LE COURS DE PHYSIQUE DE FEYNMAN

Richard Feynman | Robert Leighton | Matthew Sands

NOUVELLE ÉDITION

MÉCANIQUE 2

LE COURS DE PHYSIQUE DE FEYNMAN

Richard Feynman | Robert Leighton | Matthew Sands

NOUVELLE ÉDITION

MÉCANIQUE 2

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

© 1963 California Institute of Technology, 2006, 2010 by Michael A. Gottlieb,
and Rudolf Pfeiffer.

Version française de Goéry Delacôte.
Coordination de M. Bloch.
Nouvelle édition révisée par Julien Leroiy
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

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.
Le Code de la propriété intellectuelle du 1er 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 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.
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).

© InterEditions, Paris, 1979
© Dunod, Paris, 1998, 2015, 2017, 2020 pour cette nouvelle présentation corrigée

11, rue Paul-Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-081087-1

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 AMÉRICAINE

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.

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

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 tableaux[1] (deux sources disponibles dans la *version électronique augmentée* de cette édition du *millenium*). 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 compulsa 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 dégagea 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 III[2]. 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'examinateur 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 *Feyman'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'*Edition 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.

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

cette *Nouvelle Édition du Millénium* (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 1975[3] « 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 Millénium 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 Leigthon 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 augmenté, 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*.

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

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 V

Préface de Richard Feynman XVII

Liste des symboles XXI

À propos de Richard Feynman XXV

Introduction XXVII

Chapitre 26. Optique : Le principe du moindre temps 1

26.1 La lumière 1
26.2 Réflexion et réfraction 2
26.3 Principe de Fermat du moindre temps 4
26.4 Applications du principe de Fermat 7
26.5 Un énoncé plus précis du principe de Fermat 12
26.6 Comment cela fonctionne-t-il ? 13

Chapitre 27. Optique géométrique 15

27.1 Introduction 15
27.2 Distance focale d'une surface sphérique 16
27.3 Distance focale d'une lentille 20
27.4 Grandissement 22
27.5 Lentilles composées 23
27.6 Aberrations 24
27.7 Pouvoir de résolution 25

Chapitre 28. Rayonnement électromagnétique 29

28.1 Électromagnétisme 29
28.2 Rayonnement 33
28.3 Le dipôle rayonnant 34
28.4 Interférence 36

Chapitre 29. Interférence 39

29.1 Ondes électromagnétiques 39
29.2 Énergie du rayonnement 40
29.3 Ondes sinusoïdales 42
29.4 Deux dipôles rayonnants 43
29.5 Les mathématiques de l'interférence 47

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

Chapitre 30. Diffraction **51**

30.1 L'amplitude résultante due à *n* oscillateurs égaux 51
30.2 Le réseau de diffraction 55
30.3 Pouvoir de résolution d'un réseau 59
30.4 L'antenne parabolique 60
30.5 Films colorés ; cristaux 61
30.6 Diffraction par des écrans opaques 62
30.7 Le champ d'un plan de charges qui oscillent 65

Chapitre 31. L'origine de l'indice de réfraction **71**

31.1 L'indice de réfraction 71
31.2 Le champ dû au matériau 75
31.3 Dispersion 78
31.4 Absorption 81
31.5 L'énergie transportée par une onde électrique 83
31.6 Diffraction de la lumière par un écran 85

Chapitre 32. Amortissement par rayonnement. Diffusion de la lumière **87**

32.1 Résistance de rayonnement 87
32.2 Le taux de rayonnement de l'énergie 88
32.3 Amortissement par rayonnement 91
32.4 Sources indépendantes 93
32.5 Diffusion de la lumière 95

Chapitre 33. Polarisation **101**

33.1 Le vecteur électrique de la lumière 101
33.2 Polarisation de la lumière diffusée 103
33.3 Biréfringence 104
33.4 Polariseurs 107
33.5 Activité optique 109
33.6 L'intensité de la lumière réfléchie 110
33.7 Réfraction anomale 113

Chapitre 34. Effets relativistes dans le rayonnement **117**

34.1 Sources en mouvement 117
34.2 Trouver le mouvement « apparent » 119
34.3 Rayonnement de synchrotron 121
34.4 Rayonnement de synchrotron cosmique 124
34.5 Rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) 126
34.6 L'effet Doppler 127
34.7 Le quadrivecteur ω, k 129
34.8 Aberration 131
34.9 La quantité de mouvement de la lumière 132

Chapitre 35. La vision en couleur **135**

35.1 L'œil humain 135
35.2 La couleur dépend de l'intensité 137
35.3 Mesurer la sensation de couleur 139
35.4 Le diagramme de chromaticité 144
35.5 Le mécanisme de la vision en couleur 146
35.6 La physiochimie de la vision en couleur 147

Chapitre 36. Mécanismes de la vision **153**

36.1 La sensation de couleur 153
36.2 La physiologie de l'œil 156
36.3 Les cellules à bâtonnet 161
36.4 L'œil composé (insecte) 162
36.5 D'autres yeux 166
36.6 Neurologie de la vision 168

Chapitre 37. Comportement quantique **173**

37.1 Mécanique atomique 173
37.2 Une expérience avec des balles 174
37.3 Une expérience avec des ondes 176
37.4 Une expérience avec des électrons 178
37.5 L'interférence des ondes d'électrons 180
37.6 En regardant les électrons 182
37.7 Premiers principes de mécanique quantique 186
37.8 Le principe d'incertitude 188

Chapitre 38. La relation entre les points de vue ondulatoire et corpusculaire **191**

38.1 Amplitudes d'onde de probabilité 191
38.2 Mesure de la position et de la quantité de mouvement 192
38.3 Diffraction cristalline 197
38.4 La dimension d'un atome 199
38.5 Niveaux d'énergie 201
38.6 Implications philosophiques 203

Chapitre 39. La théorie cinétique des gaz **207**

39.1 Propriétés de la matière 207
39.2 La pression d'un gaz 209
39.3 Compressibilité du rayonnement 214
39.4 Température et énergie cinétique 215
39.5 La loi du gaz parfait 221

Chapitre 40. Les principes de la mécanique statistique **225**

40.1 L'atmosphère exponentielle 225
40.2 La loi de Boltzmann 227
40.3 Évaporation d'un liquide 229
40.4 La distribution des vitesses moléculaires 231
40.5 Les chaleurs spécifiques des gaz 235
40.6 L'échec de la physique classique 238

Chapitre 41. Le mouvement brownien **243**

41.1 Équipartition de l'énergie 243
41.2 Équilibre thermique du rayonnement 247
41.3 Équipartition et l'oscillateur quantique 251
41.4 La marche aléatoire 255

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

Chapitre 42. Applications de la théorie cinétique **259**

42.1 Évaporation 259
42.2 Émission thermoionique 263
42.3 Ionisation thermique 265
42.4 Cinétique chimique 267
42.5 Les lois du rayonnement d'Einstein 270

Chapitre 43. Diffusion **275**

43.1 Collisions entre molécules 275
43.2 Le libre parcours moyen 278
43.3 La vitesse d'entraînement 280
43.4 Conductivité ionique 283
43.5 Diffusion moléculaire 284
43.6 Conductivité thermique 288

Chapitre 44. Les lois de la thermodynamique **291**

44.1 Machines thermiques ; la première loi 291
44.2 La deuxième loi 294
44.3 Machines réversibles 296
44.4 Le rendement d'une machine parfaite 301
44.5 La température thermodynamique 304
44.6 L'entropie 306

Chapitre 45. Illustrations de la thermodynamique **311**

45.1 Énergie interne 311
45.2 Applications 315
45.3 L'équation de Clausius-Clapeyron 319

Chapitre 46. L'encliquetage à rochet **325**

46.1 Comment fonctionne une roue à rochet 325
46.2 La roue à rochet en tant que machine 327
46.3 Réversibilité en mécanique 330
46.4 Irréversibilité 332
46.5 Ordre et entropie 334

Chapitre 47. Le son ; l'équation d'onde **337**

47.1 Les ondes 337
47.2 La propagation du son 340
47.3 L'équation d'onde 341
47.4 Solutions de l'équation d'onde 345
47.5 La vitesse du son 346

Chapitre 48. Battements **349**

48.1 Additionner deux ondes 349
48.2 Notes de battements et modulation 352
48.3 Bandes latérales 354
48.4 Les trains d'ondes localisés 356
48.5 Amplitudes de probabilité pour des particules 359
48.6 Ondes à trois dimensions 361
48.7 Modes normaux 362

Chapitre 49. Modes **365**

49.1 La réflexion des ondes 365
49.2 Ondes limitées avec des fréquences naturelles 367
49.3 Modes à deux dimensions 369
49.4 Pendules couplés 373
49.5 Systèmes linéaires 375

Chapitre 50. Harmoniques **377**

50.1 Tons musicaux 377
50.2 La série de Fourier 379
50.3 Timbre et accord 381
50.4 Les coefficients de Fourier 383
50.5 Le théorème de l'énergie 387
50.6 Les réponses non linéaires 388

Chapitre 51. Ondes **393**

51.1 Lames d'étrave 393
51.2 Ondes de choc 394
51.3 Ondes dans les solides 399
51.4 Ondes de surface 403

Chapitre 52. Symétrie dans les lois physiques **409**

52.1 Opérations de symétrie 409
52.2 Symétrie dans l'espace et le temps 410
52.3 Symétrie et lois de conservation 413
52.4 Réflexions dans un miroir 414
52.5 Vecteurs polaires et axiaux 417
52.6 Laquelle des deux mains est la droite ? 420
52.7 La parité n'est pas conservée ! 421
52.8 L'antimatière 423
52.9 Violation des symétries 425

Index **427**

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

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 passage 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 mainteur 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

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

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 detail.

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'ammener 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 III[1].

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. II 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

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

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

$\binom{n}{k}$ coefficient binomial n sur k

$a*$ conjugué complex de a

$\langle\,\rangle$ valeur attendue

∇ opérateur nabla, $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$

$\approx$ approximativement

$\sim$ de l'ordre de

$\propto$ proportionnel à

α accélération angulaire

ϵ_0 constante diélectrique ou permittivité du vide, $\epsilon_0 = 8{,}854187817 \times 10^{-12}$ F/m

λ longueur d'onde

μ coefficient de friction

ν fréquence

σ rayon

τ couple total

$\boldsymbol{\tau}$ vecteur de couple total

ω vitesse angulaire

$\boldsymbol{\omega}$ vecteur vitesse angulaire

$\boldsymbol{a}$ vecteur d'accélération

a_x, a_y, a_z composantes cartésiennes du vecteur accélération

a magnitude ou composante du vecteur accélération

A aire

$\boldsymbol{B}$ vecteur champ magnétique (induction magnétique)

B_x, B_y, B_z composantes cartésiennes du vecteur champ magnétique

c vitesse de la lumière, $c = 2{,}99792458 \times 10^8$ m/s

C capacitance

d distance

$\boldsymbol{E}$ vecteur champ électrique

E_x, E_y, E_z composantes cartésiennes du vecteur champ électrique

E énergie

$\boldsymbol{F}$ vecteur force

F_x, F_y, F_z composantes cartésiennes du vecteur force

F magnitude ou composante du vecteur force du vecteur champ électrique

g accélération de la pesanteur

G constante gravitationnelle

h constante de Planck, $h = 6{,}62606896 \times 10^{-34}$ J·s

$\hbar$ constante de Planck réduite, $\hbar = h/2\pi$

i nombre imaginaire unité

$\boldsymbol{i}$ vecteur unité de direction x

I courant électrique

I moment d'inertie

$\boldsymbol{j}$ vecteur unité de direction y

$\boldsymbol{k}$ vecteur unité de direction z

$\boldsymbol{L}$ vecteur moment angulaire

L magnitude ou composante du vecteur moment angulaire

L self-induction

m masse

m_0 masse au repos

$p_\mu = (E, \boldsymbol{p})$ quadrivecteur quantité de mouvement

$\boldsymbol{p}$ vecteur quantité de mouvement

p_x, p_y, p_z composantes cartésiennes du vecteur quantité de mouvement

p magnitude ou composante du vecteur quantité de mouvement

P puissance

$P(k, n)$ probabilité de Bernouilli ou binomiale

$P(A)$ probabilité d'observer l'événement A

q charge électrique

$\boldsymbol{r}$ vecteur position

r rayon ou distance

R résistance

s distance

S étrangeté

t temps

T demi-vie

T énergie cinétique

u vitesse

U énergie potentielle

$\boldsymbol{v}$ vecteur vitesse

v_x, v_y, v_z composantes cartésiennes du vecteur vitesse

v magnitude ou composante du vecteur vitesse

V vitesse

V différence de potentiel

W poids

W travail

x coordonnée cartésienne

y coordonnée cartésienne

z coordonnée cartésienne

Z impédance complexe

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

Mécanique 2

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

Électromagnétisme 1

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

Électromagnétisme 2

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

Mécanique quantique

$|1\rangle, |2\rangle$ un choix spécifique de vecteurs de base pour un système à deux états

$|I\rangle, |II\rangle$ un choix spécifique de vecteurs de base pour un système à deux états

$\langle\phi|$ état, écrit comme un vecteur d'état (*bra*)

$\langle f | s\rangle$ amplitude pour qu'un système de condition initiale $|s\rangle$ se trouve dans la condition finale $|f\rangle$

$|\phi\rangle$ état, écrit comme un vecteur d'état (*ket*)

κ constante de Boltzmann, $\kappa = 1{,}3806504 \times 10^{-23}$ J/K

$\boldsymbol{\sigma}$ vecteur de matrices de spin de Pauli

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ matrices de spin de Pauli

Φ_0 unité de base du flux

C coefficients de Clebsch-Gordan

E_{gap} énergie de gap

$\mathcal{E}_{\text{tr}}$ vecteur de champ électrique vertical

$\mathcal{E}$ vecteur de champ électrique

$\mathcal{I}$ intensité

$|L\rangle$ état d'un photon polarisé circulairement à gauche

m_{eff} masse effective d'un électron dans une structure cristalline

n *n*ième chiffre romain, **n** prenant les valeurs I, II, ... , **N**

N_n nombre d'électrons par unité de volume

N_p nombre de trous par unité de volume

$P_{\text{spin exch}}$ opérateur d'échange de spin de Pauli

$|R\rangle$ état d'un photon polarisé circulairement à droite

$U(t_2, t_1)$ opérateur désignant l'opération « attendre du moment t_1 au moment t_2 »

$Y_{l,m}(\theta, \varphi)$ harmoniques sphériques

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

À PROPOS DE RICHARD FEYNMAN

Né en 1918 à New York, Richard P. Feynman obtint son doctorat en 1942 à l'université de Princeton. En dépit de sa jeunesse, il joua un rôle important au sein du Projet Manhattan développé à Los Alamos pendant la Seconde Guerre mondiale. Il enseigna ensuite à Cornell et au California Institute of Technology. Il reçut le prix Nobel de Physique en 1965, aux côtés de Sin-Itiro Tomonaga et Julian Schwinger, pour ses travaux en électrodynamique quantique.

Si c'est la résolution de certains problèmes posés par la théorie de l'électrodynamique quantique qui lui valut son prix Nobel, Feynman mit également au point une théorie mathématique rendant compte du phénomène de superfluidité de l'hélium liquide. Puis, avec Murray Gell-Mann, il travailla sur les interactions faibles telles que la radioactivité beta. Par la suite, Feynman joua un rôle crucial dans la mise au point de la théorie des quarks, en élaborant son modèle des processus de collision de protons à hautes énergies.

Outre ces réussites remarquables, Feynman fut aussi à l'origine de l'introduction de nouvelles techniques de calcul et de nouvelles notations en physique – et surtout des diagrammes de Feynman, qui sont maintenant omniprésents, et qui ont transformé la manière de concevoir et calculer certains processus physiques élémentaires.

Feynman sut faire montre d'une incroyable efficacité en tant que pédagogue. Il était particulièrement fier, parmi ses nombreux prix et distinctions, de la médaille Oersted pour l'enseignement, qu'il avait obtenue en 1972. Le *Cours de Physique de Feynman*, publié pour la première fois en 1963, fut décrit par un chroniqueur de la revue *Scientific American* comme « difficile, mais nourrissant et plein de saveur. Vingt-cinq ans après, c'est la référence pour les enseignants et les meilleurs des étudiants ». Afin d'améliorer la compréhension et la diffusion de la physique dans le grand public, Feynman publia *The Character of Physical Law et QED : The Strange Theory of Light and Matter*. Il fut également l'auteur d'articles scientifiques qui sont devenus des classiques et de manuels pour les étudiants et les chercheurs.

Richard Feynman était aussi un homme engagé, de manière constructive. Son travail pour la commission Challenger est bien connu, en particulier sa célèbre démonstration de la sensibilité des joints au froid : une expérience simple et élégante ne nécessitant rien d'autre qu'un verre d'eau glacée et une pince. Moins connus sont les efforts déployés par Feynman pour lutter contre la médiocrité des manuels scolaires, lorsqu'il siégeait à la commission des programmes de l'État de Californie durant les années 1960.

On ne peut saisir avec justesse l'essence de l'homme qu'était Feynman à travers un récital de la myriade des réussites scientifiques et pédagogiques qui furent les siennes. Comme le sait tout lecteur de ses publications, y compris les plus techniques, la person-

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

nalité riche et vivante de Feynman illumine tout son travail. En plus d'être physicien, il fut tour à tour réparateur de radios, spécialistes de cadenas, artiste, danseur, joueur de bongo et même déchiffreur de hiéroglyphes mayas. Toujours curieux du monde alentour, il était d'un empirisme exemplaire.

Richard Feynman disparut le 15 février 1988 à Los Angeles.

INTRODUCTION

Ce livre est réalisé d'après un cours d'introduction à la physique, donné par le Professeur R.P. Feynman à l'Institut de Technologie de Californie pendant l'année universitaire 1961-62 ; il recouvre la première année d'un cours d'introduction de deux ans, suivi par tous les élèves de première et de deuxième année de Caltech et fut suivi en 1962-63 par un cours analogue couvrant la deuxième année. Les leçons constituent la partie essentielle d'une révision fondamentale, réalisée sur une période de quatre ans, du cours d'introduction.

La nécessité d'une révision fondamentale provenait à la fois du développement rapide de la physique dans les dernières années et du fait que les nouveaux étudiants montraient une capacité mathématique en augmentation constante comme résultat de l'amélioration du contenu des cours mathématiques de l'enseignement secondaire. Nous espérions tirer avantage de cette connaissance mathématique améliorée et également introduire suffisamment de matériau moderne pour rendre ce cours attirant, intéressant et plus représentatif de la physique actuelle.

Afin de faire naître une grande variété d'idées sur le type de matériau à inclure et sur la manière de le présenter, un nombre élevé de Professeurs appartenant à la Faculté furent encouragés à donner leurs idées sous forme de lignes directrices pour un cours revisé. Plusieurs de celles-ci furent présentées, furent discutées complètement et d'une manière critique. On se mit d'accord pratiquement immédiatement sur le fait qu'une révision fondamentale du cours ne pouvait être réalisée soit en adoptant simplement un autre manuel soit même en en écrivant un *ab initia*, mais que le nouveau cours devait être centré sur un ensemble de leçons devant être présentées au rythme de deux ou trois par semaine ; le texte approprié serait alors produit dans un deuxième temps au fur et à mesure que le cours se développerait et des expériences de laboratoire convenables seraient également mises au point pour s'adapter au contenu des cours. En conséquence, un schéma approximatif du cours fut établi, mais il fut reconnu que ceci était incomplet, que c'était une tentative, et sujet à des modifications considérables par qui que ce soit qui prendrait la responsabilité de préparer effectivement les leçons.

Pour ce qui est du mécanisme par lequel le cours devait finalement prendre forme, plusieurs plans furent considérés. Ces plans étaient pour la plupart assez semblables, prévoyant un effort coopératif de N Professeurs qui se partageraient l'entière besogne d'une manière symétrique et égale : chaque professeur prendrait la responsabilité de $1/N$ du matériau, ferait les cours et écrirait le texte pour sa partie. Cependant l'impossibilité d'obtenir une équipe en nombre suffisant, les difficultés de maintenir un point de vue uniforme à cause des différences de personnalités et de philosophies entre les participants, donnèrent l'impression que ces plans étaient irréalisables.

© Dunod - Toute reproduction non autorisée est un délit.

L'idée que nous possédions effectivement les moyens de créer non seulement un cours de physique nouveau et différent mais peut-être un cours unique, fut une heureuse inspiration du Professeur Sands. Il suggéra que le Professeur R.P. Feynman prépare et donne les leçons, et qu'elles soient enregistrées sur magnétophone. Transcrites et éditées, ces leçons deviendraient alors le manuel de ce nouveau cours. C'est essentiellement ce plan qui fut adopté.

Nous espérions que le travail nécessaire d'édition serait mineur, consistant simplement à tracer les figures et à vérifier la ponctuation et la grammaire. Il devait être réalisé par un ou deux assistants sur la base d'un travail à temps partiel. Malheureusement cet espoir fut de courte durée. Ce fut en réalité une opération considérable d'édition que de transformer la transcription mots pour mots, en une forme lisible, même sans la réorganisation ou la révision du matériau qui s'est avérée quelquefois nécessaire. De plus ce n'était pas un travail pour un éditeur scientifique ou pour un étudiant en cours de thèse, mais un travail qui nécessitait l'attention serrée d'un physicien professionnel à concurrence de dix à vingt heures par cours !

Les difficultés du travail d'édition jointes à la nécessité de placer un texte entre les mains d'étudiants aussi rapidement que possible imposa une limite stricte au degré réalisable de « polissage » du matériau et nous fûmes ainsi forcés de réaliser un produit préliminaire, mais correct du point de vue technique, qui pourrait être utilisé immédiatement, plutôt que de réaliser un produit qui pourrait être considéré comme achevé. À cause de la nécessité urgente d'un nombre croissant de copies pour nos étudiants et d'un intérêt croissant de la part d'instructeurs et d'étudiants de différentes autres institutions, nous décidâmes de publier le matériau dans sa forme préliminaire plutôt que d'attendre une révision fondamentale qui pourrait très bien ne jamais arriver. Nous n'avons aucune illusion sur le degré d'achèvement, de polissage ou d'organisation logique du matériau ; en fait, nous prévoyons plusieurs modifications mineures du cours dans le futur immédiat et nous espérons qu'il ne restera pas statique en forme comme en contenu.

En plus de ces leçons qui constituent une partie centrale importante du cours, il était nécessaire de donner des exercices adaptés pour développer l'expérience et le savoir faire des étudiants et des expériences convenables pour donner un premier contact en laboratoire avec le contenu de la leçon. Aucun de ces deux aspects n'est dans un état aussi élaboré que le matériau du cours, mais des progrès considérables ont été réalisés. Certains exercices ont été réalisés au fur et à mesure que les leçons progressaient, et ils furent développés et amplifiés pour être utilisés au cours des années suivantes. Cependant, parce que nous ne sommes pas encore maintenant convaincus du fait que les exercices puissent apporter suffisamment de variété et de richesse dans les applications sur le matériau des leçons pour rendre l'étudiant parfaitement conscient de la puissance extraordinaire placée à sa disposition, les exercices sont publiés séparément sous une forme moins permanente, afin d'encourager une révision fréquente.

Un certain nombre de nouvelles expériences, pour ces nouveaux cours, ont été mises au point par le Professeur H.V. Neher. Parmi elles, il y en a plusieurs qui utilisent le frottement extrêmement faible manifesté par un support gazeux : un nouveau conduit linéaire à coussin d'air avec lequel furent réalisées des mesures quantitatives de mou-

vement à une dimension, de collisions et de mouvement harmonique et une toupie de Maxwell supportée et conduite par l'air, avec laquelle les mouvements de rotation accélérés, la précession gyroscopique et la nutation purent être étudiés. Le développement de nouvelles expériences de laboratoire doit se continuer pendant une très longue période de temps.

Le programme de révision fut placé sous la direction des Professeurs R.B. Leighton, H.V. Neher et M. Sands. Les participants officiels au programme étaient les Professeurs R.P. Feynman, G. Neugebauer, R.M. Sutton, H.P. Stabler, F. Strong et R. Vogt, de la division de Physique, de Mathématique et d'Astronomie et les Professeurs T. Caughey, M. Plesset et C.H. Wilts, des divisions des Sciences de l'Ingénieur. L'aide utile de tous ceux qui ont contribué au programme de révision appelle de vifs remerciements. Nous sommes particulièrement redevables à la fondation Ford sans l'aide financière de laquelle ce programme n'aurait pu être réalisé.

ROBERT B. LEIGHTON

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

26 Optique : Le principe du moindre temps

26.1 La lumière

Ceci est le premier chapitre d'une série portant sur le sujet du *rayonnement électromagnétique.* La lumière que nous voyons n'est qu'une petite fraction d'un vaste spectre, les différentes parties de ce spectre se distinguant par différentes valeurs d'une certaine quantité qui varie. Cette quantité variable est appelée la « longueur d'onde ». Lorsque celle-ci varie dans la partie visible, la lumière modifie apparemment sa couleur du rouge au violet. Si nous explorons le spectre systématiquement depuis les grandes longueurs d'ondes jusqu'aux plus courtes, nous débutons par ce qui est appelé habituellement les *ondes de radio.* On peut obtenir techniquement ces ondes de radio sur une large plage de longueurs d'onde, certaines étant même plus longues que celles utilisées habituellement dans les émissions de radio ; les émissions de radio habituelles ont des longueurs d'ondes correspondant à environ 500 mètres. On trouve ensuite ce qu'on appelle les « ondes courtes », c'est-à-dire les ondes de radar, les ondes millimétriques, etc. Il n'y a pas de frontière réelle entre un domaine de longueur d'onde et un autre, parce que la nature ne nous présente pas de bords francs. Les nombres associés avec une certaine dénomination d'onde ne sont qu'approchés, et il en est de même bien sûr pour les noms que nous donnons aux différents domaines.

Ainsi, après avoir parcouru longtemps le domaine des ondes millimétriques, nous atteignons ce que nous appelons *l'infrarouge,* et ensuite le spectre visible. Passant ensuite de l'autre côté, nous pénétrons dans une région qui est appelée *l'ultraviolet.* Là où l'ultraviolet s'arrête, les rayons X commencent, mais nous ne pouvons pas précisément définir l'endroit de la transition ; c'est aux environs de 10^{-8} m ou 10^{-2} μm. Ce sont alors des rayons X « mous » ; puis il y a les rayons X ordinaires et les rayons X très durs ; puis les rayons gamma, etc., pour des valeurs de plus en plus petites de cette grandeur que l'on appelle la longueur d'onde.

À l'intérieur de ce vaste domaine de longueurs d'ondes, il y a au moins trois régions d'approximation qui sont spécialement intéressantes. Dans l'une d'entre elles, les longueurs d'ondes sont très petites par rapport aux dimensions de l'appareillage dont on dispose pour les étudier ; et de plus l'énergie des photons, selon la théorie quantique, est petite en comparaison avec la définition en énergie de l'équipement. Dans ces conditions, nous pouvons faire une première approximation grossière à l'aide d'une méthode appelée *l'optique géométrique*. Si d'un autre côté les longueurs d'ondes sont comparables aux dimensions de l'équipement, ce qui est difficile à réaliser avec la lumière visible, mais plus facile avec des ondes de radio, et si les énergies des photons sont toujours négligeables, une approximation très utile peut être réalisée en étudiant le comportement de ces ondes, sans tenir compte encore de la mécanique quantique. Cette méthode est

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

fondée sur la *théorie classique du rayonnement électromagnétique* qui sera étudiée plus loin. Si nous parvenons ensuite aux très petites longueurs d'ondes pour lesquelles nous pouvons oublier le caractère ondulatoire, mais où les photons ont une très *grande* énergie en comparaison de la sensibilité de notre équipement, les choses deviennent à nouveau simples. C'est la simple description *photonique* que nous n'analyserons que très rapidement. La description complète qui unifie l'ensemble dans un seul modèle ne sera pas à notre disposition avant longtemps.

Dans ce chapitre notre discussion se limitera au domaine de l'optique géométrique, dans lequel nous oublions les caractères ondulatoires et photoniques de la lumière qui seront tous deux expliqués le moment venu. Nous ne nous préoccupons même pas de dire ce *qu'est* la lumière, nous examinons simplement *son comportement* sur une échelle grande en comparaison avec les dimensions qui nous intéressent. Tout cela doit être dit afin d'insister sur le fait que ce dont nous parlerons ne sera qu'une approximation très grossière ; c'est un des chapitres qu'il nous faudra désapprendre plus tard. Mais nous allons le désapprendre très vite, car nous passerons presque aussitôt à une méthode bien plus précise.

Bien que l'optique géométrique ne soit qu'une approximation, elle est de très grande importance technique et de très grand intérêt historique. Nous présenterons ce sujet, plus que certains autres, d'un point de vue historique, afin de vous donner une idée du développement d'une théorie physique ou d'une idée physique.

La lumière, pour commencer, nous est familière et cela depuis des temps très reculés. Nous pouvons nous demander : par quel processus *voyons-nous* la lumière ? Il y a eu de nombreuses théories, mais elles se sont toutes finalement réduites à l'une d'entre elles, celle qui dit que quelque chose pénètre dans notre œil – quelque chose qui rebondit sur les objets pour entrer dans notre œil. Nous avons entendu cette idée depuis si longtemps que nous l'acceptons, et il nous est pratiquement impossible de penser que des gens très intelligents aient proposé des théories contraires – par exemple que quelque chose puisse quitter notre œil à la recherche de l'objet. Une autre observation importante est que lorsque la lumière va d'un endroit à un autre, elle se déplace en *ligne droite* s'il n'y a rien en chemin, et que les rayons ne semblent pas interférer entre eux. La lumière se propage dans toutes les directions dans la pièce, mais la lumière qui passe devant notre ligne de vision n'affecte pas la lumière qui vient d'un certain objet jusqu'à nous. Ceci fut à un certain moment un argument extrêmement puissant contre la théorie corpusculaire ; il a été utilisé par Huygens. Si la lumière était semblable à un ensemble de flèches projetées au fur et à mesure, comment d'autres flèches pourraient-elles les traverser *si* facilement ? De tels raisonnements philosophiques ne sont pas de grand poids. On pourrait toujours dire que la lumière est formée de flèches qui sont capables de se traverser !

26.2 Réflexion et réfraction

La discussion ci-dessus donne un aperçu suffisant des *idées* fondamentales de l'optique géométrique – il nous faut maintenant développer un peu plus l'aspect quantitatif. Jusqu'à présent nous considérions seulement le cas de la lumière se propageant en ligne

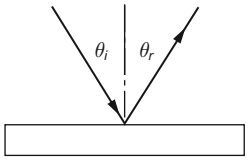

Figure 26.1 – L'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion.

droite entre deux points ; étudions maintenant le comportement de la lumière lorsqu'elle frappe divers matériaux. L'objet le plus simple est un miroir, et la loi pour un miroir est que lorsque la lumière frappe le miroir, elle ne continue pas en ligne droite, mais rebondit sur lui selon une nouvelle ligne droite qui se déplace lorsque nous changeons l'inclinaison du miroir. La question pour les Anciens était : quelle est la relation entre les deux angles en cause ? C'est une relation très simple, découverte il y a longtemps. La lumière frappant un miroir se propage de sorte que les deux angles, entre chaque rayon et le miroir, soient égaux. Pour certaines raisons, il est habituel de mesurer ces angles à partir de la normale à la surface du miroir. Ainsi, ce qu'on appelle la loi de la réflexion s'exprime

$$\theta_i = \theta_r. \tag{26.1}$$

C'est une proposition très simple, mais le problème se complique lorsque la lumière passe d'un milieu à un autre, par exemple de l'air dans l'eau ; nous voyons également ici qu'elle ne se propage pas en ligne droite. Dans l'eau le rayon est dévié par rapport à sa trajectoire dans l'air ; si nous varions l'angle θ_i de sorte que le rayon soit presque vertical, l'angle de « rupture » n'est plus aussi grand. Mais si nous inclinons le rayon de lumière d'un angle important, alors l'angle de déviation devient très grand.

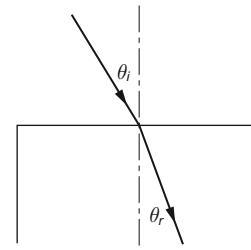

Figure 26.2 – Un rayon de lumière est réfracté lorsqu'il passe d'un milieu à un autre.

Quelle est la relation d'un angle à l'autre ? Ceci a également intrigué les Anciens pendant très longtemps, et ils n'ont jamais trouvé la réponse ! C'est cependant un des rares endroits dans toute la physique des Grecs où on peut trouver certains résultats expérimentaux consignés. Claudius Ptolémée dressa une liste des angles dans l'eau pour un grand nombre d'angles différents dans l'air. Le Tableau 26.1 montre les angles dans l'air, en degrés, et les angles correspondants mesurés dans l'eau. (On dit habituellement que les scientifiques grecs n'ont jamais fait d'expériences. Mais il aurait été impossible d'obtenir ces tableaux de valeurs sans connaître la vraie loi, sinon par l'expérience. On doit cependant remarquer que ceci ne représente pas des mesures indépendantes et soigneuses pour chaque angle, mais seulement certains nombres interpolés de quelques mesures, car ils trouvent tous parfaitement leur place sur une parabole.)

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.

Tableau 26.1

Angle dans l'air	Angle dans l'eau
10°	8°
20°	15-1/2°
30°	22-1/2°
40°	29°
50°	35°
60°	40-1/2°
70°	45-1/2°
80°	50°

Tableau 26.2

Angle dans l'air	Angle dans l'eau
10°	7-1/2°
20°	15°
30°	22°
40°	29°
50°	35°
60°	40-1/2°
70°	45°
80°	48°

Ceci est donc une des étapes importantes dans le développement d'une loi physique : d'abord nous observons un effet, ensuite nous le mesurons et nous le transcrivons dans un tableau ; ensuite nous essayons de trouver une *règle* par laquelle une chose peut être reliée à une autre. Le tableau numérique ci-dessus fut réalisé en l'année 140, mais ce n'est qu'en 1621 que quelqu'un trouva finalement la loi reliant les deux angles ! La règle, trouvée par Willebrord Snell, un mathématicien danois, est ce qui suit : si θ_i est l'angle dans l'air et θ_r l'angle dans l'eau, alors il apparaît que le sinus de θ_i est égal à une constante que multiplie le sinus de θ_r :

$$\sin\theta_i = n\sin\theta_r. \tag{26.2}$$

Pour l'eau le nombre n est approximativement égal à 1,33. L'équation (26.2) est appelée la *loi de Snell* ; elle nous permet de *prédire* comment la lumière est déviée lorsqu'elle passe de l'air dans l'eau. Le Tableau 26.2 montre les angles dans l'air et dans l'eau, d'après la loi de Snell. Remarquez le remarquable accord avec la liste de Ptolémée.

26.3 Principe de Fermat du moindre temps

Dans le développement progressif de la science, nous souhaitons obtenir davantage qu'une simple formule. Nous partons d'abord d'une observation, nous obtenons des nombres que nous mesurons, puis nous obtenons une loi qui résume tous les nombres. Mais le vrai *triomphe* de la science c'est de *pouvoir trouver une manière de penser* telle que cette loi soit *évidente.*

La première manière de penser qui rendit évidente la loi sur le comportement de la lumière fut découverte par Fermat aux environs de 1650, et elle est appelée *le principe du moindre temps* ou *le principe de Fermat*. Son idée fut la suivante : parmi toutes les trajectoires possibles que la lumière peut emprunter pour aller d'un point à un autre, la lumière choisit la trajectoire qui nécessite le temps le *plus court.*

Montrons d'abord que c'est vrai dans le cas du miroir, que ce simple principe contient à la fois la loi de propagation en ligne droite et la loi du miroir. Ainsi nous progressons dans notre compréhension ! Essayons de trouver la solution du problème suivant. Sur la Fig. 26.3 sont indiqués deux points A et B, et un miroir plan MM'. Quelle est la manière de se rendre de A en B dans le temps le plus court ? La réponse est d'aller en ligne droite de A vers B! Mais si nous ajoutons la règle supplémentaire que la lumière doive

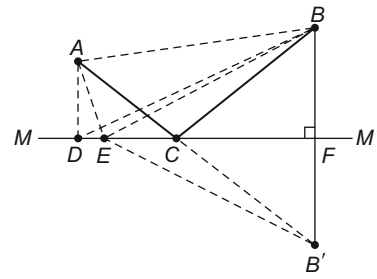

Figure 26.3 – Illustration du principe du moindre temps.

frapper le miroir et revienne toujours dans le temps le plus court, la réponse n'est pas aussi simple. Une manière serait d'aller aussi vite que possible au miroir et de se rendre ensuite en B, sur la trajectoire ADB. Bien sûr, nous avons alors un long parcours DB. Si nous nous déplaçons un petit peu vers la droite en E, nous augmentons légèrement la première distance, mais nous *diminuons* grandement le second, et ainsi la longueur totale de la trajectoire diminue, et du même coup le temps de parcours. Comment pouvons-nous trouver le point C pour lequel le temps soit le plus court ? Nous pouvons le trouver très facilement par une astuce géométrique.

Nous construisons de l'autre côté de MM' un point artificiel B', qui est à la même distance en dessous du plan MM' que le point B au-dessus du plan. Nous traçons ensuite la droite EB'. Puisque BFM est un angle droit et $BF = FB'$, EB est égal à EB'. Ainsi la somme des deux distances, $AE + EB$, qui est proportionnelle au temps de parcours, si la lumière se déplace avec une vitesse constante, est également la somme des deux longueurs $AE + EB'$. Le problème devient donc : quand la somme de ces deux longueurs est-elle minimum ? La réponse est facile : lorsque la ligne passe par le point C sous forme d'une *ligne droite* de A à B' ! En d'autres termes, nous devons trouver le point d'où nous nous rendons vers le point artificiel, et ce point sera le point correct. Si ACB' est une ligne droite, alors l'angle BCF est égal à l'angle $B'CF$ et ainsi à l'angle ACM. Ainsi l'énoncé que l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion est équivalent à l'affirmation que la lumière se rend vers le miroir d'une manière telle qu'elle retourne vers le point B' dans le *temps le plus court possible.* Originellement, Héron d'Alexandrie énonça que la lumière se déplace d'une manière telle qu'elle va vers le miroir puis vers l'autre point en empruntant la *distance* la plus courte possible, ce n'est donc pas une théorie moderne. Ce fut cela qui suggéra à Fermat que peut-être la réfraction devait opérer sur une base semblable. Mais, pour la réfraction, la lumière ne suit évidemment pas la trajectoire de plus courte *distance,* aussi Fermat eut l'idée de considérer qu'elle met le *temps* le plus court.

Avant d'analyser la réfraction, nous ferons une remarque supplémentaire concernant le miroir. Si nous avons une source de lumière au point B et qu'elle envoie de la lumière vers le miroir, alors nous voyons que la lumière qui vient en A à partir du point B vient en A exactement de la même manière que s'il y avait un objet en B' et pas de miroir. Bien sûr l'œil ne détecte que la lumière qui le pénètre effectivement, ainsi si nous avons un objet en B et un miroir qui fait que la lumière pénètre dans l'œil exactement de la

© Dunod. Toute reproduction non autorisée est un délit.