⁷ puisse *précéder* la cause !

⁵ À l'époque, deux modèles d'atomes avaient été avancés. Le premier était celui de Jean Perrin où des électrons circulaient autour d'un centre positif très petit plus tard appelé noyau (système *planétaire*) ; le second était celui de Joseph John Thomson (le découvreur de l'électron en 1897) où des électrons se déplaçaient dans une sorte de pâte positive (système *globulaire*). Les expériences de Rutherford à partir de 1910 permirent d'éliminer le modèle de Thomson.

⁶ Très précisément, $\tau \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 mc^3}$ est le seul temps que l'on peut construire (à un facteur numérique près) à partir des constantes fondamentales disponibles ; de façon imagée, c'est en fait le temps mis par la lumière pour traverser l'électron *supposé* être – ce que l'on imaginait à l'époque – une petite bille de rayon $r_e \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 mc^2} \sim 10^{-15}$ m (“rayon classique de l'électron”).

Pour en savoir plus sur cette question (*préaccélération d'une particule chargée*), voir [3], chapitre 16.

⁷ Le principe de causalité est l'une des clés de voûte de la physique – selon Leibniz “Jamais rien n'arrive sans qu'il y ait une cause ou du moins une raison déterminante...” (Théodicée, I, 44, (1710)). Dans cette affirmation se cache la nécessité d'une *antériorité* de la cause par rapport à l'effet.

1.1.3 Inexistence du magnétisme microscopique. Violation de la loi de Dulong et Petit

Une autre difficulté majeure concernait le **magnétisme**. On doit à Miss van Leeuwen⁸ (une élève de Bohr et de Lorentz) un résultat montrant que si l'on applique à la lettre toutes les prescriptions classiques, aucun moment magnétique microscopique ne peut exister. Très schématiquement, tout moment magnétique $\vec{\mu}$ (microscopique ou non d'ailleurs) est proportionnel à un moment cinétique, lui-même fonction *linéaire* d'une certaine vitesse $\vec{v}$. La moyenne thermodynamique à la température T passe par une intégration (somme *continue*) sur positions et vitesses avec un facteur de Boltzmann *pair* par rapport à $\vec{v}$, donnant finalement une moyenne $\langle \vec{v} \rangle$ nulle, donc $\langle \vec{\mu} \rangle = 0$ en toute circonstance ! S'il fut néanmoins possible, grâce à Langevin [5], d'élaborer une théorie classique du paramagnétisme⁹, celle-ci *postulait* l'existence de moments magnétiques microscopiques mais n'en interrogeait l'origine en aucune façon, la source première du magnétisme restant au fond un mystère total.

D'autres faits étaient en contradiction avec ce qui était admis à l'époque. Un exemple est la chaleur spécifique des solides¹⁰ : selon la **loi de Dulong et Petit** (1819) cette grandeur est une constante, indépendante de la température. La première observation d'une déviation significative est due à F.H. Weber (1872) qui nota une chute importante du côté des basses températures ($\sim -50^\circ\text{C}$), schématisée sur la figure 1.2. Cette expérience fut peu après confirmée par d'autres, permettant à Behn de suggérer en 1898 que toute chaleur spécifique tend vers zéro à température nulle. Inexplicable à l'époque, cette décroissance rapide est en fait, comme on le comprendra bien plus tard, la signature de la *quantification* de l'énergie.

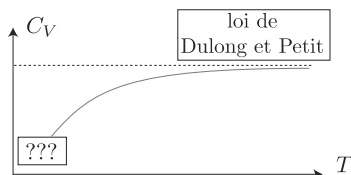


Figure 1.2 – Allure schématique de la chaleur spécifique d'un solide. À haute température C_V tend vers une constante mais chute assez rapidement à basse température.

⁸ Hendrika Johanna van Leeuwen, Dissertation, Leiden 1919, et [4].

Selon van Vleck (voir son discours de réception du Nobel, 8 décembre 1977), Bohr avait déjà établi ce résultat en 1911, d'une autre façon.

⁹ Le paramagnétisme désigne l'aimantation induite dans un échantillon par un champ magnétique appliqué $\mathcal{B}$. Sous l'effet de celui-ci, les moments magnétiques (quand ils existent !) s'orientent préférentiellement le long du champ, ce qui donne lieu à une aimantation macroscopique $\mathcal{M}$ proportionnelle au champ, $\mathcal{M} = \chi \mathcal{B}$, la susceptibilité χ obéissant à la loi de Curie, $\chi \propto \frac{1}{T}$, où T est la température absolue.

¹⁰ Toutes choses égales par ailleurs, la chaleur spécifique est le taux de variation de l'énergie avec la température absolue T .



La théorie quantique

Initiation et premières applications

Ce livre s'adresse principalement aux étudiants des premières années d'enseignement supérieur et pourra aussi être utile aux professeurs désireux d'avoir un aperçu de la Théorie quantique sans devoir se plonger dans les ouvrages volumineux et inévitablement très techniques exposant cette théorie avec l'objectif de l'exhaustivité.

Si l'exposé est «scolaire» par nécessité, il se veut également culturel en resituant les problématiques abordées dans une perspective plus large afin de montrer comment elles se placent dans l'évolution naturelle des connaissances. L'élaboration historique est exposée dans ses grandes lignes afin de montrer comment une théorie peut être construite par essai et erreur dans une confrontation systématique entre expériences et tentatives théoriques. Cet aspect des choses est trop souvent mis de côté quand il n'est pas tout simplement délaissé.

Si l'auteur déborde parfois des programmes habituels, c'est afin de piquer la curiosité des lecteurs et de montrer l'immensité du pouvoir explicatif d'une théorie qui reste, aujourd'hui encore, fort mystérieuse.

LES PLUS

- Introduction accessible
- Nombreux rappels historiques
- Invitation à aller plus loin dans la théorie quantique

Claude Aslangul, professeur émérite à Sorbonne Université, a enseigné de nombreuses années à l'École Normale Supérieure (Ulm). Il a été membre du Laboratoire de Physique Théorique de la Matière Condensée (Jussieu).

ISBN : 978-2-8073-3983-5



deboeck
SUPÉRIEUR

www.deboecksuperieur.com