

LE COURS DE PHYSIQUE DE FEYNMAN

Richard Feynman | Robert Leighton | Matthew Sands

NOUVELLE ÉDITION



DUNOD

First published in the United States by Basic Books a member of the Perseus Books Group.

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée aux États-Unis
par Basic Books, un membre du groupe Perseus Books, sous le titre :
The Feynman Lectures on Physics

© 1964 California Institute of Technology, 2006, 2010 by Michael A. Gottlieb,
and Rudolf Pfeiffer.

Version française de B. Équer et P. Fleury.

Coordination de F. Müller.

Nouvelle édition révisée par Julien Leroy

Les éditions Dunod remercient Pierre-Emmanuel Leroy, professeur agrégé de
physique, et Jean-Claude Philippon, ingénieur Centrale Lille retraité,
pour leur relecture attentive de l'ouvrage.

Maquette de couverture : Raphaël Tardif

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
	

© InterEditions, Paris, 1979

© Dunod, Paris, 2000, 2014, 2018, 2021
pour la version française

Nouveau tirage corrigé
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083325-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE À LA NOUVELLE ÉDITION AMÉRICAINNE

Près de 50 ans se sont écoulés depuis que Richard Feynman donna, à Caltech, son cours d'introduction à la physique, duquel sont nés ces volumes : *Le cours de physique de Feynman*. Au fil de ces 50 ans, notre compréhension du monde physique a considérablement changé, mais *Le cours de physique de Feynman* a tenu bon. Les cours de Feynman gardent aujourd'hui la même force qu'au jour de leur première publication, grâce aux qualités uniques qui étaient celles de Feynman, tant sur le plan de la compréhension de la physique que sur celui de la pédagogie. Des débutants aussi bien que des physiciens confirmés ont étudié ce cours ; il a été traduit au moins dans une douzaine de langues et plus d'1,5 million d'exemplaires en langue anglaise ont été vendus. Sans doute aucune autre série de livres de physique n'a laissé une empreinte aussi grande, et durable.

Cette nouvelle édition ouvre une nouvelle ère pour *Le cours de physique de Feynman* (*CPF*) : l'ère de l'édition numérique, celle du XXI^e siècle. Le *CPF* est devenu l'*eCPF*, le texte et les équations ont été convertis dans le langage typographique électronique LaTeX, et toutes les figures ont été refaites à l'aide de logiciels modernes.

Les conséquences pour la version papier de cette édition ne sont pas spectaculaires ; elle a presque la même allure que les livres connus et appréciés des étudiants en physique depuis des décennies. Les différences principales sont la prise en compte des erreurs signalées par des lecteurs durant les années écoulées depuis la précédente édition, et l'aisance avec laquelle les éventuelles coquilles repérées par les futurs lecteurs pourront être corrigées.

La version *eBook* de cette édition et sa *version électronique augmentée*, constituent des innovations numériques. Contrairement à ce qui se passe avec la plupart des versions électroniques de livres techniques du XX^e siècle, dont les équations, les figures et parfois même le texte se « pixelisent » lorsqu'on essaie de les agrandir, le manuscrit LaTeX de cette nouvelle édition permet de créer des livres numériques de la plus grande qualité, dans lesquels tout ce qui figure sur la page (sauf les photographies) peut être agrandi sans limite, tout en gardant des contours et des détails nets. Et la version électronique augmentée, grâce à ses enregistrements audio et ses instantanés du tableau des cours magistraux de Feynman, ainsi que ses liens vers d'autres ressources, constitue une innovation qui aurait beaucoup plu à Feynman.

Souvenirs des cours de Feynman

Ces volumes forment un tout pédagogique et complet. Ils sont aussi la trace historique des cours de physique de premier cycle donnés par Feynman entre 1961 et 1964 à tous les étudiants de premières années à Caltech, quelle qu'ait été leur matière principale.

Les lecteurs se demanderont peut-être, en tout cas je me le suis demandé, quelle impression les cours de Feynman ont laissé aux étudiants qui les suivirent. Feynman, dans sa propre préface, exprimait une opinion plutôt négative : « Je ne crois pas avoir eu beaucoup de succès auprès des étudiants », écrivait-il. Matthew Sands, dans son texte paru avec les *Feynman's Tips on Physics*, a exprimé un point de vue nettement plus positif. Par curiosité, au cours du printemps 2005, j'ai envoyé un message ou parlé à un ensemble quasi-aléatoire de 17 étudiants (sur environ 150) ayant suivi les cours de Feynman entre 1961 et 1963 – certains les avaient suivis avec difficulté, d'autres avec aisance, les matières principales allant de la biologie aux mathématiques en passant par la chimie, l'ingénierie, la géologie, l'astronomie et aussi la physique.

Les années ont peut-être teinté leurs souvenirs d'une certaine euphorie, mais environ 80 % se souvenaient des cours de Feynman comme de grands moments dans leurs années universitaires. « C'était comme aller à la messe. » Les cours constituaient « une véritable expérience », « l'expérience de toute une vie, sans doute la chose la plus importante que j'ai retirée de mon passage à Caltech ». « J'étudiais la biologie en matière principale, mais les cours de Feynman ressortent comme un moment fort de mes années de premier cycle... même si je dois avouer que je n'arrivais pas à faire les exercices à l'époque et j'en rendais donc très peu. » « J'étais l'un des étudiants les moins prometteurs dans ce cours, et pourtant je ne ratais jamais une séance... je me souviens et peux encore même ressentir la joie de la découverte qu'avait Feynman... Ses cours avaient un impact émotionnel qui s'est probablement perdu dans la version papier. »

En revanche, certains des étudiants avaient des souvenirs négatifs, principalement dus à deux problèmes : (a) « On ne pouvait pas apprendre à résoudre les exercices en suivant le cours. Feynman était trop lisse – il connaissait les astuces et savait quelles approximations pouvaient être faites, et il avait une intuition, du recul ainsi que du génie ; toutes choses qu'un étudiant débutant ne possède pas. » Feynman et ses collègues remédièrent en partie à ce problème avec les suppléments désormais inclus dans les *Feynman's Tips on Physics* : trois séances de travaux dirigés données par Feynman et un ensemble d'exercices corrigés réunis par Robert B. Leighton et Rochus Vogt. (b) « Le malaise suscité par le fait de ne pas savoir ce qui allait être traité au cours suivant, l'absence de manuel ou de références bibliographiques en lien direct avec le contenu du cours, et de ce fait l'impossibilité de préparer le cours suivant, étaient des aspects très frustrants. Je trouvais les cours passionnants et compréhensibles dans l'amphithéâtre, mais c'était du chinois après coup [lorsque j'essayais de les reprendre en détail]. » Ce problème bien sûr fut résolu par la parution du présent ouvrage, la version papier du *Cours de physique de Feynman*. Ce livre devint le manuel des étudiants de Caltech pendant de nombreuses années, et il demeure aujourd'hui un des joyaux que nous a légués Feynman.

Une histoire d'errata

Le travail de Feynman et de ses coauteurs, Robert B. Leighton et Matthew Sands, pour l'édition du CFP se fit en un temps très court, à partir d'enregistrements audio du cours

magistral et de photographies des tableaux¹ (deux sources disponibles dans la *version électronique augmentée* de cette édition du *millennium*). Étant donné la vitesse record à laquelle Feynman, Leighton et Sands travaillèrent, il était inévitable que de nombreuses erreurs se glissent dans la première édition. Au fil des années qui suivirent, Feynman compulsait de longues listes d'errata supposées – rapportées par des étudiants ou des collègues de Caltech, ainsi que par des lecteurs du monde entier. Dans les années 1960 et au début des années 1970, Feynman dégagait un peu de temps dans sa vie bien remplie pour vérifier la plupart (mais pas la totalité) des errata rapportés dans les volumes I et II, et pour insérer les corrections requises lors des ré-impressions. Néanmoins, son sens du devoir ne s'éleva pas si haut, en particulier face à l'enthousiasmante idée de faire des découvertes, qu'il aille jusqu'à prendre le temps de s'occuper des errata du volume III². Après sa précoce disparition, en 1988, les listes d'errata pour les trois volumes furent déposées aux Archives de Caltech, et y tombèrent dans l'oubli.

En 2002, Ralph Leighton (fils de feu Robert Leighton et compatriote de Feynman) m'informa de l'existence de ces anciens errata et d'une nouvelle (longue) liste établie par un ami de Ralph, Michael Gottlieb. Leighton proposa que Caltech réalise une nouvelle édition du CFP, avec toutes les corrections, et qu'elle soit publiée avec un nouveau volume contenant quelques annexes, les *Feynman's Tips on Physics*, que lui et Gottlieb préparait.

Feynman avait été mon idole et un ami très proche. Voyant les listes d'errata et le contenu du nouveau volume proposé, je décidai rapidement d'assurer la supervision de ce projet au nom de Caltech (le port d'attache universitaire de Feynman pour une grande partie de sa carrière, et auquel lui, Leighton et Sands avaient confié tous les droits et responsabilités liés au CFP). Après un an et demi de travail méticuleux avec Gottlieb, et un examen minutieux mené par Michael Hartl (un formidable postdoctorant de Caltech, qui a revu toutes les errata et relu le nouveau volume), l'*édition définitive* de 2005 vit le jour, avec près de 200 corrections et accompagnée des *Feynman's Tips on Physics* de Feynman, Gottlieb et Leighton.

Je *pensais* que cette édition serait la « Définitive ». Mais c'était sous-estimer l'enthousiasme avec lequel des lecteurs du monde entier allaient répondre à l'invitation lancée par Gottlieb pour repérer d'autres erreurs, et les indiquer sur un site internet qu'il avait créé et dont il continue d'assurer la maintenance : *The Feynman Lectures Website*, www.feynmanlectures.info. Dans les cinq ans qui suivirent, 965 nouvelles erreurs furent inventoriées et passèrent sous les fourches caudines de Gottlieb, Hartl et Nate Bode (un doctorant exceptionnel, qui a pris à Caltech la succession de Hartl au poste d'examineur d'errata). Sur ces 965 erreurs relevées, 80 furent corrigées dans le quatrième tirage de l'*édition définitive* (août 2006) et les 885 restantes le sont dans le premier tirage de

1. Pour une description de la genèse des cours de Feynman et de ces ouvrages, cf. la préface de Feynman et les avant-propos de chaque tome, ainsi que le mémoire de Matt Sands publié dans *Feynman's Tips on Physics*, et la *Préface à l'édition anniversaire* du CFP écrite en 1989 par David Goodstein et Gerry Neugebauer, reprise dans l'*édition définitive* de 2005.

2. En 1975, il avait commencé à examiner les errata du volume III, mais il fut distrait de cette tâche par d'autres choses avant de l'avoir terminée, si bien qu'aucune correction ne fut faite.

cette *Nouvelle Édition du Millénum* (322 dans le volume I, 263 dans le volume II et 300 dans le volume III). Pour connaître le détail de ces errata, reportez-vous au site www.feynmanlectures.info.

Il est clair que l'entreprise visant à expurger le CFP de toute coquille et erreur est devenue une démarche coopérative mondiale. De la part de Caltech, je tiens à remercier les 50 lecteurs qui ont contribué depuis 2005 à cette entreprise, et les très nombreux lecteurs qui y contribueront sans doute dans les années à venir. Les noms de tous les contributeurs sont publiés sur www.feynmanlectures.info/flp_errata.html.

Les erreurs relevées tombent presque toujours dans l'une des trois catégories suivantes : (i) des erreurs typographiques dans le texte ; (ii) des erreurs typographiques ou mathématiques dans les équations, les tableaux ou les figures – erreurs de signes, nombres erronés (par exemple un 5 qui devrait être un 4), indices, symboles de sommation, parenthèses ou termes manquant dans des équations ; (iii) références erronées à des chapitres, tableaux ou figures. Ces types d'erreurs, si peu graves qu'elles puissent être pour un physicien chevronné, peuvent induire en erreur et contrarier le public visé en priorité par Feynman : les étudiants.

Il est remarquable que, sur les 1165 erreurs corrigées sous ma supervision, seules quelques-unes aient été, selon moi, véritablement des erreurs de physique. Par exemple, dans le Volume 2, pages 5-9, où l'on peut maintenant lire « ... aucune distribution statique de charges à l'intérieur d'un conducteur fermé et *relié à la terre* ne peut produire de champs (électriques) à l'extérieur » (les termes *relié à la terre* ne figuraient pas dans les éditions précédentes.). Cette erreur avait été signalée à Feynman par un certain nombre de lecteurs, dont Beulah Elizabeth Cox, une étudiante du *College of William and Mary*, qui s'était appuyée sur ce passage erroné du cours de Feynman lors d'un examen. Feynman lui écrivit, en 1975³ « Votre professeur a eu raison de ne pas vous mettre de points. En science, ce sont des arguments et des raisonnements soigneusement menés qu'il faut suivre, pas des autorités. Aussi, vous avez lu le livre correctement, et l'avez compris. Je me suis trompé, et donc le livre est erroné. Je pensais sans doute à une sphère conductrice reliée à la terre, ou au fait que déplacer les charges en différents points à l'intérieur n'affecte pas la situation à l'extérieur. Je ne sais ce qui m'est arrivé, mais j'ai fait une bourde. Et vous aussi, en me croyant sur parole. »

Comment cette nouvelle édition du Millénum a vu le jour

Entre novembre 2005 et juillet 2006, 340 errata furent rapportés au *Feynman Lectures Website* www.feynmanlectures.info. De façon remarquable, l'essentiel de ces errata avaient été relevés par une seule et même personne : Rudolf Pfeiffer, alors postdoctorant à l'université de Vienne, en Autriche. L'éditeur, Addison Wesley, corrigea 80 errata, mais rechignait à en corriger plus, pour des raisons de coût : les livres étaient imprimés à partir d'un procédé *d'offset* photographique, basé sur les images photographiques des pages imprimées dans les années 1960. Corriger une erreur impliquait de recomposer toute la

3. Pages 288-289 de *Perfectly Reasonable Deviations from the Beaten Tracks : The Letters of Richard P. Feynman*, édition dirigée par Michelle Feynman (Basic Books : New York, 2005).

page, et pour s'assurer qu'aucune nouvelle erreur ne se glissait dans la page, elle était re-tapée deux fois, par deux personnes différentes, puis les deux versions étaient comparées et relues par plusieurs personnes – un processus très coûteux en effet, dès lors qu'il s'agit de corriger des centaines d'erreurs.

Gottlieb, Pfeiffer et Ralph Leighton étaient très mécontents de cette situation, et mirent donc sur pied un plan visant à faciliter la correction de toutes les erreurs, ainsi qu'à permettre l'édition d'un livre électronique et de versions électroniques augmentées du CFP. Ils me soumirent leur projet en 2007, étant le représentant de Caltech pour ces questions. Je fus enthousiaste, bien que prudent. Après avoir examiné le projet plus en détail, et notamment un chapitre de démonstration de la version électronique augmentée, je recommandai à Caltech de s'associer avec Gottlieb, Pfeiffer et Leighton pour la réalisation de leur projet. Celui-ci fut approuvé par trois titulaires successifs de chaires à la Faculté de Physique, Mathématiques et Astronomie de Caltech – Tom Tombrello, Andrew Lange et Tom Soifer – et Adam Cochran, le juriste de Caltech pour les questions de droits et propriété intellectuels, s'occupa des détails légaux et contractuels complexes. Avec la publication de cette *Nouvelle édition du Millénium*, le projet a été mené à bien, malgré sa complexité. En particulier :

Pfeiffer et Gottlieb ont converti au format LaTeX les trois volumes du CFP (et aussi plus de mille exercices tirés du cours, inclus dans les *Feynman's Tips on Physics*). Les figures de CFP ont été refaites, directement sous formes électroniques, en Inde, sous la direction du traducteur allemand du CFP, Henning Heinze, pour l'édition allemande du CFP. Gottlieb et Pfeiffer ont négocié le droit non-exclusif d'utiliser les figures de Heinze dans l'édition anglaise du *Nouveau Millénium* contre celui, pour l'éditeur allemand Oldenbourg, d'utiliser leurs équations LaTeX. Pfeiffer et Gottlieb ont relu méticuleusement tout le texte et toutes les équations en LaTeX, ils ont revu toutes les figures et apporté les corrections nécessaires. Nate Bode et moi-même, pour le compte de Caltech, avons relu des passages du texte, des équations et des figures pris au hasard : nous n'avons, et c'est remarquable, trouvé aucune erreur. Pfeiffer et Gottlieb sont d'une méticulosité et d'une précision incroyables. Ils ont également demandé à John Sullivan, de la *Huntington Library*, de numériser les photographies des tableaux de Feynman prises entre 1962 et 1964, et à *George Blood Audio* de numériser les enregistrements sur bande magnétique des cours – avec le soutien moral et financier de Carver Mead, professeur à Caltech, le soutien logistique de Shelley Erwin, Archiviste à Caltech et le soutien juridique de Cochran.

Les questions juridiques ont été épineuses : dans les années 1960, Caltech avait cédé à Addison Wesley les droits de publication de l'édition papier, et, dans les années 1990, les droits de distribution de l'enregistrement audio des cours de Feynman ainsi que ceux d'une version électronique. Au cours des années 2000, une succession de cessions de ces droits avait conduit à ce qu'ils soient détenus par le groupe Pearson pour l'édition papier, et par le groupe Perseus pour les éditions audio et électronique. Cochran, avec l'aide de Ike Williams, avocat spécialiste des questions d'édition, est parvenu à réunifier ces droits au sein du groupe Perseus (Basic Books), ce qui a rendu possible l'*Édition du nouveau Millénium*.

Remerciements

De la part de Caltech, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont rendu possible cette nouvelle édition. En particulier celles qui ont joué des rôles clés : Ralph Leighton, Michael Gottlieb, Tom Tombrello, Michael Hartl, Rudolf Pfeiffer, Henning Heinze, Adam Cochran, Carver Mead, Nate Bode, Shelley Erwin, Andrew Lange, Tom Soifer, Ike Williams et les 50 personnes qui ont signalé des erreurs (leurs noms sont sur www.feynmanlectures.info). Et je remercie également Michelle Feynman (la fille de Richard Feynman) pour son soutien sans faille et ses conseils, Alan Rice pour l'aide en coulisses et ses conseils à Caltech, Stephan Puchegger et Calvin Jackson pour l'aide et les conseils apportés à Pfeiffer concernant la conversion du *CPF* en LaTeX, Michael Figl, Manfred Smolik et Andreas Stangl pour les discussions relatives aux corrections et coquilles ; et toute l'équipe de Perseus/Basic Books et (pour les éditions précédentes) celle de Addison Wesley.

Kip S. Thorne

Professeur émérite de Physique théorique,
Titulaire de la chaire Feynman au *California Institute of Technology*

Octobre 2010

TABLE DES MATIÈRES

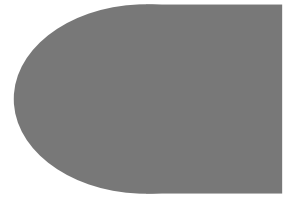
Préface à la nouvelle édition américaine	III
Préface de Richard Feynman	XIII
Liste des symboles	XVII
Introduction	XXI
Chapitre 1. Le comportement quantique	1
1.1 Mécanique atomique	1
1.2 Une expérience avec des balles de fusil	2
1.3 Une expérience avec des ondes	4
1.4 Une expérience avec des électrons	6
1.5 Interférences des ondes d'électrons	7
1.6 En observant les électrons	9
1.7 Premiers principes de la mécanique quantique	13
1.8 Le principe d'incertitude	15
Chapitre 2. La relation entre les points de vue ondulatoire et corpusculaire	17
2.1 Amplitudes des ondes de probabilité	17
2.2 Mesures de position et d'impulsion	18
2.3 Diffraction par un cristal	23
2.4 La taille d'un atome	25
2.5 Niveaux d'énergie	27
2.6 Implications philosophiques	29
Chapitre 3. Amplitudes de probabilité	33
3.1 Lois de combinaison des amplitudes	33
3.2 Interférences obtenues avec deux fentes	38
3.3 Diffusion par un cristal	42
3.4 Particules identiques	45
Chapitre 4. Particules identiques	51
4.1 Particules de Bose et particules de Fermi	51
4.2 États à deux particules de Bose	54
4.3 États à n particules de Bose	58
4.4 Émission et absorption de photons	60
4.5 Le spectre du corps noir	62
4.6 L'hélium liquide	68
4.7 Le principe d'exclusion	69

Chapitre 5. Spin un	75
5.1 Filtrage des atomes avec un appareil de Stern-Gerlach	75
5.2 Expériences avec des atomes filtrés	81
5.3 Filtres de Stern-Gerlach en série	84
5.4 États de base	85
5.5 Amplitudes en interférences	88
5.6 La machinerie de la mécanique quantique	92
5.7 Transformation dans une base différente	95
5.8 Autres situations	98
Chapitre 6. Spin un demi	101
6.1 Transformation des amplitudes	101
6.2 Transformation dans un système de coordonnées ayant subi une rotation	103
6.3 Rotations autour de l'axe z	108
6.4 Rotations de 180° et de 90° autour de y	112
6.5 Rotations autour de x	116
6.6 Rotations quelconques	118
Chapitre 7. La dépendance des amplitudes en fonction du temps	123
7.1 Atomes au repos ; états stationnaires	123
7.2 Mouvement uniforme	126
7.3 Énergie potentielle ; conservation de l'énergie	130
7.4 Forces ; la limite classique	135
7.5 La « précession » d'une particule de spin un demi	138
Chapitre 8. La matrice hamiltonienne	143
8.1 Amplitudes et vecteurs	143
8.2 Décomposition des vecteurs d'état	145
8.3 Quels sont les états de base du monde ?	149
8.4 Comment les états évoluent dans le temps	152
8.5 La matrice hamiltonienne	156
8.6 La molécule d'ammoniac	157
Chapitre 9. Le maser à ammoniac	163
9.1 Les états de la molécule d'ammoniac	163
9.2 La molécule dans un champ électrique statique	168
9.3 Transitions dans un champ dépendant du temps	174
9.4 Transitions à la résonance	177
9.5 Transitions hors de la résonance	180
9.6 L'absorption de la lumière	181
Chapitre 10. Autres systèmes à deux états	185
10.1 L'ion d'hydrogène moléculaire	185
10.2 Les forces nucléaires	192
10.3 La molécule d'hydrogène	195
10.4 La molécule de benzène	198
10.5 Les colorants	201
10.6 L'hamiltonien d'une particule de spin un demi dans un champ magnétique	203
10.7 L'électron avec spin dans un champ magnétique	206

Chapitre 11. Autres systèmes à deux états	211
11.1 Les matrices de spin de Pauli	211
11.2 Les matrices de spin en tant qu'opérateurs	217
11.3 La solution des équations à deux états	221
11.4 Les états de polarisation du photon	223
11.5 Le méson K de charge nulle	228
11.6 Généralisation aux systèmes à N états	239
Chapitre 12. La structure hyper-fine de l'hydrogène	245
12.1 Les états de base d'un système fait de deux particules de spin un demi	245
12.2 L'hamiltonien pour l'état d'énergie le plus bas de l'hydrogène	248
12.3 Les niveaux d'énergie	254
12.4 L'effet Zeeman	257
12.5 Les états en présence d'un champ magnétique	262
12.6 La matrice de projection pour un spin un	265
Chapitre 13. Propagation dans un réseau cristallin	269
13.1 États d'un électron dans un réseau à une dimension	269
13.2 États d'énergie définie	273
13.3 États qui varient avec le temps	277
13.4 Un électron dans un réseau à trois dimensions	278
13.5 Autres états dans un réseau	280
13.6 Diffusion par les imperfections dans un cristal	282
13.7 Capture par une imperfection d'un réseau	285
13.8 Amplitudes de diffusion et états liés	286
Chapitre 14. Les semi-conducteurs	289
14.1 Électrons et trous dans les semi-conducteurs	289
14.2 Semi-conducteurs impurs	295
14.3 L'effet Hall	298
14.4 Jonctions de semi-conducteurs	300
14.5 Redressement du courant à une jonction de semi-conducteurs	304
14.6 Le transistor	306
Chapitre 15. L'approximation des particules indépendantes	309
15.1 Les fonctions d'onde de spins	309
15.2 Les fonctions d'onde à deux spins	314
15.3 Les particules indépendantes	316
15.4 La molécule de benzène	318
15.5 D'autres exemples de chimie organique	323
15.6 Autres utilisations de l'approximation	327
Chapitre 16. Variation des amplitudes avec la position	331
16.1 Les amplitudes le long d'une droite	331
16.2 La fonction d'onde	336
16.3 États de moment défini	339
16.4 Normalisation des états en x	342
16.5 L'équation de Schrödinger	345
16.6 Les niveaux d'énergie quantifiés	349

Chapitre 17. Symétrie et lois de conservation	355
17.1 La symétrie	355
17.2 Symétrie et conservation	359
17.3 Les lois de conservation	364
17.4 La lumière polarisée	367
17.5 La désintégration du Λ^0	370
17.6 Glossaire des matrices de rotation	376
Chapitre 18. Le moment cinétique	379
18.1 Le rayonnement du dipôle électrique	379
18.2 Diffusion de la lumière	382
18.3 L'annihilation du positronium	386
18.4 La matrice de rotation pour un spin quelconque	393
18.5 La mesure d'un spin nucléaire	398
18.6 Composition des moments cinétiques	400
Chapitre 19. L'atome d'hydrogène et la table périodique	413
19.1 L'équation de Schrödinger pour l'atome d'hydrogène	413
19.2 Les solutions à symétrie sphérique	415
19.3 Les états qui dépendent des angles	420
19.4 La solution générale pour l'hydrogène	426
19.5 Les fonctions d'onde pour l'hydrogène	430
19.6 La table périodique	432
Chapitre 20. Opérations et opérateurs	441
20.1 Opérations et opérateurs	441
20.2 L'énergie moyenne	444
20.3 L'énergie moyenne d'un atome	448
20.4 L'opérateur de position	450
20.5 L'opérateur d'impulsion	452
20.6 Le moment cinétique	458
20.7 La variation des moyennes avec le temps	461
Chapitre 21. L'équation de Schrödinger dans un contexte : un séminaire sur la supra-conductivité	465
21.1 L'équation de Schrödinger en présence d'un champ magnétique	465
21.2 L'équation de continuité pour les probabilités	468
21.3 Deux sortes d'impulsion	470
21.4 La signification de la fonction d'onde	472
21.5 La supra-conductivité	474
21.6 L'effet Meissner	476
21.7 Quantification du flux	479
21.8 La dynamique de la supra-conductivité	482
21.9 La jonction Josephson	484
Épilogue	493
Annexes	494
Index	531

PRÉFACE DE RICHARD FEYNMAN



Voici les cours de physique que j'ai donnés l'année dernière et l'année précédente aux élèves de première et de deuxième année au Caltech. Bien sûr, ces cours ne rapportent pas mot pour mot ce qui fut dit — certains passages sont retranscrits dans leur intégralité, d'autres seulement partiellement. Ces leçons ne forment qu'une partie du cours complet. Le groupe des 180 étudiants se rassemblait dans une grande salle deux fois par semaine pour assister à ces cours, puis se divisait en petits groupes de quinze à vingt étudiants dans des sections de travaux dirigés sous la direction d'un assistant. Il y avait de plus une séance de travaux pratiques une fois par semaine.

Le problème particulier que nous avons essayé de résoudre avec ces leçons était de maintenir l'intérêt des étudiants, très enthousiastes et assez brillants, qui venaient de sortir des écoles secondaires et rentraient au Caltech. Ils avaient entendu beaucoup de choses sur les aspects intéressants et excitants de la physique — la théorie de la relativité, la mécanique quantique et d'autres idées modernes. Après avoir suivi deux années de nos cours précédents, beaucoup se seraient sentis découragés parce qu'on ne leur aurait présenté que très peu d'idées modernes, grandes et nouvelles. Ils auraient étudié les plans inclinés, l'électrostatique, etc., et au bout de deux ans cela est passablement ridicule. Le problème était de savoir si, oui ou non, nous pouvions faire un cours qui pourrait maintenir l'enthousiasme des étudiants les plus avancés.

Les cours qui suivent ici ne sont pas du tout considérés comme une vue d'ensemble, mais sont très sérieux. J'ai pensé les adresser aux plus intelligents de la classe et je fis en sorte, dans la mesure du possible, que même l'étudiant le plus intelligent ne fut pas capable de saisir complètement tout ce qui se trouvait dans les cours — en suggérant un développement des idées et des concepts dans diverses directions s'écartant de la principale ligne d'attaque. Pour cette raison, j'ai essayé avec beaucoup d'attention de rendre les énoncés aussi précis que possible, d'indiquer dans chaque cas l'endroit où les équations et les idées trouvaient leur place dans l'ensemble de la physique et comment — lorsqu'ils en apprendraient davantage — les choses se modifieraient. J'ai pensé également que pour de tels étudiants, il est important d'indiquer ce qu'ils doivent — s'ils sont suffisamment intelligents — être capables de comprendre par déduction de ce qui a été dit précédemment et ce qui est introduit comme quelque chose de nouveau. Lorsque de nouvelles idées apparaissaient, j'ai essayé soit de les déduire, quand on pouvait le faire, ou d'expliquer que *c'était* une nouvelle idée qui ne s'exprimait pas en fonction des choses qu'ils avaient apprises jusqu'alors, qu'on ne pouvait pas la démontrer — mais qu'elle était simplement ajoutée.

Pour le début de ces cours, j'ai supposé que l'étudiant avait certaines connaissances en science lorsqu'il sortait de l'enseignement secondaire — telles que l'optique géométrique, les idées de chimie élémentaire, etc. Je n'ai pas vu de raison particulière pour

faire les cours dans un ordre défini au sens où je ne me serais pas permis de mentionner une chose avant d'être prêt à la discuter en détail. De nombreuses notions étaient apportées sans discussions complètes, puis étaient détaillées par la suite, lorsque la préparation était plus avancée. Des exemples en sont les discussions de l'induction et des niveaux d'énergie qui sont introduits une première fois d'une manière très qualitative et sont plus tard développés plus en détail.

En même temps que je m'efforçais d'intéresser les étudiants les plus actifs, je voulais également prendre soin de ceux pour lesquels les applications marginales et ces feux d'artifices supplémentaires sont simplement inquiétants et dont on ne peut attendre qu'ils apprennent la totalité du matériau dans chaque leçon. Pour de tels étudiants, je souhaitais qu'il y ait au moins un noyau central, une ossature, qu'ils *puissent* acquérir. Même s'ils ne comprenaient pas tout dans une leçon, j'espérais qu'ils ne se décourageraient pas. Je ne m'attendais pas à ce qu'ils comprennent tout, mais seulement les caractéristiques centrales et les traits les plus directs. Il fallait bien sûr une certaine intelligence de leur part pour voir quels sont les théorèmes centraux, les idées centrales et quelles sont les issues latérales plus avancées et les applications qu'ils pouvaient ne comprendre que dans les années à venir.

J'ai rencontré une difficulté sérieuse en donnant ces cours : selon la manière dont le cours était donné, il n'y avait aucune expression en retour venant des étudiants pour indiquer comment les leçons étaient assimilées. Ceci est en effet une difficulté très sérieuse et je ne sais pas effectivement quelle est la qualité de ces cours. L'ensemble était essentiellement une expérience. Et si je devais le refaire je ne le ferais pas de la même manière — j'espère que je *n'aurai pas* à le refaire ! Je pense, cependant, que les choses se sont bien passées, du moins en ce qui concerne la physique, durant la première année.

Pendant la deuxième année je ne fus pas aussi satisfait. Dans la première partie du cours traitant de l'électricité et du magnétisme, je n'ai pas trouvé de moyen d'amener les choses de façon plus excitante que la manière habituelle de présentation. Je ne pense pas avoir apporté beaucoup dans ces cours sur l'électricité et le magnétisme. Je pensais initialement continuer à la fin de la deuxième année après l'électricité et le magnétisme, en donnant quelques cours supplémentaires sur les propriétés des matériaux, mais essentiellement en insistant sur des choses telles que les modes fondamentaux, les solutions de l'équation de diffusion, les systèmes vibratoires, les fonctions orthogonales, etc., développant les premières étapes de ce qu'on appelle habituellement « les méthodes mathématiques de la physique ». À y repenser, je considère que si je devais le refaire, je reviendrais à cette idée initiale. Mais comme il n'était pas prévu que je donnerais à nouveau ces leçons, on suggéra que cela serait une bonne idée que d'essayer – de présenter une introduction de la mécanique quantique — ce que vous trouverez au volume III¹.

Il est parfaitement clair que les étudiants qui s'orienteront vers la physique peuvent attendre jusqu'à leur troisième année pour étudier la mécanique quantique. D'un autre côté l'argument fut avancé que nombreux étaient les étudiants dans notre cours qui étu-

1. Volume I de l'édition américaine : *Mécanique 1 et 2* pour l'édition française. Volume II : *Électromagnétique 1 et 2* pour l'édition française. Volume III : *Mécanique quantique* pour l'édition française.

diaient la physique comme un bagage qui pourrait servir de complément à leurs préoccupations fondamentales dans d'autres domaines. Et la manière habituelle de traiter la mécanique quantique rend ce sujet presque inaccessible pour la plus grande partie des étudiants, parce qu'il leur faut trop de temps pour l'apprendre. De plus, dans ses applications réelles, spécialement dans ses applications les plus complexes telles que dans les techniques électriques et la chimie — le mécanisme complet de l'approche par l'équation différentielle n'est pas effectivement utilisé. Aussi ai-je essayé de décrire les principes de mécanique quantique d'une manière qui ne nécessite pas que l'on connaisse d'abord les mathématiques des équations différentielles partielles. Je pense que, même pour un physicien, c'est une chose intéressante à essayer — que de présenter la mécanique quantique de manière inversée — pour plusieurs raisons qui peuvent être apparentes dans les cours eux-mêmes. Cependant je pense que l'expérience, dans la partie de mécanique quantique, ne fut pas complètement un succès — pour une large part parce que je n'ai pas eu, à la fin, suffisamment de temps (j'aurais dû, par exemple, faire trois ou quatre cours supplémentaires, de manière à traiter plus complètement des sujets tels que les bandes d'énergie et la dépendance spatiale des amplitudes). De plus je n'avais jamais auparavant présenté ce sujet de cette manière, ce qui fait que l'absence de réaction en retour fut particulièrement sérieuse. Je pense maintenant que la mécanique quantique devrait être enseignée plus tardivement. Il se peut que j'aie un jour la chance de le refaire. Alors je le ferai correctement.

La raison pour laquelle il n'y a pas de cours sur la manière dont on résout les problèmes est qu'il y avait des sections de travaux dirigés. Bien que j'ai mis dans trois cours, en première année, ce qu'il faut savoir pour résoudre les problèmes, ceci n'est pas inclus ici. Il y avait également un cours sur le guidage par inertie qui se situe certainement après les cours sur les systèmes en rotation mais qui fut malheureusement omis. Les cinquième et sixième cours sont en réalité dus à Matthew Sands, car j'étais absent à cette époque.

La question est bien sûr de savoir comment cette expérience a réussi. Mon propre point de vue — qui cependant ne semble pas être partagé par la plus grande partie des personnes qui ont travaillé avec les étudiants — est pessimiste. Je ne pense pas avoir réellement bien travaillé avec les étudiants. Lorsque je considère la manière dont la majorité des étudiants traitaient les problèmes aux examens, je pense que ce système est un échec. Bien entendu, mes amis m'ont fait remarquer qu'il y avait une ou deux douzaines d'étudiants qui — d'une manière très surprenante — comprenaient presque tous les cours et qui étaient très actifs, travaillant avec le contenu de ces leçons et se préoccupant des divers points d'une manière intéressée et passionnée. Ceux-ci ont maintenant, je le pense, un bagage fondamental de première qualité en physique — et ils sont après tout ceux auxquels je désirais m'adresser. Mais alors, « La puissance de l'instruction est rarement de grande efficacité à l'exception de ces dispositions heureuses où elle est pratiquement superflue » (Gibbons).

Toutefois je ne désirais laisser aucun étudiant complètement en arrière, comme peut-être je l'ai fait. Je pense qu'une manière par laquelle nous pourrions aider davantage les étudiants serait de faire plus d'efforts pour développer un ensemble de problèmes qui permettraient d'élucider certaines des idées dans les cours. Les problèmes donnent

une bonne occasion d'utiliser les matériaux des leçons et de rendre plus réalistes, plus complètes et plus ancrées dans les esprits, les idées qui ont été exposées.

Je pense cependant qu'il n'y a aucune solution à ce problème d'éducation autre que de réaliser que le meilleur enseignement ne peut être obtenu que lorsqu'il y a une relation directe et individuelle entre un étudiant et un bon professeur — une situation dans laquelle l'étudiant discute les idées, pense sur les choses et parle des choses. Il est impossible d'en apprendre beaucoup simplement en assistant à un cours ou même simplement en faisant les problèmes qui sont demandés. Mais à notre époque moderne nous avons tellement d'étudiants à qui enseigner qu'il nous faut essayer de trouver quelques substituts à l'idéal. Peut-être mes cours pourront-ils apporter une certaine contribution. Peut-être, ça et là se trouvent en nombre restreint des enseignants et des étudiants qui pourront tirer un peu d'inspiration ou quelques idées de ces cours. Peut-être auront-ils du plaisir à les lire et à y réfléchir ou à essayer de pousser plus loin le développement de certaines de ces idées.

RICHARD P. FEYNMAN

LISTE DES SYMBOLES

Mécanique 1

$ $	valeur absolue	I	courant électrique
$\binom{n}{k}$	coefficient binomial n sur k	I	moment d'inertie
a^*	conjugué complexe de a	\mathbf{j}	vecteur unité de direction y
$\langle \rangle$	valeur attendue	\mathbf{k}	vecteur unité de direction z
∇	opérateur nabla, $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$	\mathbf{L}	vecteur moment angulaire
\approx	approximativement	L	magnitude ou composante du vecteur moment angulaire
\sim	de l'ordre de	L	self-induction
\propto	proportionnel à	m	masse
α	accélération angulaire	m_0	masse au repos
ϵ_0	constante diélectrique ou permittivité du vide, $\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12}$ F/m	$p_\mu = (E, \mathbf{p})$	quadri-vecteur quantité de mouvement
λ	longueur d'onde	\mathbf{p}	vecteur quantité de mouvement
μ	coefficient de friction	p_x, p_y, p_z	composantes cartésiennes du vecteur quantité de mouvement
ν	fréquence	p	magnitude ou composante du vecteur quantité de mouvement
σ	rayon	P	puissance
τ	couple total	$P(k, n)$	probabilité de Bernouilli ou binomiale
$\boldsymbol{\tau}$	vecteur de couple total	$P(A)$	probabilité d'observer l'événement A
ω	vitesse angulaire	q	charge électrique
$\boldsymbol{\omega}$	vecteur vitesse angulaire	\mathbf{r}	vecteur position
\mathbf{a}	vecteur d'accélération	r	rayon ou distance
a_x, a_y, a_z	composantes cartésiennes du vecteur accélération	R	résistance
a	magnitude ou composante du vecteur accélération	s	distance
A	aire	S	étrangeté
\mathbf{B}	vecteur champ magnétique (induction magnétique)	t	temps
B_x, B_y, B_z	composantes cartésiennes du vecteur champ magnétique	T	demi-vie
c	vitesse de la lumière, $c = 2,99792458 \times 10^8$ m/s	T	énergie cinétique
C	capacitance	u	vitesse
d	distance	U	énergie potentielle
\mathbf{E}	vecteur champ électrique	\mathbf{v}	vecteur vitesse
E_x, E_y, E_z	composantes cartésiennes du vecteur champ électrique	v_x, v_y, v_z	composantes cartésiennes du vecteur vitesse
E	énergie	v	magnitude ou composante du vecteur vitesse
\mathbf{F}	vecteur force	V	vitesse
F_x, F_y, F_z	composantes cartésiennes du vecteur force	V	différence de potentiel
F	magnitude ou composante du vecteur force	W	poids
g	accélération de la pesanteur	W	travail
G	constante gravitationnelle	x	coordonnée cartésienne
h	constante de Planck, $h = 6,62606896 \times 10^{-34}$ J·s	y	coordonnée cartésienne
\hbar	constante de Planck réduite, $\hbar = h/2\pi$	z	coordonnée cartésienne
i	nombre imaginaire unité	Z	impédance complexe
\mathbf{i}	vecteur unité de direction x		

Mécanique 2

γ coefficient de capacité de chaleur (index adiabatique ou coefficient spécifique de chaleur)	k_x, k_y, k_z composantes cartésiennes du vecteur onde
κ conductivité thermique	\mathbf{k} vecteur d'onde
ρ densité	k magnitude ou composante du vecteur onde, nombre d'onde
σ constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$	n index de réfraction
C_V chaleur spécifique à volume constant	P pression
\mathbf{e}_r vecteur unité dirigé vers \mathbf{r}	Q chaleur
\mathcal{E} énergie	S entropie
f longueur focale	T température absolue
I intensité	U énergie interne
k constante de Boltzmann, $k = 1,3806504 \times 10^{-23} \text{ J/K}$	V volume
$k_\mu = (\omega, \mathbf{k})$ quadri-vecteur onde	$x_\mu = (t, \mathbf{r})$ quadri-vecteur position

Électromagnétisme 1

∇^2 opérateur Laplacien, $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$	j_x, j_y, j_z composantes cartésiennes du vecteur densité de courant électrique
κ permittivité relative	λ longueur d'onde réduite, $\lambda = \lambda/2\pi$
μ moment magnétique	\mathcal{L} Lagrangien
$\boldsymbol{\mu}$ vecteur moment magnétique	L self-induction
ρ densité de charge électrique	\mathfrak{M} inductance mutuelle
ϕ potentiel électrostatique	\mathbf{n} vecteur unité normal
χ susceptibilité électrique	\mathbf{p} vecteur moment dipolaire
A potentiel vecteur	p magnitude ou composante du vecteur moment dipolaire
A_x, A_y, A_z composantes cartésiennes du potentiel vecteur	\mathbf{P} vecteur polarisation
\mathbf{D} vecteur déplacement électrique	P magnitude ou composante du vecteur polarisation
ε force électromotrice	S action
\mathbf{h} vecteur flux de chaleur	\mathcal{V} différence de potentiel
\mathbf{j} vecteur densité de courant électrique	

Électromagnétisme 2

\square^2 opérateur d'Alembertien, $\square^2 = \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2$	K compressibilité
μ module de cisaillement	\mathbf{M} vecteur aimantation
σ coefficient de Poisson	M inductance mutuelle
$\boldsymbol{\Omega}$ vortacité	\mathcal{M} moment de flexion
$A\boldsymbol{\mu} = (\phi, \mathbf{A})$ quadrivecteur	p pression
$F_{\mu\nu}$ tenseur électromagnétique	\mathcal{R} nombre de Reynold
\mathbf{H} vecteur champ d'aimantation	\mathbf{S} vecteur de Poynting
I_{ij} tenseur d'inertie	S_{ij} tenseur de contrainte
\mathbf{J} vecteur moment angulaire de l'orbite de l'électron	U irréalité totale de l'Univers
$J_0(x)$ fonction de Bessel de premier ordre	Y module de Young

Mécanique quantique

$ 1\rangle, 2\rangle$ un choix spécifique de vecteurs de base pour un système à deux états	$ L\rangle$ état d'un photon polarisé circulairement à gauche
$ I\rangle, II\rangle$ un choix spécifique de vecteurs de base pour un système à deux états	m_{eff} masse effective d'un électron dans une structure cristalline
$\langle\phi $ état, écrit comme un vecteur d'état (<i>bra</i>)	\mathbf{n} n ième chiffre romain, \mathbf{n} prenant les valeurs I, II, \dots, \mathbf{N}
$\langle f s\rangle$ amplitude pour qu'un système de condition initiale $ s\rangle$ se trouve dans la condition finale $ f\rangle$	N_n nombre d'électrons par unité de volume
$ \phi\rangle$ état, écrit comme un vecteur d'état (<i>ket</i>)	N_p nombre de trous par unité de volume
κ constante de Boltzmann, $\kappa = 1,3806504 \times 10^{-23}$ J/K	$P_{\text{spin exch}}$ opérateur d'échange de spin de Pauli
σ vecteur de matrices de spin de Pauli	$ R\rangle$ état d'un photon polarisé circulairement à droite
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ matrices de spin de Pauli	$U(t_2, t_1)$ opérateur désignant l'opération « attendre du moment t_1 au moment t_2 »
Φ_0 unité de base du flux	$Y_{l,m}(\theta, \varphi)$ harmoniques sphériques
C coefficients de Clebsch-Gordan	
E_{gap} énergie de gap	
\mathcal{E}_{tr} vecteur de champ électrique vertical	
\mathcal{E} vecteur de champ électrique	
\mathcal{I} intensité	

INTRODUCTION

Ce grand triomphe de la physique du XX^e siècle qu'est la mécanique quantique date maintenant de près de quarante ans, et pourtant le cours d'introduction à la physique que nous donnons en général à nos étudiants (ou tout au moins à la plupart) ne contient guère qu'une allusion fortuite à cette partie centrale de notre connaissance du monde physique. Nous devrions faire mieux pour eux. Ces leçons constituent une tentative pour que les idées fondamentales et essentielles de la mécanique quantique soient présentées d'une façon, espérons-le, compréhensible. La méthode d'approche que vous trouverez ici est nouvelle, particulièrement pour le cours de deuxième année, et nous l'avons considérée surtout comme une expérience.

Toutefois, étant donné la facilité avec laquelle une partie des étudiants y ont répondu, je crois que l'expérience a été un succès. Bien sûr, il y a place pour des améliorations, qui viendront avec davantage d'expérience de l'enseignement. Ce que vous trouverez ici, c'est le compte rendu de la première expérience.

Pendant les deux années – de septembre 1961 à mai 1963 – que durèrent les leçons de Feynman pour le cours d'introduction à la physique à l'Institut de technologie de Californie, les concepts de la physique quantique furent introduits chaque fois qu'ils étaient nécessaires pour la compréhension des phénomènes. De plus, les douze dernières leçons de la deuxième année furent consacrées à une introduction plus cohérente aux concepts de la mécanique quantique. Mais, lorsque les leçons approchèrent de leur fin, il devint clair que le temps disponible pour la mécanique quantique n'était pas suffisant. En préparant le cours, nous découvrions continuellement que d'autres sujets importants et intéressants pouvaient être traités avec les outils élémentaires que nous avons développés. Nous craignons aussi que le traitement de la fonction d'onde de Schrödinger à la douzième leçon fût trop peu développé pour permettre aux étudiants de suivre les traitements plus conventionnels de beaucoup de livres. Nous avons donc décidé de compléter la série par sept leçons supplémentaires, qui furent données à la classe de 2^e année en mai 1964. Ces leçons englobaient, en les élargissant quelque peu, les sujets traités dans les leçons précédentes.

Dans ce volume, nous avons rassemblé les leçons des deux années, en en modifiant quelque peu l'ordre. De plus, deux leçons originellement données à la classe de première année comme introduction à la physique quantique et qui formaient les chapitres 37 et 38 du volume I¹, constituent maintenant les deux premiers chapitres du présent volume, de façon à en faire un ensemble cohérent, relativement indépendant des deux premiers volumes. Quelques notions sur la quantification des moments cinétiques, (y compris

1. Volume I de l'édition américaine : *Mécanique 1 et 2* pour l'édition française. Volume II : *Électromagnétique 1 et 2* pour l'édition française. Volume III : *Mécanique quantique* pour l'édition française.

une discussion de l'expérience de Stern et Gerlach) avaient été introduites dans les chapitres 34 et 35 du volume II, et nous les avons supposées acquises : toutefois, pour la commodité de ceux qui ne disposent pas de ce volume, ces deux chapitres sont reproduits ici en appendice. Dans cet ensemble de leçons, nous essayons de clarifier dès le début les caractéristiques les plus fondamentales et les plus générales de la mécanique quantique. Les premières leçons s'attaquent directement aux notions d'amplitudes de probabilité, d'interférence d'amplitudes, à la notion abstraite d'état et à la superposition et la résolution des états – et la notation de Dirac est utilisée dès le début. Dans chaque cas, les idées sont introduites par une discussion détaillée d'exemples spécifiques – de façon à rendre les idées physiques aussi concrètes que possible. La dépendance en fonction du temps des systèmes formés d'états d'énergie définie vient ensuite, avec application immédiate des idées physiques à l'étude des systèmes à deux états. Une discussion détaillée du maser à ammoniac permet d'introduire l'absorption du rayonnement et les transitions induites. Les leçons se poursuivent par l'étude de systèmes plus complexes, conduisant à la discussion du mouvement des électrons dans un cristal et à un traitement assez complet de la théorie quantique du moment cinétique. Notre introduction à la mécanique quantique se termine au chapitre 20 par une discussion de la fonction d'onde de Schrödinger, de son équation différentielle et de la solution dans le cas de l'atome d'hydrogène.

Le dernier chapitre de ce volume n'est en principe pas une partie du cours. C'est un « séminaire » sur la superconductivité, qui est présenté, dans le même esprit que certaines leçons récréatives des deux premiers volumes, dans l'intention de donner aux étudiants une idée plus large des rapports entre ce qu'ils ont appris et la physique en général. L'« épilogue » de Feynman constitue le point d'orgue de cette série de trois volumes.

Comme nous l'avons expliqué dans l'introduction du premier volume, ces leçons n'étaient qu'une partie d'un projet de développement d'un nouveau cours d'introduction, projet réalisé à l'Institut de technologie de Californie sous la supervision du comité de prévision du cours de physique (Robert Leighton, Victor Neher, et Matthew Sands). Ce projet a été rendu possible par un don de la Fondation Ford. De nombreuses personnes ont participé à la préparation technique de ce volume : Marylou Clayton, Julie Curcio, James Hartle, Tom Harvey, Martin Israel, Patricia Preuss, Fanny Warren, et Barbara Zimmerman. Les professeurs Gerry Neugebauer et Charles Wilts ont grandement contribué à la précision et à la clarté de l'exposé en relisant soigneusement une grande partie du manuscrit.

Mais, avant tout, c'est Richard Feynman qui nous raconte ici la mécanique quantique. Notre travail n'aura pas été inutile si nous avons pu communiquer à d'autres ne serait-ce qu'un peu de l'excitation intellectuelle qui fut la nôtre en voyant les idées développées dans ses leçons de physique – sur le vif.

MATTHEW SANDS

Décembre 1964

LE COMPORTEMENT QUANTIQUE

1

1.1 MÉCANIQUE ATOMIQUE

La « mécanique quantique » est la description du comportement de la matière et de la lumière dans tous leurs détails et, en particulier, de tout ce qui se passe à l'échelle atomique. À très petite échelle, les choses ne se comportent en rien comme ce dont vous avez une expérience directe. Elles ne se comportent pas comme des ondes, elles ne se comportent pas comme des particules, elles ne se comportent pas comme des nuages, ni comme des boules de billard, ni comme des poids sur une corde, ni comme rien que vous ayez jamais vu.

Newton pensait que la lumière était faite de particules, mais on découvrit ensuite qu'elle se comportait comme une onde. Plus tard, cependant (au début du vingtième siècle), on trouva que la lumière se comportait quelquefois comme une particule. Historiquement, l'électron, par exemple, fut d'abord supposé se comporter comme une particule, puis on trouva qu'il se comportait en plusieurs points comme une onde. Il ne se comporte donc réellement ni comme l'une, ni comme l'autre. À l'heure actuelle nous avons abandonné ce dilemme et nous disons : « il n'est ni l'une ni l'autre ».

Il y a heureusement une issue : les électrons se comportent exactement comme la lumière. Le comportement quantique des objets atomiques (électrons, protons, neutrons, photons, etc.) est le même pour tous, ce sont tous des « ondes-particules » ou comme vous voudrez les appeler. Ainsi, ce que nous apprenons sur les propriétés de l'électron (et que nous utiliserons pour nos exemples) s'appliquera également à toutes les « particules », y compris les photons de la lumière.

L'accumulation progressive d'information sur le comportement microscopique et atomique, durant le premier quart du XX^e siècle donna quelques indications sur la façon dont les petits objets se comportent, mais produisit une confusion croissante qui fut finalement résolue en 1926 et 1927 par Schrödinger, Heisenberg et Born. Ils obtinrent finalement une description cohérente du comportement de la matière à petite échelle. Dans ce chapitre nous allons nous occuper des caractéristiques principales de cette description.

Le comportement atomique étant tout à fait différent de notre expérience quotidienne, il est très difficile de s'y habituer et il apparaît singulier et mystérieux à tout le monde – aussi bien au physicien expérimenté qu'au novice. Même les experts ne le comprennent pas de la façon dont ils le voudraient et c'est parfaitement normal qu'il en soit ainsi, puisque toute expérience humaine directe, et toute intuition humaine s'appliquent à de grands objets. Nous savons ce que font les grands objets mais à petite échelle les choses ne font rien de la même façon. C'est pourquoi nous ne pouvons plus rien apprendre d'elles par notre expérience immédiate, mais seulement en faisant appel à l'abstraction et à l'imagination.

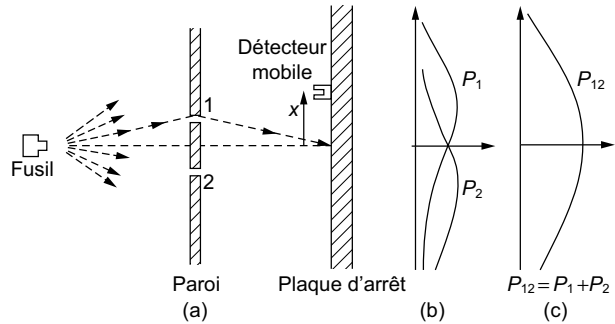
Dans ce chapitre, nous allons aborder immédiatement le point fondamental de ce comportement mystérieux sous son aspect le plus étrange. Nous avons choisi d'examiner un phénomène qui est impossible, *absolument* impossible à expliquer de façon classique et qui contient le coeur de la mécanique quantique. En réalité, il en contient *même l'unique* mystère. Nous ne pouvons pas faire disparaître le mystère en « expliquer » pourquoi les choses sont ainsi. Nous vous *dirons* seulement *comment* les choses se passent. Et, en vous le disant, nous vous aurons donné les particularités fondamentales de toute la mécanique quantique.

1.2 UNE EXPÉRIENCE AVEC DES BALLES DE FUSIL

Pour essayer de comprendre le comportement quantique des électrons, nous allons, grâce à un dispositif expérimental particulier, comparer et opposer leur comportement avec celui, plus familier, de particules telles que des balles de fusil et avec le comportement d'ondes telles que des ondes à la surface de l'eau. Nous considérons d'abord le comportement de balles de fusil dans le montage expérimental indiqué schématiquement sur la Fig. 1.1. Nous avons un fusil qui tire une série de coups. Ce n'est pas une très bonne arme du fait qu'elle disperse les balles (aléatoirement) avec une très large dispersion angulaire comme l'indique la figure. En face du fusil, nous avons disposé une paroi (faite d'une plaque de blindage) qui est percée de deux trous juste assez grands pour laisser passer une balle. Au-delà de cette paroi il y a une plaque d'arrêt (disons une épaisse plaque de bois) qui doit « absorber » les balles qui l'atteignent. Devant ce mur nous plaçons un objet que nous appellerons un « détecteur » de balles. Cela pourrait être une boîte contenant du sable. Toute balle qui entre dans le détecteur y est stoppée et reste dans la boîte. Quand nous le souhaitons, nous pouvons vider la boîte et compter le nombre de balles qui ont été attrapées. Le détecteur peut être déplacé d'avant en arrière le long de ce que nous appellerons l'axe x . Avec cet appareil nous pouvons trouver expérimentalement la réponse à la question : « quelle est la probabilité pour qu'une balle qui est passée à travers un trou de la paroi puisse arriver sur la plaque d'arrêt à la distance x du centre ? » Tout d'abord vous devez bien comprendre qu'il nous faut parler en termes de probabilité – parce que nous ne pouvons pas dire où exactement ira un projectile particulier. Une balle qui atteint un trou peut très bien rebondir sur les bords du trou et achever sa course n'importe où. Nous entendons par « probabilité » la chance qu'a une balle d'atteindre le détecteur, *ce* que nous pouvons mesurer en comptant le nombre de balles qui arrivent dans le détecteur pendant un certain intervalle de temps et en prenant le rapport de ce nombre au nombre *total* qui a atteint la plaque d'arrêt dans ce même temps. Ou bien, si nous supposons que le fusil tire toujours à la même cadence pendant les mesures, la probabilité que nous cherchons est exactement proportionnelle au nombre de balles qui atteignent le détecteur pendant une unité de temps conventionnelle.

Pour les besoins de notre démonstration, nous allons imaginer une expérience quelque peu idéalisée dans laquelle les balles ne sont pas de vraies balles, mais des balles indestructibles qui ne peuvent se couper en deux. Dans cette expérience, nous constatons que les balles arrivent toujours d'un seul coup et, quand nous trouvons quelque chose dans le

Figure 1.1 – Expérience d'interférence avec des balles de fusil.



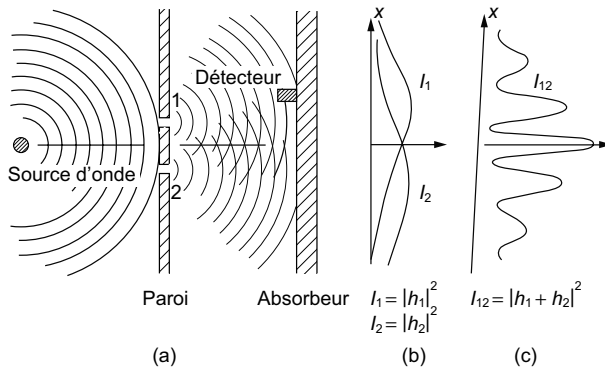
détecteur c'est toujours une balle tout entière. Si nous diminuons de beaucoup la cadence de tir de l'arme, nous constatons qu'à un moment donné ou bien rien n'arrive, ou bien une balle – et exactement une seule – atteint la plaque d'arrêt. Et de même, les dimensions de ce qui arrive ne dépendent évidemment pas de la cadence de tir. Nous dirons que : « les balles arrivent *toujours* comme des projectiles identiques ». Ce que nous mesurons avec notre détecteur est la probabilité d'arrivée d'un projectile. Et nous mesurons la probabilité comme une fonction de x . Le résultat de telles mesures avec cet appareil (nous n'avons jamais fait l'expérience, nous sommes donc réellement en train d'imaginer les résultats) est indiqué sur le graphique (c) de la Fig. 1.1. Sur ce graphique les probabilités sont indiquées horizontalement et les x verticalement de façon que l'échelle des x corresponde à celle du schéma de l'appareil. Nous appelons la probabilité P_{12} parce que les balles peuvent être passées à travers le trou 1 ou à travers le trou 2. Vous ne serez pas surpris du fait que P_{12} est grande près du milieu du graphique et devient petite lorsque x est très grand. Vous pouvez cependant vous demander pourquoi P_{12} a son maximum en $x = 0$. Nous pouvons comprendre ce fait en refaisant notre expérience, tout d'abord après avoir fermé le trou 2, puis en fermant le trou 1. Quand le trou 2 est fermé, les balles peuvent seulement passer à travers le trou 1 et nous obtenons la courbe P_1 de la partie (b) de la figure. Comme vous l'attendez, le maximum de P_1 a lieu pour une valeur de x qui est dans l'alignement du fusil et du trou 1. Quand le trou 1 est fermé, nous obtenons la courbe symétrique P_2 qui est tracée sur la figure. P_2 est la distribution de probabilité des balles qui passent par le trou 2. En comparant les parties (b) et (c) de la Fig. 1.1, nous obtenons le résultat important :

$$P_{12} = P_1 + P_2. \quad (1.1)$$

Les probabilités s'additionnent tout simplement. L'effet obtenu avec les deux trous ouverts est égal à la somme des effets obtenus séparément avec un seul trou ouvert. Pour une raison que vous verrez plus tard, nous interpréterons ce résultat comme l'observation de « pas d'interférence ». Voilà qui suffit pour les balles de fusil. Elles arrivent d'un seul coup, et leur probabilité d'arrivée montre qu'il n'y a pas d'interférence.

1.3 UNE EXPÉRIENCE AVEC DES ONDES

Nous allons considérer maintenant une expérience avec des ondes dans l'eau. L'appareil est indiqué schématiquement sur la Fig. 1.2. Nous avons une cuve peu profonde remplie d'eau. Un petit objet que nous appelons « source d'ondes » est agité de haut en bas par un moteur et produit des ondes circulaires. À la droite de la source nous avons à nouveau un mur avec deux trous, et, au-delà, un deuxième mur. Pour simplifier, nous supposons que celui-ci est un « absorbeur », de sorte que les ondes qui arrivent sur ce mur ne sont pas réfléchies. Ceci peut être réalisé en construisant une « plage » de sable en pente douce. En face de cette plage nous plaçons un détecteur qui peut être déplacé d'avant en arrière dans la direction x comme auparavant. Le détecteur est maintenant un système qui mesure « l'intensité » du mouvement de l'onde. Vous pouvez imaginer quelque chose qui mesure la hauteur de la vague, mais dont l'échelle est graduée proportionnellement au carré de la hauteur réelle de façon que la mesure soit proportionnelle à l'intensité de l'onde. Notre détecteur est donc proportionnel à l'énergie qui est transportée par l'onde – ou plutôt à la quantité d'énergie qui est apportée au détecteur.



Avec notre appareil à ondes, la première chose à remarquer est que l'intensité peut prendre *n'importe quelle* valeur. Si la source vibre un tout petit peu, le détecteur recueille juste une toute petite vague. Si le mouvement de la source est plus important, l'intensité détectée est plus grande. L'intensité de l'onde peut avoir *n'importe quelle* valeur. Nous ne pouvons *pas* dire qu'il y ait la moindre apparence de « discrétion » dans l'intensité de l'onde.

Mesurons maintenant l'intensité de l'onde pour différentes valeurs de x (en gardant les mêmes conditions de fonctionnement de la source). Nous obtenons la courbe I_{12} de la partie (c) de la figure, courbe qui, à première vue, semble intéressante.

Nous avons déjà démontré comment on obtient des courbes d'allure semblable quand nous avons étudié les interférences d'ondes électriques au volume I¹. Dans notre cas nous observons que l'onde initiale est diffractée par les trous et que de nouvelles ondes circulaires sont émises par chaque trou. Si nous fermons un trou à la fois et si nous mesurons la distribution d'intensité à l'absorbeur, nous trouvons la courbe d'intensité très

1. Ouvrages *Mécanique 1* et *Mécanique 2* pour l'édition française.

simple qui est dessinée dans la partie (b) de la figure. I_1 est l'intensité venant du trou 1 (celle que nous trouvons en faisant la mesure avec le trou 2 fermé) et I_2 est l'intensité de l'onde venant du trou 2 (celle qui est obtenue quand le trou 1 est fermé).

L'intensité I_{12} observée quand les deux trous sont ouverts n'est certainement *pas* la somme de I_1 et I_2 . Nous disons que c'est « l'interférence » des deux ondes. À certains endroits (là où la courbe I_{12} a ses maximums) les ondes sont « en phase » et les valeurs de pointe des amplitudes s'ajoutent pour donner une grande amplitude, et par conséquent une grande intensité. À ces endroits-là nous disons que les ondes « interfèrent constructivement ». Il y aura une telle interférence constructive chaque fois que la distance du détecteur à un trou est plus grande (ou plus courte) que la distance à l'autre trou d'un nombre entier de longueurs d'onde.

Aux endroits où les deux ondes atteignent le détecteur avec une différence de phase de π (elles sont alors « en opposition de phase »), le mouvement de l'onde résultant au niveau du détecteur est la différence des deux amplitudes. Les ondes « interfèrent destructivement » et nous obtenons une petite valeur de l'intensité de l'onde. Nous nous attendons à trouver de telles valeurs là où la distance entre le trou 1 et le détecteur diffère de la distance entre le trou 2 et le détecteur d'un nombre impair de demi-longueurs d'onde. Les petites valeurs de I_{12} dans la Fig. 1.2 correspondent aux endroits où les deux ondes interfèrent destructivement.

Vous vous rappellerez que la relation quantitative entre I_1 , I_2 et I_{12} peut être exprimée de la façon suivante ; la hauteur instantanée de la vague au niveau du détecteur, pour l'onde venant du trou 1 peut être écrite comme (la partie réelle de) $h_1 e^{i\omega t}$, où « l'amplitude » h_1 est en général, un nombre complexe. L'intensité est proportionnelle à la moyenne quadratique de la hauteur, ou, quand on utilise les nombres complexes à $|h_1|^2$. De même, pour le trou 2, la hauteur est $h_2 e^{i\omega t}$ et l'intensité est proportionnelle à $|h_2|^2$. Quand les deux trous sont ouverts, les hauteurs de chaque vague s'ajoutent pour donner la hauteur $(h_1 + h_2) e^{i\omega t}$ et l'intensité $|h_1 + h_2|^2$. En oubliant pour l'instant la constante de proportionnalité, les relations correctes pour des *ondes qui interfèrent* sont

$$I_1 = |h_1|^2, \quad I_2 = |h_2|^2, \quad I_{12} = |h_1 + h_2|^2. \quad (1.2)$$

Vous remarquerez que ce résultat est tout à fait différent du résultat obtenu avec des balles de fusil (Éq 1.1). Si nous développons $|h_1 + h_2|^2$ nous voyons que

$$|h_1 + h_2|^2 = |h_1|^2 + |h_2|^2 + 2|h_1||h_2| \cos \delta, \quad (1.3)$$

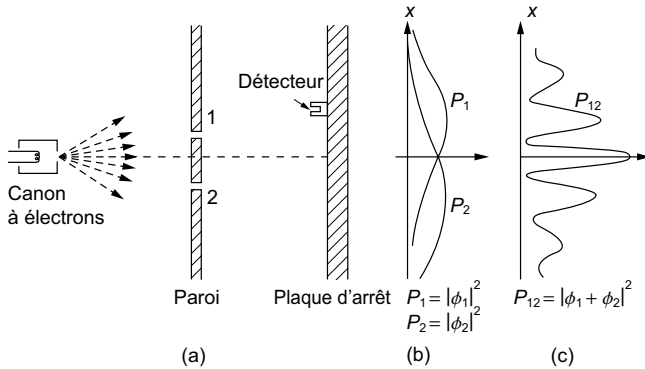
où δ est la différence de phase entre h_1 et h_2 . En termes d'intensité, nous pourrions écrire

$$I_{12} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta. \quad (1.4)$$

Le dernier terme de (1.4) est le « terme d'interférence ». En voilà assez pour les ondes dans l'eau. L'intensité peut prendre n'importe quelle valeur, et elle révèle un phénomène d'interférence.

1.4 UNE EXPÉRIENCE AVEC DES ÉLECTRONS

Imaginons maintenant une expérience semblable avec des électrons, ainsi que le montre schématiquement la Fig. 1.3. Nous construisons un canon à électrons avec un fil de tungstène chauffé par un courant électrique et entouré d'une boîte de métal percée d'un trou. Si le fil est à un voltage négatif par rapport à la boîte, les électrons émis par le fil seront accélérés vers les parois et quelques-uns d'entre eux passeront à travers le trou.



Tous les électrons qui sortiraient du canon auront (à peu près) la même énergie. En face du canon, il y a à nouveau une paroi (juste une mince feuille de métal) percée de deux trous. Au-delà de cette paroi, une autre plaque servira de « plaque d'arrêt ». En face de cette plaque nous plaçons un détecteur mobile. Le détecteur peut être un compteur Geiger, ou encore mieux, un multiplicateur d'électrons connecté à un haut-parleur.

Disons tout de suite que vous ne devez pas tenter d'effectuer cette expérience (alors que vous pourriez l'avoir fait avec les deux précédentes). L'expérience n'a jamais été faite de cette façon. La difficulté vient de ce que l'appareil devrait être réalisé à une échelle incroyablement petite pour montrer les effets qui nous intéressent. Nous sommes en train de faire une « expérience de pensée » que nous avons choisie parce qu'elle permet un raisonnement facile. Nous connaissons les résultats qui *seraient* obtenus parce qu'il y a beaucoup d'expériences qui ont été faites dans lesquelles l'échelle et les proportions ont été choisies pour montrer les effets que nous allons décrire.

La première chose que nous remarquons avec notre expérience sur les électrons est que nous entendons des « clic » aigus, provenant du détecteur (c'est-à-dire du haut-parleur). Et tous les « clic » sont semblables. Il n'y a pas de « demi-clic ».

Nous devons aussi remarquer que les « clic » arrivent de façon complètement erratique. Quelque chose comme : clic... clic-clic... clic clic... clic-clic... clic..., etc., exactement comme fait un compteur Geiger, ce que vous avez sans aucun doute déjà entendu. Si nous comptons tous les « clic » qui se produisent pendant un temps suffisant – disons quelques minutes – et si nous comptons de nouveau pendant un autre intervalle de temps égal, nous trouvons que les deux nombres sont très proches l'un de l'autre. Nous devons donc parler du *rythme moyen* auquel les « clic » sont entendus (en moyenne tant et tant de « clic » par minute).