

Claude Fabre
Charles Antoine
Nicolas Treps


Introduction à la physique moderne : relativité et physique quantique

Cours et exercices

DUNOD

Illustration de couverture : © Sakkmasterke - Fotolia.com

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



© Dunod, 2015

5 rue Laramiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-072021-7

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

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 ésotériques 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. Tourrenc, J. Dalibard, B. Linet, L. Nottale, D. Hirondelet... 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 conduite 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 simultanément 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...

ESPACE, TEMPS ET MOUVEMENT EN PHYSIQUE

Les lois régissant le mouvement des corps ont été pendant longtemps basées sur des « évidences » : le temps était « absolu », ou universel : il s'écoulait partout de la même manière. Les distances entre différents points d'un solide avaient aussi un caractère absolu, au point de pouvoir servir d'étalon de définition du mètre. Une force appliquée pendant un temps suffisamment long était susceptible, pensait-on, d'accélérer sans limite un corps matériel. La masse d'un corps était aussi considérée comme une caractéristique absolue.

Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, il paraissait impensable qu'il en fût autrement. Nous savons maintenant que ces « évidences » étaient des erreurs, et que le temps, l'espace et le mouvement sont en fait des concepts plus subtils : le « tic-tac » d'une horloge n'est pas le même si on le mesure sur une horloge au repos ou en mouvement par rapport à l'observateur. Il en est de même pour le « mètre étalon », dont la longueur n'a pas la même valeur selon qu'il se déplace ou non par rapport à l'appareil de mesure. Nous savons aussi qu'il existe une vitesse limite, celle de la lumière, pour le mouvement de n'importe quel objet matériel. Enfin, la masse d'un corps peut varier et se transformer en énergie utilisable.

Cette mise à mal de nos certitudes est venue paradoxalement d'interrogations sur une autre partie de la physique, l'électromagnétisme, qui inclut l'étude des phénomènes lumineux : l'article d'Einstein considéré comme fondateur de la théorie de la relativité a pour titre « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement ». Il propose comme point de départ une nouvelle « évidence », contraire à l'intuition mais indispensable pour la cohérence d'ensemble des lois expliquant les phénomènes physiques : l'existence d'une quantité absolue d'un autre type, la vitesse de propagation de la lumière dans le vide, qui ne dépend pas de l'état de mouvement de l'objet qui lui donne naissance. L'unité de longueur est maintenant liée à ce nouveau point de vue : elle est en effet définie comme la distance parcourue par la lumière pendant un intervalle de temps bien défini.

Au début du XX^e siècle, ce renversement des évidences est apparu plus conceptuel que pratique, car il impliquait des comportements vraiment nouveaux uniquement pour les objets physiques se déplaçant à une très grande vitesse par rapport à nos

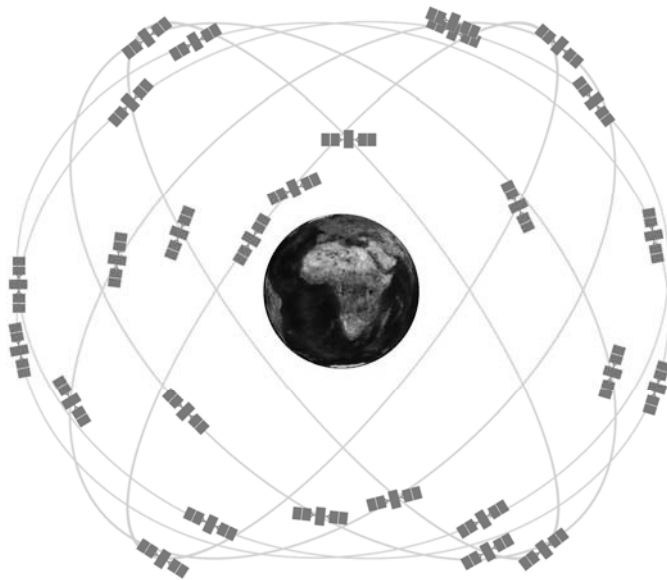


Figure I.1- Constellation des satellites GPS.

(source libre : <http://www.gps.gov/multimedia/images/>)

appareils de mesure, de l'ordre de $100\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, irréalisable expérimentalement. Ce n'est plus le cas maintenant, au début du XXI^e siècle, et ceci pour deux raisons :

- les progrès des technologies permettent maintenant de réaliser des mesures de distance et de temps d'une extrême précision : les petits écarts qui existent aux faibles vitesses entre les prédictions « classiques » et les prédictions de la théorie de la relativité deviennent accessibles à la mesure. L'exemple le plus frappant de cette situation est le GPS (figure I.1) qui ne permet de mesurer les coordonnées précises d'un point que parce qu'il utilise pour son fonctionnement les équations de la relativité. L'utilisation des « évidences » classiques conduirait à une erreur de positionnement qui dépasserait rapidement plusieurs kilomètres !
- pour étudier la structure intime de la matière, les physiciens ont mis au point des machines, comme les synchrotrons et les anneaux de stockage, qui sont susceptibles de communiquer une vitesse proche de celle de la lumière à des électrons, des protons, des ions, de les faire interagir à très grande énergie et de caractériser avec grande précision les phénomènes qui se produisent (figures I.2 et I.3 associées au *Large Hadron Collider* (LHC), le plus grand accélérateur de particules au monde). La relativité est évidemment le cadre obligé pour la description de ces phénomènes. La première partie de cet ouvrage, consacrée à l'exposé élémentaire des bases de la relativité, sera ainsi l'occasion d'une incursion dans la physique nucléaire, la radioactivité et la physique des particules élémentaires.



Figure I.2 - Vue aérienne du *Large Hadron Collider* situé à la frontière franco-suisse : avec schéma des différents accélérateurs et détecteurs de particules enterrés. Le cercle indique l'emplacement où circulent les particules, qui est enterré à une profondeur de 100 m.

(source : <http://sciencesprings.wordpress.com/2014/07/10/from-bbc-lhc-scientists-to-search-for-fifth-force-of-nature/>)

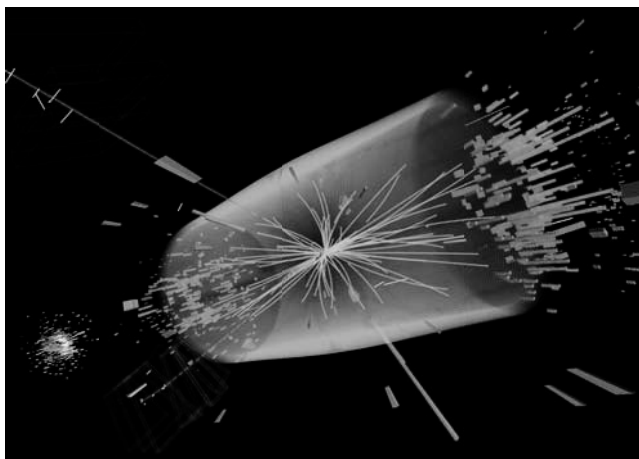


Figure I.3 - Événement typique, obtenu au LHC, sur lequel on a pu mettre en évidence la présence éphémère du mystérieux « boson de Higgs ».

(source : CERN : <https://cdsweb.cern.ch/record/1459462>)

MÉCANIQUE CLASSIQUE ET CHANGEMENT DE RÉFÉRENTIEL GALILÉEN

1

Le but de ce chapitre est de rappeler certains points importants de la mécanique classique concernant les changements de référentiels. Cette problématique est en effet au cœur de la relativité, et l'aspect classique des notions de temps et d'espace est une bonne introduction pour les chapitres suivants.



ENCART 1.1 La longue élaboration des concepts physiques relatifs au temps, à l'espace et au mouvement

Dès l'Antiquité, les hommes se sont posés des questions sur le temps, l'espace et le mouvement à partir de leur expérience quotidienne. Ils constatent qu'il y a des mouvements extrêmement réguliers dans le ciel, et des mouvements complexes sur la Terre, avec l'omniprésence de la gravité et des frottements. Par exemple, dans le monde méditerranéen, Aristote, au IV^e siècle avant J.-C., jette les bases d'une mécanique qualitative des mouvements terrestres dans un milieu plein et résistant. Il postule l'existence d'un haut et d'un bas absolu, et le fait que tout mouvement nécessite un « moteur » : le mouvement s'arrête lorsque son moteur n'agit plus. Il considère le temps comme donné *a priori*.

Pour les mouvements célestes, Ptolémée, au II^e siècle avant J.-C., postule que la Terre est immobile, et que les corps célestes tournent autour d'elle. Pour rendre compte des observations sur le mouvement complexe des planètes, il met au point le système des épicycles, qui repose sur la composition d'un très grand nombre de mouvements circulaires emboîtés.

Il faut attendre la Renaissance pour que soit contestée cette vision antique du monde. Copernic montre en 1543 que la description du mouvement des planètes est extrêmement simplifiée si on met le Soleil, et non la Terre, au centre de l'Univers.

Cette hypothèse hardie se heurte non seulement au dogme chrétien mais aussi à une objection majeure pour les esprits de l'époque : dans le système de Copernic, la Terre n'est plus immobile mais se déplace à grande vitesse. Ce mouvement, nécessairement « violent » pour la mécanique aristotélicienne, devrait donner naissance à des phénomènes mesurables : par exemple une pierre lancée verticalement devrait partir à grande vitesse dans la direction opposée au mouvement de la Terre.

On voit que les problèmes de choix d'un référentiel permettant d'expliquer le plus simplement possible un phénomène, et de composition des vitesses lorsqu'on change de référentiel, sont depuis toujours au cœur des interrogations sur l'espace, le temps et le mouvement.

Il revient à Galilée d'avoir fait tomber l'objection sur la non-observabilité du mouvement de la Terre dans son ouvrage *Dialogue sur les deux plus grands systèmes du monde*, publié en 1632, dont nous extrayons la citation suivante, extrêmement éclairante : « Enfermez-vous avec un ami dans la cabine principale à l'intérieur d'un grand bateau et prenez avec vous des mouches, des papillons, et d'autres petits animaux volants. Prenez une grande cuve d'eau avec un poisson dedans, suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un grand récipient en dessous d'elle. Avec le bateau à l'arrêt, observez soigneusement comment les petits animaux volent à des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. Le poisson nage indifféremment dans toutes les directions, les gouttes tombent dans le récipient en dessous, et si vous lancez quelque chose à votre ami, vous n'avez pas besoin de le lancer plus fort dans une direction que dans une autre, les distances étant égales, et si vous sautez à pieds joints, vous franchissez des distances égales dans toutes les directions. Lorsque vous aurez observé toutes ces choses soigneusement (bien qu'il n'y ait aucun doute que lorsque le bateau est à l'arrêt, les choses doivent se passer ainsi), faites avancer le bateau à l'allure qui vous plaira, pour autant que la vitesse soit uniforme [c'est-à-dire constante] et ne fluctue pas de part et d'autre. Vous ne verrez pas le moindre changement dans aucun des effets mentionnés et même aucun d'eux ne vous permettra de dire si le bateau est en mouvement ou à l'arrêt... »

Le mouvement, dans la mesure où il est uniforme, ne se distingue donc pas fondamentalement de l'état de repos et ne donne pas lieu à des phénomènes physiques observables. C'est un phénomène qui n'est pas violent, mais qui se perpétue de lui-même, sans besoin de « moteur ».

Le mouvement de la Terre étant donc inobservable, seule subsiste alors l'opposition théologique à l'hypothèse héliocentrique. Celle-ci l'a temporairement emporté, puisque Galilée a été contraint de renoncer en 1633 à son explication. Fort heureusement, les conceptions de Galilée et de Copernic se sont tout de même imposées naturellement comme seule conception rationnelle du monde dans les décennies suivantes, et ont définitivement triomphé avec la publication par Newton, en 1684, de lois mathématiques précises qui s'inscrivent dans le prolongement des conceptions de Galilée et qui permettent de déterminer quantitativement et avec une extrême précision le mouvement des corps terrestres aussi bien que célestes.

1.1 MÉCANIQUE NEWTONNIENNE ET PRINCIPE DE RELATIVITÉ GALILÉENNE

Nous n'allons pas ici détailler les principes de la mécanique classique dont les bases ont été jetées par Newton, mais en rappeler certains aspects qui seront importants dans la suite. Nous nous concentrerons en particulier sur la notion de référentiel, qui