

SCIENCES SUP

Cours

Licence 1^{re}, 2^e et 3^e années

INITIATION À LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

Approche élémentaire et applications

Elie Belorizky

530-39.1

DUNOD

Table des matières

AVANT-PROPOS	1
CHAPITRE 1 • LES ASPECTS QUANTIQUES DU RAYONNEMENT ET DE LA MATIÈRE	3
1.1 Les échecs de la mécanique et de l'électromagnétisme classiques	3
1.1.1 L'instabilité des atomes	4
1.1.2 Les chaleurs spécifiques	6
1.2 Le rayonnement du corps noir	7
1.3. L'effet photoélectrique	10
1.4 Quelques applications de l'effet photoélectrique	13
1.4.1 Le multiplicateur d'électrons	13
1.4.2 Le télescope infrarouge	14
1.4.3 L'icôneoscope	15
1.5 L'effet Compton	15
1.6 L'annihilation et la création de paires électron-positron	18
1.7 Les aspects corpusculaires et ondulatoires de la lumière	20
1.8 Les postulats de Bohr. La quantification de l'énergie	21
1.8.1 La multiplicité des niveaux	22
1.8.2 La durée de vie des niveaux	23
1.9 L'expérience de Franck et Hertz	23

CHAPITRE 2 • L'ANCIENNE MÉCANIQUE QUANTIQUE	27
2.1 La théorie de Bohr-Sommerfeld	27
2.2 Quelques applications	29
2.2.1 Particule dans un puits rectangulaire infiniment profond	29
2.2.2 Particule enfermée dans une boîte parallélépipédique	29
2.2.3 Le mouvement circulaire uniforme	30
2.3 L'atome d'hydrogène	31
2.3.1 La correction d'enlèvement	34
CHAPITRE 3 • LE PRINCIPE D'INCERTITUDE ET L'ASPECT ONDULATOIRE DE LA MATIÈRE	37
3.1 Le principe d'incertitude de Heisenberg	37
3.2 La quatrième relation d'incertitude	40
3.3 La vitesse de phase et la vitesse de groupe	42
3.4 L'onde associée de Louis de Broglie	45
3.5 La diffraction des rayons X et des électrons	48
3.6 Applications	50
3.6.1 La microscopie électronique	50
3.6.2 La diffraction neutronique	51
3.7 L'onde associée et le principe d'incertitude	52
3.8 Les ondes stationnaires et la quantification de l'énergie	53
CHAPITRE 4 • LA NOTION DE FONCTION D'ONDE. L'ÉQUATION DE SCHRÖDINGER ET SES APPLICATIONS	55
4.1 Les fonctions d'onde	55
4.2 Le principe de superposition linéaire des états	57
4.3 La probabilité de présence	58
4.3.1 Les états liés	58
4.3.2 Les états non liés	59
4.4 L'Équation de Schrödinger	60

4.5 Les états liés d'un puits de potentiel	63
4.6 L'étude des discontinuités de potentiel	67
4.7 Les premières applications	67
4.7.1 Particule dans un puits rectangulaire infiniment profond	67
4.7.2 Particule dans une boîte parallélépipédique	69
4.8 L'oscillateur harmonique à une dimension	70
4.9 Les états non liés. L'effet tunnel	72
4.10 La transparence d'une barrière rectangulaire	74
4.11 L'approximation semi-classique	75
4.11.1 Application à la radioactivité α	77
4.12 Les interférences quantiques	80
CHAPITRE 5 • LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ET SES PERSPECTIVES	83
5.1 L'équation d'évolution de Schrödinger	83
5.2 La quantification du moment cinétique	84
5.2.1 Le moment cinétique orbital	84
5.2.2 Le moment magnétique orbital	86
5.2.3 Le spin d'une particule	86
5.2.4 La composition des moments cinétiques	87
5.3 L'atome d'hydrogène	89
5.4 L'atome à plusieurs électrons. Principe de Pauli	91
5.5 Quelques étapes importantes	94
5.6 Les interactions et les particules fondamentales	97
5.6.1 Les quarks	99
5.6.2 L'interaction électrofaible	100
5.7 Le rayonnement cosmique de l'Univers	101
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	103

ANNEXES	105
1. Compléments à la théorie du corps noir (chap. 1, §2)	105
2. Formation d'un paquet d'onde (chap. 3, §3)	107
BIBLIOGRAPHIE	109
INDEX	111

Avant-propos

La mécanique quantique et la théorie de la relativité représentent les deux plus grandes avancées conceptuelles de la physique au xx^e siècle. Il est impossible de comprendre les phénomènes de la microphysique (physique des atomes des molécules, des noyaux et des particules élémentaires) sans la mécanique quantique. Cette dernière repose sur un certain nombre de postulats, certes tout à fait justifiables, mais qui ont longtemps rebuté nombre de physiciens de formation classique. Il faut cependant souligner que cette mécanique n'a jamais été mise en défaut par aucune expérience, et qu'elle permet d'interpréter et de prévoir une multitude de phénomènes. Pour ne citer que quelques exemples, elle permet de calculer l'énergie d'ionisation d'un atome, la longueur d'onde de ses raies d'émission, l'énergie de liaison d'une molécule d'hydrogène, de comprendre le phénomène de radioactivité, l'origine du magnétisme, de la supraconductivité, de prévoir l'existence de nouvelles particules, etc. Notons également l'étendue des applications technologiques de première importance liées à la mécanique quantique telles que les semi-conducteurs, les lasers, la microscopie électronique, la diffraction neutronique, la résonance magnétique nucléaire.

Cependant, une étude approfondie de la mécanique quantique nécessite un formalisme mathématique assez ardu pour un débutant. Il existe un grand nombre d'ouvrages de très bonne qualité, édités en France et à l'étranger, qui abordent le sujet à des niveaux plus ou moins élevés.

Le but de ce livre, qui s'adresse à des étudiants du niveau de seconde année du premier cycle universitaire, est d'introduire ce domaine avec un minimum de connaissances au départ.

Nous expliquerons d'abord la nécessité de la mécanique quantique à partir de phénomènes expérimentaux relativement simples. Puis nous introduirons quelques concepts fondamentaux à la base de cette théorie et nous donnerons des exemples d'applications à divers phénomènes physiques concernant notamment la structure atomique. Enfin, nous montrerons que la mécanique quantique reste une science vivante et, sans entrer en détail dans les développements considérables apportés ces dernières années par les physiciens des hautes énergies travaillant avec des grands accélérateurs, nous évoquerons quelques progrès récents dans son interprétation. Nous mentionnerons aussi certains problèmes qui font encore l'objet de recherches.

Le lecteur sera alors bien armé pour aborder des ouvrages beaucoup plus complets sur ce volet fondamental de la physique moderne.