

Claude Fabre
Charles Antoine
Nicolas Treps

Introduction à la physique moderne : relativité et physique quantique

Cours et exercices

DUNOD

Illustration de couverture : © Sakkmesterke - Fotolia.com

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 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

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).



© Dunod, 2015

5 rue Laromiguière, 75005 Paris

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-072570-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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

La physique moderne est née au début du siècle dernier, lorsque les conceptions sur lesquelles était basée la connaissance du monde ont été bouleversées par quelques observations apparemment disparates concernant la lumière. Celle-ci semblait bien comprise et expliquée par les équations établies il y a cent cinquante ans par Maxwell, considérées comme l'aboutissement triomphal de la physique classique. Et pourtant, c'est en se posant des questions profondes sur la lumière, sa vitesse de propagation, la nature de l'onde qui la constitue, et sur certains phénomènes lumineux devenus accessibles à l'expérience – la distribution en fréquence de la lumière des corps chauffés, les propriétés de l'effet photoélectrique, le caractère discret des spectres absorbés ou émis par la matière – que les physiciens ont au début du XX^e siècle complètement révolutionné notre vision du monde. La relativité restreinte, en introduisant l'idée que la vitesse de la lumière ne dépend pas de l'observateur et en admettant la vitesse maximale de propagation de toute information, devait bouleverser notre conception de l'espace et du temps, ainsi que notre vision de l'univers et de la cosmologie lorsqu'elle fut étendue à la description des effets de gravitation dans le cadre de la relativité générale. Par ailleurs, en montrant que la lumière était à la fois une onde et un ensemble de particules (les photons), la théorie quantique nous introduisait dans le monde étrange de la physique de l'infiniment petit, celui où les notions d'onde et de corpuscules sont indissociablement mêlées, nous livrant les clés du monde microscopique. Albert Einstein est au point de départ de ces deux révolutions puisque la relativité restreinte et la physique quantique sont nées de deux articles qu'il a publiés en 1905 – année miraculeuse pour la science – et qu'on lui doit aussi la théorie de la relativité générale établie dix ans plus tard.

Fondamentale pour notre compréhension profonde de la nature, la physique quantique est aussi à la base de toutes les technologies modernes omniprésentes dans notre vie quotidienne. Sans physique quantique, il n'y aurait ni lasers, ni transistors, ni ordinateurs, ni imagerie médicale par résonance magnétique. Dans certains cas, la relativité joue également un rôle essentiel dans notre vie quotidienne. Par exemple, le GPS, système de navigation universel qui nous permet de nous repérer par triangulation n'importe où sur Terre avec une précision de quelques mètres, exploite à la fois la physique quantique nécessaire à la compréhension du fonctionnement des horloges atomiques, et la relativité, restreinte et générale, sans laquelle les mesures du temps nécessaires aux opérations de triangulation seraient entachées de larges erreurs. Les centrales nucléaires, sources d'énergie essentielle de notre monde contemporain, sont un autre exemple de réalisations qui auraient été impossibles sans les connaissances que nous ont apportées les théories de la relativité et de la physique quantique.

Introduction à la physique moderne

Il est paradoxal que ces théories dont l'importance est capitale paraissent ésothériques au public non spécialisé et soient encore considérées comme d'accès difficile dans l'enseignement, au point que leur étude quantitative soit repoussée tardivement dans le cursus des étudiants. Il est vrai que les concepts quantiques et relativistes peuvent être déroutants car ils concernent des phénomènes à des échelles de vitesses ou de distances inhabituelles à la perception de nos sens. Les mathématiques nécessaires à la compréhension de cette physique sont cependant relativement élémentaires, à la portée d'un élève des classes terminales scientifiques.

Les auteurs de ce livre ont trouvé la bonne façon d'expliquer comment ces concepts sont nés, en présentant le caractère logique des déductions ayant amené Einstein et ses collègues à la conclusion que les lois étranges de la relativité et du monde quantique devaient s'imposer. Et ils ont su accompagner les idées physiques du formalisme mathématique simple et rigoureux qui les traduit pour permettre le calcul d'effets physiques fondamentaux. Par-là, ils révèlent aux étudiants et à un public bien plus large la beauté de la théorie, initiant le lecteur à un monde dans lequel les concepts dont il a parfois entendu parler de façon qualitative trouvent leur place naturelle. La présentation en regard, dans un même volume, des deux révolutions qui ont changé notre vision du monde est également une heureuse innovation par rapport à la plupart des ouvrages qui séparent les deux questions. Il est en effet naturel de parler du photon en introduisant des notions de relativité, ne serait-ce que parce que la relation de Planck entre énergie et fréquence du quantum de lumière n'est, comme Louis de Broglie l'a reconnu, que l'une des composantes d'une relation vectorielle relativiste plus générale qui associe également, pour toute particule et pas seulement le photon, l'impulsion à la longueur d'onde de l'onde associée.

En quelque deux cent cinquante pages illustrées de figures très parlantes et émaillées d'encarts précisant des points importants sans couper le fil de la discussion générale, les auteurs ont réalisé la gageure de couvrir un champ immense, en équilibrant une approche théorique simple, la description d'expériences souvent très récentes, et celle d'appareils ou de dispositifs de notre vie quotidienne. Ainsi, le lecteur comprend le lien profond entre recherche fondamentale et innovation et la nécessité de la première comme condition essentielle du développement de la seconde. En ces temps où cette complémentarité n'est pas toujours bien comprise, ce livre joue ainsi un rôle d'éducation salutaire. J'ai également trouvé très positive la démarche consistant à décrire de vraies expériences et non pas des expériences de pensée pour analyser les concepts de base, et l'utilisation résolument moderne du langage de la théorie de l'information pour parler des concepts essentiels de la relativité et de la physique quantique. Tout à fait remarquable, enfin, est le point de vue pris par les auteurs de décrire une science en évolution, ouverte, qui pose encore de nombreuses questions non résolues dans les domaines de l'infiniment petit et de

l'infiniment grand. Il est bon que tout étudiant s'intéressant à ces questions puisse se les poser et qu'il ait entendu parler d'ondes de gravitation, de matière et d'énergie noire. Au moins sur ces plans, il en sait presque autant que les auteurs du livre et les maîtres qui lui enseignent la science connue... et cela peut l'inspirer en lui montrant qu'il reste encore en physique des terres vierges à explorer.

Ce livre sera extrêmement utile aux étudiants comme première approche à la physique moderne, aux enseignants qui y puiseront beaucoup d'idées pédagogiques pour leurs cours, ainsi qu'aux lecteurs curieux qui y trouveront une source d'information très riche pour compléter leur culture scientifique. Claude Fabre, Charles Antoine et Nicolas Treps y ont mis toute leur expérience d'enseignants de la physique et de chercheurs passionnés par la découverte encore si riche du monde des atomes et des photons. Spécialistes de la physique quantique, ils sont particulièrement bien placés pour nous parler des révolutions que l'étude de la lumière a déclenchées il y a un peu plus d'un siècle...

Serge Haroche
Collège de France,
Prix Nobel de Physique 2012

TABLE DES MATIÈRES

Préface	V
Avant-propos	XIII
Introduction	XV

PARTIE 1

RELATIVITÉ

Espace, temps et mouvement en physique	3
Chapitre 1. Mécanique classique et changement de référentiel galiléen	7
1.1 Mécanique newtonienne et principe de relativité galiléenne	8
1.2 Changement de référentiel galiléen	10
Chapitre 2. Lumière classique et changement de référentiel galiléen	13
2.1 Description ondulatoire de la lumière	14
2.2 Lumière et changement de référentiel	16
2.3 Mesures de la vitesse de la lumière	22
Chapitre 3. Principe de relativité restreinte Transformations de Lorentz	31
3.1 Principe de relativité restreinte	31
3.2 Transformations de Lorentz	34
Chapitre 4. Effets relativistes sur le temps et l'espace	39
4.1 Intervalle temporel : relativité du passé, du futur et de la simultanéité	39
4.2 Intervalle d'espace-temps	41
4.3 Longueur propre et contraction des longueurs	43
4.4 Durée propre et dilatation des durées	46
4.5 Les « jumeaux de Langevin »	48
4.6 Des expériences de pensée aux expériences réelles	49
Chapitre 5. Effets relativistes sur les vitesses	55
5.1 Composition des vitesses en relativité	55
5.2 Transformation de Lorentz pour une onde	58
Chapitre 6. Deux exemples de phénomènes relativistes	63
6.1 Le GPS : un laboratoire relativiste	63
6.2 Rayonnement synchrotron	65

Introduction à la physique moderne

Chapitre 7. Dynamique relativiste	69
7.1 Quelques rappels de dynamique classique	69
7.2 Quantité de mouvement relativiste	74
7.3 Énergie relativiste	78
7.4 Collisions relativistes	87
Chapitre 8. Réactions nucléaires et notions de radioactivité	95
8.1 Structure des noyaux atomiques, énergie de liaison	95
8.2 De multiples réactions nucléaires	99
8.3 Radioactivité et dosimétrie	105
Chapitre 9. Les quatre interactions fondamentales, la relativité générale	111
9.1 Interaction gravitationnelle et notion de relativité générale	111
9.2 Interactions électromagnétique, forte et faible	124
9.3 Conclusion : théories d'unification	130

PARTIE 2

MÉCANIQUE QUANTIQUE

Le monde quantique	135
Chapitre 10. Le photon : une introduction à la physique quantique	141
10.1 Le photon : un fait expérimental	142
10.2 Propriétés du photon	145
10.3 Temps et lieu d'arrivée du photon	149
10.4 Interférences lumineuses et photons	153
10.5 Bilan	156
Chapitre 11. Polarisation de la lumière : aspects classiques et quantiques	159
11.1 Description classique de la polarisation	159
11.2 Description quantique	164
Chapitre 12. Systèmes à plusieurs états : notion d'états quantiques	171
12.1 États quantiques	171
12.2 Manipulation et mesure d'états quantiques	174
12.3 Application à la cryptographie	177
12.4 Évolution des états quantiques	183
Chapitre 13. Ondes de matière : une introduction à la fonction d'onde	191
13.1 Onde de matière	191
13.2 Quantification de l'énergie pour une particule confinée	202
13.3 Inégalités de Heisenberg	210

Chapitre 14. Évolution temporelle de la fonction d'onde : équation de Schrödinger d'une particule matérielle	215
14.1 Propriétés de la fonction d'onde	215
14.2 Commentaires	216
14.3 Équation de Schrödinger pour la fonction d'onde	217
14.4 Exemple 1 : la particule libre	219
14.5 Exemple 2 : le puits carré infini	220
14.6 Généralisation	223
14.7 Exemple 3 : marche de potentiel, onde de matière évanescence	224
14.8 Mesure de la vitesse de la particule, notion d'observable	227
Chapitre 15. Les règles générales de la mécanique quantique	235
15.1 À la base de tout : le vecteur d'état	235
15.2 Évolution temporelle	238
15.3 La mesure, lien entre le système physique et l'observateur	239
15.4 Principe d'exclusion de Pauli	246
Chapitre 16. Notions de mécanique quantique « et » relativiste	249
16.1 Équation de Klein-Gordon	250
16.2 Équation de Dirac, théorie quantique des champs	250
16.3 Incompatibilité de la mécanique quantique et de la relativité générale	251
Exercices et problèmes	255
Bibliographie	283
Index	285

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage est issu d'un cours enseigné en deuxième année de licence à l'Université Pierre-et-Marie Curie Paris-Sorbonne Universités, ayant pour but d'initier les étudiants aux deux grands « piliers » de la physique actuelle que sont la relativité et la physique quantique. Il présente, au niveau le plus élémentaire possible, les concepts de base de ces deux théories et les illustre par de nombreux résultats expérimentaux récents. Il cherche avant tout à introduire les idées et outils essentiels nécessaires à la compréhension de ces domaines de la physique, en laissant volontairement de côté certains détails techniques ou théoriques qui font l'objet d'enseignements ultérieurs. Il vise également à permettre aux lecteurs d'accéder à des domaines de la physique qui sont à l'origine de recherches extrêmement actives dans les laboratoires de physique du monde entier.

Il s'adresse donc à toutes les personnes désireuses de s'initier à la « physique moderne », et de comprendre les bases et les enjeux de ses développements actuels : en premier lieu les étudiants de licence de physique, mais aussi ceux de licence de mathématique et de chimie, les étudiants des classes préparatoires et d'écoles d'ingénieurs et ceux préparant les concours de recrutement de professeurs de physique et chimie. Il sera certainement aussi très utile à tous les enseignants de physique désireux de renforcer leurs connaissances dans des domaines qui sont maintenant abordés à un niveau élémentaire dans les nouveaux programmes des lycées.

Les différents chapitres de ce manuel comportent des encarts qui ne sont pas indispensables à la compréhension des sujets abordés lors d'une première lecture. Ils permettent de les mettre en perspective ou bien détaillent certains calculs. Enfin, nous proposons à la fin de l'ouvrage des exercices et problèmes qui permettront au lecteur d'appliquer les concepts introduits et de les illustrer par des exemples. Les corrigés détaillés sont téléchargeables sur la page dédiée à l'ouvrage sur dunod.com.

Remerciements

Les trois auteurs tiennent à remercier tout particulièrement leurs collègues - maîtres de conférences, moniteurs et membres administratifs et techniques - qui ont participé au bon déroulement et à la mise au point de cet enseignement : J. Arlandis, M. Bertin, J. Beugnon, D. Brouri, T. Blanchard, C. Claveau, L. Delbes, J.-P. Ferreira, P. Fleury, R. Geiger, J. Joseph, A. Penin, M.-B. Povie, C. Sajus, T. Rybarczyk... et évidemment les étudiants dont les nombreuses questions ont contribué à faire évoluer cet enseignement, en particulier N. Proust et F. Bonnet pour leur relecture attentive du manuscrit. Nos remerciements vont aussi à nos maîtres qui nous ont enseigné et fait aimer cette physique que nous enseignons à notre tour : J.-L. Basdevant, C. Cohen-Tannoudji, A. Messiah, P. Turrenc, J. Dalibard, B. Linet, L. Nottale, D. Hirondel... et tout particulièrement S. Haroche qui a bien voulu écrire une préface pour cet ouvrage.

INTRODUCTION

La physique s'est élaborée au cours des siècles à partir d'observations de phénomènes naturels, puis d'expérimentations, c'est-à-dire de mesures quantitatives réalisées dans des conditions les plus contrôlées possibles. Celles-ci ont permis de dégager des grandeurs physiques caractéristiques, puis des corrélations quantitatives entre ces grandeurs, qui ont souvent pu souvent être écrites sous forme de lois mathématiques. Ces lois permettent à leur tour de prédire de nouveaux phénomènes et conduisent à de nouvelles expériences. Elles permettent en outre de concevoir et de mettre au point des applications technologiques.

D'abord relatives à des domaines restreints de phénomènes, ces lois ont été au fil des siècles englobées dans des ensembles cohérents de plus en plus vastes, dans lesquels elles apparaissent comme les conséquences d'un nombre de plus en plus réduit de principes de base. La physique est ainsi le résultat d'un processus essentiellement cumulatif : ses développements s'élaborent sur « les épaules des géants », que sont les physiciens des siècles passés, selon la magnifique expression de Newton.

Il arrive qu'une expérimentation conduise à un résultat en contradiction avec les prédictions faites à partir de ces lois. Ce grain de sable dans l'ensemble des explications physiques admises à un moment donné est l'indice qu'il faut modifier d'une manière ou d'une autre les principes de base, voire en changer totalement. Ce sont alors les prémices de ce qu'on appelle une « révolution scientifique ». Les physiciens doivent alors abandonner les certitudes anciennes et imaginer de nouvelles explications du monde. C'est un exercice intellectuel extraordinairement difficile dont seuls sont capables les plus grands esprits.

Les nouveaux principes mis progressivement en place, au prix d'intuitions géniales et de tâtonnements multiples, doivent alors non seulement rendre compte des nouveaux phénomènes observés, mais aussi englober comme cas particulier les phénomènes expliqués par l'ancienne théorie. Ils permettent aussi de prédire des phénomènes nouveaux, et d'élaborer de nouvelles technologies.

Le début du XX^e siècle a été le théâtre pratiquement simultané de deux de ces révolutions. On donne le nom de « théorie de la relativité » et de « mécanique quantique » aux deux nouveaux cadres conceptuels mis en place à l'issue de ces révolutions. Ces deux théories ont connu un immense succès, car elles ont permis de rendre compte avec une extrême précision de la quasi-totalité des phénomènes physiques connus. Au moment où nous écrivons ces lignes, certains phénomènes restent inexpliqués et font l'objet de recherches intenses, comme la supraconductivité à haute température ou la vitesse de rotation des galaxies. L'explication de ces phénomènes est cherchée

Introduction à la physique moderne

en général dans le cadre de l'une ou l'autre de ces deux théories. Certains cherchent de nouveaux cadres conceptuels. Mais, à notre connaissance, aucune observation expérimentale indiscutablement admise par la communauté des physiciens n'est actuellement en contradiction avec les prédictions de ces théories. Cette affirmation ne sera peut-être plus vraie demain, ou dans un siècle...

