

INTRO UNE INTRODUCTION À TION DUC

LE MONDE QUANTIQUE

Michel Le Bellac

Préface d'Alain Aspect



Collection « Une Introduction à »
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

Le monde quantique

Michel Le Bellac

Préface d'Alain Aspect



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Imprimé en France.

© 2010, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-0443-6



Ancien élève de l'École normale supérieure, Michel Le Bellac, a d'abord passé cinq ans au CNRS à Orsay. Il a rejoint en 1967 comme professeur l'Université de Nice-Sophia Antipolis où il a effectué la suite de sa carrière, en dehors de trois années passées au CERN à Genève. Il est professeur émérite de l'Université de Nice-Sophia Antipolis depuis 2002. Ses recherches ont porté sur la physique théorique des particules élémentaires puis sur la théorie des champs à température finie et le plasma quark-gluon, sujet sur lequel il a écrit *Thermal Field Theory* (Cambridge University Press, 1996). Il a écrit récemment plusieurs manuels de physique de niveau M1/M2 : *Thermodynamique statistique*, en collaboration avec G. Batrouni et F. Mortessagne (Dunod, 2000), *Physique quantique* (EDP Sciences/CNRS Éditions, 2003, seconde édition en 2007), *Information quantique* (Belin, 2005). Tous ces livres ont été traduits en anglais et publiés par Cambridge University Press.

Vj ku' r ci g' k' p v g p v k' p p c m { ' i g h v' d i e p m

Table des matières

Préface	7
Avant-propos	11
1 Un principe qui dérange	17
1.1 Les ondes de la physique classique	18
1.2 L'interféromètre de Mach-Zehnder	21
1.3 Photons	23
1.4 Photons dans l'interféromètre de Mach-Zehnder	29
1.5 L'interféromètre de Mach-Zehnder revisité	31
1.6 Particules quantiques	33
1.7 Choix retardé et mesure « sans interaction »	38
1.8 Bibliographie	41
2 Des transmissions sécurisées	43
2.1 La cryptographie classique : clé secrète et clé publique	43
2.2 Polarisation de la lumière	46
2.3 Polarisation d'un photon	49
2.4 Le protocole BB84 pour la cryptographie quantique	52
2.5 Bibliographie	56
3 Einstein, Bohr et la physique quantique	57
3.1 Des communications supraluminales?	58
3.2 Une inégalité remarquable	59
3.3 Et la physique quantique?	61
3.4 L'expérience d'Aspect	64
3.5 Bibliographie	69

4	Atomes, lumière, lasers	71
4.1	Particules et ondes classiques sur une droite	72
4.2	Particule quantique dans un puits de potentiel	75
4.3	Inégalités de Heisenberg et niveaux d'énergie	77
4.4	Atomes	81
4.5	Lasers	83
4.6	Bibliographie	89
5	Des atomes très froids	91
5.1	Qu'est-ce que la température ?	91
5.2	Refroidir les atomes	95
5.3	Condensats de Bose-Einstein	105
5.4	Bibliographie	111
6	Le règne des semi-conducteurs	113
6.1	Conducteurs et isolants	113
6.2	Semi-conducteurs	119
6.3	Interaction avec un champ électromagnétique	123
6.4	Hétérostructures et diodes laser	124
6.5	Bibliographie	129
7	Physique quantique et relativités	131
7.1	Théorie relativiste des champs quantiques	131
7.2	Le modèle standard de la physique des particules	139
7.3	La gravitation quantique	144
7.4	Bibliographie	149
8	Vers l'ordinateur quantique ?	151
8.1	Bits et portes logiques quantiques	152
8.2	Algorithmes quantiques	157
8.3	Algorithmes quantiques et complexité algorithmique	162
8.4	Réalisations physiques	163
8.5	Bibliographie	165
9	L'environnement surveille	167
9.1	La décohérence : un exemple élémentaire	167
9.2	Décohérence environnementale	172
9.3	Bibliographie	177

10 Interprétations	179
10.1 L'interprétation de Copenhague	180
10.2 La théorie de von Neumann	186
10.3 L'appareil de mesure est macroscopique	190
10.4 Interprétations non standard	194
10.5 Conclusion	196
10.6 Bibliographie	198
11 Annexes	199
Index	223

Vj k'ŕ ci g'kpvkqpcmf 'igh'dicpm

Préface

L'écriture d'un livre de vulgarisation – il vaudrait mieux parler de « popularisation » comme les anglophones – est toujours une entreprise difficile. Quand il s'agit de physique quantique, monde dans lequel nos repères et notre expérience courante ne nous permettent pas de construire des images, il s'agit d'un défi majeur. C'est ce défi que Michel Le Bellac a décidé de relever. Il faut l'en féliciter car la physique quantique a connu des bouleversements majeurs au cours des dernières décennies, et il est indispensable de mettre à la disposition du public des ouvrages lui permettant de comprendre de quoi il s'agit lorsqu'il entend parler d'intrication, de décohérence, de condensats de Bose-Einstein, de cryptographie quantique, d'ordinateur quantique.

La physique quantique est née au début du XX^e siècle, avec les travaux fondateurs de Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, bientôt suivis par la mise en forme cohérente par Heisenberg, Schrödinger et Dirac du formalisme mathématique encore utilisé aujourd'hui. Il permet de décrire l'ensemble des phénomènes microscopiques qui échappent à l'électrodynamique classique, synthèse des deux grandes théories physiques achevées au XIX^e siècle, la mécanique d'une part et l'électromagnétisme de l'autre. Les plus grands physiciens tels Lorentz avaient en effet échoué dans leurs tentatives de comprendre la stabilité de la matière, dont on savait qu'elle était composée de charges positives et négatives qui, en s'attirant, auraient dû aboutir à l'effondrement de la matière sur elle-même. Le modèle d'atome de Rutherford, sorte de système solaire où les électrons tournent autour du noyau comme les planètes autour du Soleil, n'échappait pas à l'objection car une charge électrique que l'on force à changer de direction émet du rayonnement (c'est le principe des sources de rayonnement synchrotron). Elle perd donc de l'énergie et va finir par tomber sur le noyau, comme un satellite freiné par les frottements sur les couches supérieures de l'atmosphère finit par tomber sur la terre. S'appuyant sur les idées de granularité du rayonnement dues à Planck et Einstein, Niels Bohr émit l'hypothèse radicale que les orbites des électrons elles aussi ne pouvaient prendre que certaines valeurs particulières, déterminées à partir de la constante de Planck dont la valeur était déduite de mesures sur le rayonnement. C'est de Broglie et Schrödinger qui donnèrent une interprétation de la quantification de ces trajectoires en termes d'ondes

de matière qui, comme les vibrations des cordes d'une guitare, ne peuvent prendre que des fréquences particulières. La mécanique ondulatoire était née. Au même moment, Heisenberg développait un formalisme totalement différent, la mécanique des matrices, qui aboutissait aux mêmes valeurs, en accord avec les mesures spectroscopiques, pour les longueurs d'onde des radiations émises par l'atome d'hydrogène. Dans une synthèse éblouissante, Schrödinger montrait l'équivalence entre les deux approches, et Dirac décrivait l'ensemble dans un formalisme d'une élégance sublime, que nous utilisons toujours. La mécanique quantique sous sa forme moderne était à la disposition des physiciens. Ses succès étaient innombrables puisqu'elle permettait enfin de comprendre la structure de la matière et sa stabilité, ainsi que ses propriétés mécaniques, électriques, thermiques et optiques. Elle permettait également de décrire des phénomènes stupéfiants comme la superfluidité de l'hélium, c'est-à-dire l'absence totale de résistance à l'écoulement de ce liquide, ou la supraconductivité électrique, le fait que certains matériaux, portés à une température suffisamment basse, peuvent conduire le courant électrique sans aucune perte. Enfin, au lendemain de la seconde guerre mondiale, la mécanique quantique allait permettre deux inventions qui devaient bouleverser nos sociétés, le transistor et le laser. Sans ordinateurs, dont la puissance résulte de l'intégration d'un nombre immense de transistors, et sans communications par fibres optiques rendues possibles par les lasers, nous ne serions pas entrés dans la société de l'information et de la communication. Il n'est donc pas exagéré de parler de *révolution quantique*, pour désigner cet impressionnant ensemble de progrès d'abord dans notre compréhension de la structure et des propriétés de la matière, puis dans des technologies nouvelles allant des autoroutes de l'information aux ordinateurs portables, en passant par l'imagerie médicale par résonance magnétique.

Cette révolution scientifique et technique de la première partie du XX^e siècle s'est accompagnée d'une autre révolution tout aussi radicale, dans la façon dont nous nous représentons le monde. Avec la mécanique quantique il a fallu admettre que les particules se comportent parfois comme des ondes, et réciproquement que la lumière, dont la plupart des propriétés sont celles d'une onde électromagnétique, se comporte parfois comme un flux de particules, les photons. Cette *dualité onde-particule* est au cœur de la plupart des phénomènes quantiques connus en 1960, au point que Richard Feynman n'hésitait pas à écrire à son sujet, dans son fameux cours de physique : « un phénomène qu'il est impossible, absolument impossible, d'expliquer de façon classique, et qui porte en lui le cœur de la mécanique quantique. En réalité, il contient le seul mystère ».

En fait les années 1960 allaient voir l'émergence d'une *nouvelle révolution quantique*, basée d'abord sur la prise de conscience de l'importance d'un autre concept quantique, *l'intrication*, introduit en 1935 par Einstein et ses collègues Podolsky et Rosen d'une part, et Schrödinger d'autre part. Il s'agit de la propriété que peuvent

avoir plusieurs particules quantiques de former un tout que l'on ne peut pas décrire correctement en se contentant de donner l'ensemble de toutes les propriétés de chaque particule. Le tout est plus que l'ensemble des parties, et cela même si les parties sont parfaitement séparées dans l'espace-temps, de sorte que la relativité interdit toute communication entre ces parties, par quelque interaction que ce soit. Cela se traduit par l'existence de corrélations beaucoup plus fortes que celles que la physique classique autorise, comme le montre la violation des inégalités de Bell, amplement vérifiée par l'expérience. Il fallut attendre la découverte de ces inégalités, en 1964, pour que l'on comprenne l'importance de l'intrication, et c'est à de telles inégalités que se réfère le même Feynman lorsqu'il finit par écrire, en 1982 : « Je me suis toujours illusionné en ramenant la difficulté de la mécanique quantique à un élément de plus en plus petit, et en étant de plus en plus ennuyé par cet élément. Il peut sembler ridicule de pouvoir le ramener à la question numérique de savoir si une chose est plus grande qu'une autre. Mais voilà, elle est plus grande que ce que n'importe quel raisonnement logique peut prédire. . . ». Au-delà de la révolution conceptuelle entraînée par la prise de conscience du caractère radicalement nouveau de l'intrication, une révolution scientifique allait immédiatement suivre, dont les prémices se trouvaient explicitement dans l'article de Feynman que nous venons de citer : il s'agit de la possibilité de concevoir des *ordinateurs quantiques*, dont la puissance de calcul serait exponentiellement plus grande – au sens exact du terme, que n'importe quel ordinateur classique. À la même époque, à partir des années 1960, les physiciens devenaient capables d'isoler, de contrôler et d'observer des *objets quantiques uniques*, qu'il s'agisse d'un électron, d'un photon, d'un ion, d'un atome ou d'une molécule. L'ensemble de ces avancées conceptuelles et expérimentales ont permis le développement rapide d'un nouveau champ de recherche, *l'information quantique*, qui se propose d'utiliser les ressources les plus extraordinaires de la physique quantique, et en particulier l'intrication, pour traiter et transmettre l'information. Il est trop tôt pour savoir si les progrès remarquables déjà obtenus aboutiront à la révolution technologique énorme que constituerait la réalisation d'un ordinateur quantique, mais les conséquences d'un tel succès justifieraient amplement l'expression « seconde révolution quantique ».

Le livre de Michel Le Bellac a l'immense mérite de tirer les conséquences des avancées récentes, et de présenter de façon synthétique les concepts à la base des deux révolutions quantiques, ainsi qu'un certain nombre de phénomènes remarquables qui ne peuvent être décrits que dans ce cadre conceptuel. On y trouvera aussi bien la description d'expériences d'interférences photon par photon – illustrant la « mystérieuse » dualité onde-particule, que l'application de la physique quantique aux lasers à semi-conducteurs présents dans tous les lecteurs de DVD. Un chapitre entier est consacré à l'intrication, au débat entre Einstein et Bohr, et aux expériences de test des inégalités de Bell, un autre à la cryptographie quantique, un autre encore

au refroidissement d'atomes par laser et aux fameux condensats de Bose Einstein atomiques. L'état actuel des recherches sur l'ordinateur quantique est présenté avec lucidité, sans cacher les difficultés qui devront être surmontées pour aboutir à un instrument utile. Enfin le lecteur trouvera dans ce livre non pas la réponse, que nous ne connaissons toujours pas, mais la formulation claire de questions difficiles loin d'être résolues, sur la frontière quantique / classique, et sur l'interprétation de la mécanique quantique. J'ai eu la chance de travailler sur un certain nombre de ces questions, et je peux témoigner que Michel Le Bellac a, sur chacune d'entre elles, su dégager les points essentiels et choisir quelques exemples importants, sans noyer le lecteur sous une accumulation de phénomènes. Ce livre exigeant demande une attention soutenue, mais le jeu en vaut la chandelle car les sujets présentés sont parmi les plus passionnants de la recherche actuelle, et le lecteur sera récompensé de ses efforts en découvrant l'intérêt de ces sujets, et l'état de la question. Il sera donc à même de mieux suivre les découvertes qui ne manqueront pas d'être annoncées dans les prochaines années.

Michel Le Bellac, dont la spécialité initiale est la physique des particules, a fait depuis plusieurs années l'effort de comprendre en détail les nombreuses recherches dans des domaines qui vont bien au-delà du sien. Il en a tiré des ouvrages d'un niveau avancé. Aujourd'hui il met cette vaste culture au service du public intéressé par la science et ses découvertes récentes. Il faut l'en remercier, et souhaiter à ce nouvel ouvrage le succès qui témoignera de l'intérêt suscité par « le monde quantique ».

Alain ASPECT

Avant-propos

Dans le dernier film de Woody Allen, « *Whatever works* », le personnage principal, qui est manifestement le double du metteur en scène, se présente comme « un génie (semble-t-il méconnu !) de la mécanique quantique et de la théorie des cordes ». Ces deux théories n'ont pas été choisies par hasard : elles sont supposées être particulièrement ésotériques et maîtrisées uniquement par une poignée d'experts dans le monde. Je ne me prononcerai pas sur la théorie des cordes, mais je voudrais montrer dans ce livre qu'en ce qui concerne la physique quantique, les principes de base ne sont pas si compliqués et peuvent être compris en profondeur à condition de les examiner avec un minimum de concentration. Bien entendu, la maîtrise technique de la théorie quantique, celle qui est nécessaire aux physiciens professionnels, nécessite un lourd investissement, mais cet investissement n'est en rien indispensable pour comprendre réellement de quoi il retourne.

Il m'a semblé qu'un lecteur possédant un minimum d'intérêt pour les problématiques scientifiques pourrait se poser les questions suivantes. Est-il correct d'affirmer « qu'un atome peut se trouver en plusieurs endroits à la fois » ? Quels étaient les enjeux du débat entre Einstein et Bohr en 1935 ? Qu'est-ce qu'un « atome froid » et quelles en sont les applications ? Quels sont les principes du laser et les spécificités de la lumière laser ? Comment fonctionnent les diodes laser qui permettent de lire et de graver les CD et les DVD ? Qu'est-ce qu'une particule élémentaire dans une théorie quantique et relativiste ? Qu'appelle-t-on « interprétation de Copenhague » de la mécanique quantique ? Telles sont quelques-unes des questions auxquelles j'aimerais répondre dans cet ouvrage, tout en restant à un niveau aussi élémentaire que possible. J'essaierai aussi de donner quelques éléments de jugement sur des questions toujours ouvertes, par exemple : pourquoi est-il aussi difficile de bâtir une théorie quantique de la gravitation ? Existe-t-il une frontière entre le monde quantique et le monde classique ? La fonction d'onde représente-t-elle une réalité externe ?

Dans une entreprise de « vulgarisation de la physique quantique », il faut inévitablement se fixer le niveau visé. Il me semble que deux niveaux sont possibles. Le premier, que l'on pourrait qualifier de « grand public », se borne à une description qualitative des phénomènes quantiques, mais n'essaie pas véritablement d'expliquer

les règles qui les régissent. Le second niveau, qui est celui visé par le présent ouvrage, est plus ambitieux, mais aussi plus exigeant, dans la mesure où il s'efforce de répondre à la question « comment ça marche ? » tout en faisant appel au minimum de formalisme. Ce livre s'adresse donc à un lecteur qui n'a pas complètement oublié les mathématiques de terminale, capable de comprendre une équation algébrique simple (à peine plus compliquée que $E = mc^2$!) et de visualiser le graphe de la fonction cosinus ; en revanche, ce lecteur ne rencontrera dans le texte principal aucune notion mathématique avancée. Toutefois, à partir du chapitre 8, j'ai introduit la notation de Dirac afin d'écrire quelques équations très simples que j'aurais dû sinon remplacer par des périphrases plus ou moins obscures. Le lecteur qui m'aura suivi jusque-là aura certainement une compréhension intuitive de cette notation. S'il possède des connaissances mathématiques du niveau de la première année d'une licence scientifique (L_1), il trouvera dans les encadrés et dans les annexes des compléments lui permettant de se faire une idée plus approfondie de la théorie quantique.

Ce livre n'a pas pour seul objectif d'introduire les idées de base de la théorie quantique. En effet, nous sommes entrés depuis quelques dizaines d'années dans un monde de plus en plus dépendant des applications de la physique quantique. Le développement prodigieux des sciences et techniques de l'information et de la communication (STIC) n'aurait pas été possible sans une parfaite maîtrise de cette physique, qui est à la base du développement du transistor et du laser. Sans ces technologies, nous n'aurions ni lecteurs de CD et de DVD, ni télécommunications à haut débit, ni ordinateurs ou téléphones portables, ni dispositifs de vision nocturne dans l'infrarouge. Sans les horloges atomiques, nous n'aurions pas de GPS précis au mètre près. La deuxième question à laquelle je me propose de répondre est donc « à quoi ça sert ? » Naturellement j'ai dû faire un choix parmi les multiples applications. Ce choix s'est porté sur le principe de quelques-uns des objets emblématiques créés par l'ingénierie quantique : lasers, horloges atomiques, semi-conducteurs, diodes électroluminescentes (ou LED) et diodes laser.

Quelques indications sur le plan de l'ouvrage pourront être utiles pour s'orienter dans sa lecture. Le chapitre 1 conduit directement au cœur du monde quantique : il énonce les premières règles de base de la théorie quantique, précise le rôle des probabilités, introduit la notion d'amplitude de probabilité ainsi que le principe de superposition. Ce principe est très surprenant, car nous n'en avons aucune intuition tangible dans notre monde habituel, il contredit notre vision du monde, bref il dérange, d'où le titre du premier chapitre. Le chapitre 2 montre comment les règles de base de la théorie quantique peuvent être utilisées pour la transmission sécurisée de clés de cryptage, grâce à une méthode permettant de détecter toute tentative d'espionner une communication entre deux parties. Le chapitre 3 introduit le débat entre Einstein et Bohr qui remonte à 1935, et dont l'issue était longtemps restée en suspens. Un pas décisif fut franchi en 1964 par Bell, donnant la possibilité de

trancher le débat par une expérience cruciale qui a permis de réfuter les hypothèses sous-jacentes au raisonnement d'Einstein.

Alors que l'espace n'avait pratiquement joué aucun rôle dans les premiers chapitres, le chapitre 4 aborde les propriétés spatiales des particules quantiques ; on revient ainsi à la version première de la théorie quantique, la mécanique ondulatoire. À l'aide de l'exemple du puits quantique (qui fera surface au chapitre 6 pour les diodes laser), j'introduis les notions de fonction d'onde, de niveau d'énergie et d'inégalités de Heisenberg, plus connues sous l'appellation discutable de « principe d'incertitude de Heisenberg ». Comme application, je décrirai en fin de ce chapitre le principe du laser.

Les chapitres 5 et 6 traitent des effets collectifs des particules quantiques. Après avoir expliqué le refroidissement des atomes, je montre dans le chapitre 5 comment ce refroidissement peut être utilisé d'abord pour améliorer le fonctionnement des horloges atomiques, et ensuite pour mettre en évidence le comportement étonnant d'une des deux catégories de particules quantiques, les bosons. Les bosons sont susceptibles de former des systèmes aux propriétés remarquables, les condensats de Bose-Einstein. Le chapitre suivant traite de l'autre catégorie de particules quantiques, les fermions. Les électrons sont des fermions et cette propriété est fondamentale pour expliquer la conduction du courant électrique par les métaux et les semi-conducteurs. L'objectif final de ce chapitre est d'expliquer les mécanismes mis en œuvre dans les diodes électroluminescentes, ou LED, et les diodes laser.

En 1905, dans deux articles fondateurs, Einstein introduisit l'aspect quantique du champ électromagnétique et la relativité restreinte. Le mariage de la physique quantique et de la relativité restreinte a donné naissance à une théorie quantique relativiste qui est à la base des théories modernes des particules élémentaires. Comme je l'explique dans le chapitre 7, le mariage entre physique quantique et relativité restreinte est conflictuel, mais le conflit a une solution raisonnable. Il n'en est pas de même pour le mariage entre mécanique quantique et relativité générale, théorie relativiste de la gravitation développée par Einstein en 1915. Je montrerai sur un exemple simple pourquoi la gravitation quantique doit nécessairement rencontrer de sérieuses difficultés, dont on ne connaît pas aujourd'hui la solution.

Les chapitres 8 et 9 sont consacrés à des sujets très actuels, mais ils font appel à un peu plus de formalisme, que l'on trouve développé dans les annexes. Les physiciens mettent beaucoup d'espoir dans les ordinateurs quantiques, capables de résoudre en un temps record quelques problèmes inaccessibles aux ordinateurs classiques. Les principes de l'algorithmique quantique sont exposés au chapitre 8. Malheureusement, il faut bien avouer que la réalisation pratique d'un ordinateur quantique est encore un objectif à très, très long terme. Le chapitre 9 explique comment l'interaction d'un système quantique avec son environnement induit un

comportement classique. Cet effet, dit de décohérence, permettra de discuter la frontière entre mondes quantique et classique.

Enfin le chapitre 10 est consacré à des thèmes plus « philosophiques ». Suivant l'ordre historique, je commencerai par exposer l'interprétation dite de Copenhague de la théorie quantique et je poursuivrai par la théorie de la mesure quantique due à von Neumann. À mon sens, aucune de ces approches n'est pleinement satisfaisante et je développerai d'autres approches comme celle fondée sur la décohérence.

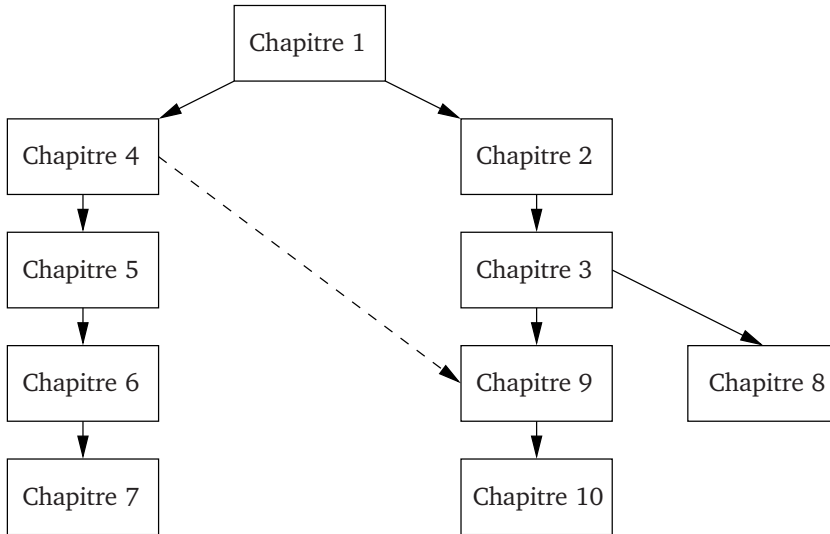


Figure 1. Enchaînement logique des différents chapitres. La colonne de gauche correspond à une lecture plutôt orientée « applications » et celle de droite à une lecture plutôt orientée « problèmes de principe ».

Un mot sur quelques notations et conventions. Lorsqu'un terme (ou une expression) est défini(e) pour la première fois, il(elle) apparaît en *italique*. Pour attirer l'attention sur un point important d'un raisonnement ou un résultat essentiel, j'utilise *les caractères penchés*. La notion d'ordre de grandeur est fondamentale en physique et souvent on ne se préoccupe pas de savoir si deux quantités sont exactement égales ou très proches. On peut dans de nombreux cas se contenter d'une égalité approximative. Ainsi, \simeq signifie égalité approximative, disons à 10 % près, et \sim égalité à un facteur 2 ou 3 près : $A \sim B$ veut dire que A et B sont du même ordre de grandeur. $A \ll B$, ou $B \gg A$ signifient que A est plus petit que B par un facteur 10 au moins, et peut-être beaucoup plus. Enfin, $\pi \simeq 3,14$ est bien évidemment le rapport de la circonférence du cercle à son diamètre !

Deux enchaînements de chapitres sont possibles (figure 1.1), selon les sujets qui intéressent la lectrice. La lectrice principalement intéressée par l'ingénierie quantique et les applications pourra suivre l'ordre de la colonne de gauche, quitte à

revenir ultérieurement aux autres chapitres, et celle principalement intéressée par les questions de principe pourra opter pour la colonne de droite. Chaque chapitre se conclut par une courte bibliographie. Je me suis efforcé de donner une majorité de références en français, mais j'en ai indiqué quelques-unes en anglais lorsqu'elles me semblaient particulièrement pertinentes.

Remerciements Je voudrais avant tout remercier Alain Aspect qui a accepté de préfacier ce livre. Je suis particulièrement reconnaissant envers Sébastien Tanzilli et Mathieu Le Bellac qui ont lu en détail l'ensemble du manuscrit et y ont apporté de multiples améliorations. Je remercie également Thierry Grandou, Franck Laloë, Michèle Leduc, Emmanuel Menini et Borge Vinter pour leurs nombreuses remarques. Mathieu Le Bellac a réalisé la figure 1.2 et Michel Laget m'a fourni la figure 1.4.

Vj k' r ci g' k p v g p v k p c m { ' i g h v ' d r e p m

Un principe qui dérange

Au début du XIX^e siècle, la physique était dominée par deux théories, la mécanique et l'électromagnétisme ; pour être vraiment complet, il faudrait ajouter la thermodynamique, qui était au départ une branche indépendante, mais dont les liens avec la mécanique commençaient à être compris grâce aux travaux de Maxwell et de Boltzmann en particulier. La mécanique, née avec Galilée et Newton, se proposait d'expliquer le mouvement d'objets matériels sous l'action de forces. Le paradigme d'un objet matériel est la *particule* ou le *corpuscule*, que l'on peut se représenter intuitivement comme une boule de billard de très petites dimensions que j'appellerai par la suite une *micro-boule de billard*. Le second volet de la physique du XIX^e siècle est l'électromagnétisme, théorie des champs électrique et magnétique et aussi des ondes lumineuses, suite à la synthèse réalisée par Maxwell entre électromagnétisme et optique. On avait d'un côté une théorie mécanique, où de la matière se manifestant sous un aspect discret (corpusculaire) était transportée le long de trajectoires bien localisées, et de l'autre une théorie ondulatoire, décrivant des phénomènes continus ne correspondant pas à un transport de matière. Les deux théories régissaient des domaines distincts, le seul lien manifeste étant la loi donnant la force sur une particule chargée dans un champ électromagnétique, ou force de Lorentz. En 1905, Einstein met fin à cette vision dichotomique particule/onde et donne le coup d'envoi à deux révolutions de la physique : la relativité restreinte et la physique quantique. En premier lieu, il montre que les équations de la mécanique de Newton doivent être modifiées lorsque la vitesse des particules n'est plus négligeable par rapport à la vitesse de la lumière : c'est la révolution de la relativité restreinte, qui introduit dans la mécanique une quantité caractéristique de l'optique, la vitesse de la lumière. Cependant, c'est un aspect de la révolution einsteinienne qui ne nous intéressera pas directement, sauf dans le chapitre 7. En second lieu, Einstein introduit le