

# **Relativité**

## **Fondements et applications**

Avec 150 exercices  
et problèmes résolus

**José-Philippe PÉREZ**

Professeur émérite de l'Université Paul-Sabatier de Toulouse

Avec la collaboration  
de **Éric Anterrieu**

Ingénieur à l'IRAP

**3<sup>e</sup> édition**

DUNOD

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<sup>er</sup> 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, 1999, 2005,  
2011 pour le tirage corrigé, 2016  
5 rue Laromiguière, 75005 Paris  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-075155-6

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.

# Table des matières

|                                                                                |      |
|--------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Avant-propos</b> . . . . .                                                  | viii |
| <b>Les grands noms de la relativité</b> . . . . .                              | x    |
| <b>Constantes physiques, notations et symboles</b> . . . . .                   | xvi  |
| <b>Description de l'ouvrage</b> . . . . .                                      | xix  |
| <b>La relativité en vingt questions</b> . . . . .                              | xxii |
| <b>1. Introduction. Principe de relativité</b>                                 |      |
| I. — Relativité newtonienne . . . . .                                          | 1    |
| II. — Comportement singulier de la lumière . . . . .                           | 5    |
| III. — Équations de Maxwell et transformation de Galilée . . . . .             | 10   |
| IV. — Principe de relativité de Poincaré-Einstein . . . . .                    | 14   |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                                        | 17   |
| <b>2. Transformation de Lorentz-Poincaré. Intervalle entre deux événements</b> |      |
| I. — Transformation de Lorentz-Poincaré . . . . .                              | 21   |
| II. — Intervalle entre deux événements . . . . .                               | 27   |
| III. — Formalisme quadridimensionnel . . . . .                                 | 31   |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                                        | 36   |
| <b>3. Fondements de la cinématique einsteinienne</b>                           |      |
| I. — Mesure des durées et des longueurs . . . . .                              | 40   |
| II. — Dilatation des durées . . . . .                                          | 42   |
| III. — Contraction des longueurs . . . . .                                     | 51   |
| IV. — Effet Doppler-Fizeau . . . . .                                           | 56   |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                                        | 64   |
| <b>4. Transformation einsteinienne des vitesses et des accélérations</b>       |      |
| I. — Formules de transformation des vitesses . . . . .                         | 68   |
| II. — Quadrivecteur vitesse . . . . .                                          | 70   |
| III. — Applications . . . . .                                                  | 72   |
| IV. — Formules de transformation des accélérations . . . . .                   | 74   |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                                        | 80   |

**5. Dynamique et énergétique einsteiniennes. Énergie de masse**

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| I. — Quadrivecteur énergie-quantité de mouvement . . . . .      | 85  |
| II. — Loi fondamentale de la dynamique einsteinienne . . . . .  | 86  |
| III. — Énergie cinétique, énergie de masse, énergie . . . . .   | 89  |
| IV. — Relation entre quantité de mouvement et énergie . . . . . | 94  |
| V. — Problème de Kepler en relativité restreinte . . . . .      | 96  |
| VI. — Formules de transformation des forces . . . . .           | 99  |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                         | 102 |

**6. Électrodynamique des particules rapides**

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| I. — Particule dans un champ électromagnétique . . . . .     | 106 |
| II. — Particule dans un champ électrique constant . . . . .  | 108 |
| III. — Particule dans un champ magnétique constant . . . . . | 112 |
| IV. — Exemples d'accélérateurs de particules . . . . .       | 116 |
| V. — Spectrométrie corpusculaire . . . . .                   | 118 |
| VI. — Cas de champs stationnaires non uniformes . . . . .    | 123 |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                      | 128 |

**7. Collisions de particules rapides**

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| I. — Propriétés générales des collisions . . . . .                | 136 |
| II. — Référentiel du centre de masse . . . . .                    | 139 |
| III. — Collisions élastiques . . . . .                            | 142 |
| IV. — Collisions inélastiques . . . . .                           | 147 |
| V. — Diffusion inélastique d'une particule par un atome . . . . . | 153 |
| VI. — Collisions avec photons . . . . .                           | 154 |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                           | 162 |

**8. Physique nucléaire et applications**

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| I. — Le noyau . . . . .                                        | 172 |
| II. — Radioactivité . . . . .                                  | 178 |
| III. — Ralentissement des particules . . . . .                 | 188 |
| IV. — Les particules fondamentales et leur détection . . . . . | 193 |
| V. — Énergie de liaison d'une réaction nucléaire . . . . .     | 198 |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                        | 209 |

**9. Électromagnétisme et relativité**

|                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------|-----|
| I. — Équations de Maxwell dans le vide . . . . .                 | 216 |
| II. — Quadripotential électromagnétique . . . . .                | 218 |
| III. — Transformation einsteinienne des champs . . . . .         | 222 |
| IV. — Lagrangien et hamiltonien d'une particule rapide . . . . . | 231 |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                          | 234 |

**10. Relativité générale**

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| I. — Caractère singulier de la gravitation . . . . .            | 239 |
| II. — Invariance de la forme des lois de la physique . . . . .  | 244 |
| III. — Particule dans le voisinage d'une grosse masse . . . . . | 250 |
| IV. — Décalage spectral d'origine gravitationnelle . . . . .    | 260 |
| V. — Cosmologie . . . . .                                       | 264 |
| <i>Exercices et problèmes</i> . . . . .                         | 279 |

**Annexe 1. Systèmes d'unités** . . . . . 284

|                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------|-----|
| I. — Unités de base et unités dérivées . . . . .          | 284 |
| II. — Le Système International en 2016 . . . . .          | 286 |
| III. — Différents systèmes d'unités électriques . . . . . | 287 |

**Annexe 2. Tenseurs** . . . . . 292

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| I. — Différents tenseurs en physique . . . . .             | 292 |
| II. — Concept de tenseur . . . . .                         | 294 |
| III. — Champ de vecteur sur une variété . . . . .          | 294 |
| IV. — Produit scalaire de deux vecteurs . . . . .          | 298 |
| V. — Dérivée covariante d'un vecteur en un point . . . . . | 300 |
| VI. — Géodésiques sur une variété . . . . .                | 302 |

**Annexe 3. Simulation en relativité** . . . . . 305

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| I. — Structures de données et fonctions de base . . . . .         | 305 |
| II. — Quadrivecteurs et transformation de Lorentz . . . . .       | 307 |
| III. — Émission de particules par un objet en mouvement . . . . . | 310 |
| IV. — Particule dans un champ magnétique stationnaire . . . . .   | 317 |
| V. — Action de champs électrique et magnétique . . . . .          | 325 |

**Réponses aux vingt questions** . . . . . 332**Solutions des exercices et problèmes** . . . . . 335**Bibliographie** . . . . . 431**Index** . . . . . 434

# Avant-propos

*Contrairement aux idées reçues, propagées par des sentences comme « tout est relatif », le principe de la relativité est plus lié à l'invariance qu'au relativisme de toute chose.*

*Dictionnaire culturel « Le Robert », 2005*

Ce cours, intitulé « Relativité », correspond globalement au programme traité en licence troisième année, à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, pendant un semestre de douze semaines, à raison d'une heure de cours et d'une heure de travaux dirigés par semaine.

C'est un cours introductif qui s'adresse à de jeunes étudiants dont les connaissances en mathématiques, en mécanique et en optique, bien que modestes, suffisent pour comprendre les fondements et les implications physiques de cette théorie.

Nous avons volontairement réduit le formalisme à sa plus simple expression, considérant que ce dernier privilégiait une présentation abstraite, voire mystique de la relativité. Au contraire, nous avons voulu bâtir notre exposé, de façon rationnelle et concrète, en nous appuyant sur l'expérimentation et les limites physiques des hypothèses newtoniennes. La signature  $+- - -$  caractérisant le carré de l'intervalle espace-temps a été délibérément choisie, afin de privilégier la durée, laquelle, invariante en relativité galiléenne, est remplacée, en relativité einsteinienne, par la durée propre ou par l'intervalle qui est son équivalent spatial par multiplication par la constante d'Einstein  $c$ .

Il n'est probablement pas inutile de rappeler que, comme son nom ne l'indique pas, la théorie de la relativité n'est pas l'expression scientifique d'un quelconque relativisme philosophique : elle est donc très mal résumée par l'expression « Tout est relatif ». Au contraire, les relativités newtonienne, restreinte et générale peuvent être considérées comme les recherches fructueuses de concepts universels, c'est-à-dire invariants par changement de référentiel.

Le cours est divisé en dix leçons :

i) La première concerne l'extension du principe newtonien de relativité aux phénomènes électromagnétiques, avec les expériences décisives de Fizeau et Michelson.

ii) Dans les leçons 2, 3 et 4, on développe toute la cinématique einsteinienne, en introduisant notamment le formalisme quadridimensionnel, mais sans omettre d'analyser ce qui est parfois présenté sous forme de paradoxes : les « jumeaux de Langevin », pour la dilatation des durées, et la barre en mouvement cependant contenue dans une ouverture plus courte, pour la contraction des longueurs.

iii) Les leçons 5, 6, 7, 8, qui concernent la dynamique et l'énergétique des particules, sont essentielles, puisqu'elles permettent d'introduire et de valider, par de multiples applications physiques (particules dans un champ électromagnétique et collisions), la loi fondamentale de la dynamique einsteinienne, ainsi que le concept d'énergie de masse.

iv) Les deux dernières leçons, 9 et 10, sont des extensions qui, en général, ne figurent pas dans les programmes d'enseignement de licence. L'avant-dernière « Électromagnétisme et relativité » permet de présenter l'électromagnétisme classique sous une forme synthétique très enrichissante. Dans la dernière, « Relativité générale », on donne un aperçu physique significatif de cette théorie et de son rôle majeur en cosmologie.

L'ouvrage s'adresse d'abord aux étudiants des licences de physique. Aussi les leçons sont-elles quasi autonomes, les exemples nombreux et les 150 exercices et problèmes accompagnés de leurs solutions, ce qui témoigne de notre volonté de communiquer à la fois un savoir-culturel et un savoir-faire utile pour préparer les divers examens et concours. En outre, dans l'annexe 3, intitulée « Simulation en relativité », on propose d'utiliser les possibilités qu'offre le langage Matlab pour résoudre quelques problèmes concrets, tels que l'anisotropie de l'émission de particules par des noyaux en mouvement ou la focalisation de particules chargées dans des spectromètres.

Comme il s'agit avant tout d'un ouvrage d'enseignement, nous avons systématiquement utilisé le système d'unités international et adopté les notations recommandées par l'AFNOR, abandonnant ainsi le « régionalisme » des notations de spécialistes. Dans ce contexte, nous avons adopté les unités standard, en évitant notamment la valeur unité pour la constante d'Einstein  $c$ , ce qui est précieux dans l'analyse dimensionnelle.

En raison de son découpage en leçons structurées, de son aspect peu technique, de l'accent mis sur le développement des idées et de la présence de thèmes physiques tels que « Électromagnétisme et relativité », et « Relativité générale », ce livre devrait intéresser aussi les candidats aux concours de recrutement de l'enseignement (CAPES et agrégations).

Plus largement, l'ouvrage est destiné à tous ceux qui s'intéressent à la théorie de la relativité, afin d'en comprendre la signification profonde et ainsi en écarter tout aspect mystérieux : pour être attractive, la théorie de la relativité n'a nul besoin de véhiculer une pensée magique ; son esthétique, sa capacité explicative et son pouvoir créatif suffisent.

Les étudiants de licence de l'Université Paul Sabatier, ainsi que ceux qui préparent l'agrégation de physique, m'ont beaucoup aidé par leurs questions et leurs exigences pédagogiques. Aussi figurent-ils en bonne place parmi tous ceux, notamment collègues de recherche ou d'enseignement, que je remercie pour leurs remarques et commentaires constructifs.

Mises à part quelques corrections typographiques ou pédagogiques, cette troisième édition diffère des précédentes principalement sur la leçon 10 dans laquelle la section « cosmologie » a été actualisée et développée en s'appuyant sur la nouvelle annexe 2 sur les tenseurs. L'ancienne annexe 1, « Rappels mathématiques », a été jugée inutile car déjà présente dans les autres ouvrages de la collection, et remplacée par une nouvelle annexe sur les systèmes d'unités en raison des modifications profondes que subira certainement dès 2018 le système international actuel.

# Les grands noms de la relativité

## François Arago

Astronome et opticien français, né à Estagel, dans le Roussillon, en 1786, et mort à Paris en 1853. Polytechnicien, il est nommé à 23 ans professeur à l'École Polytechnique, succédant ainsi à G. Monge, afin d'y enseigner la géodésie. Il oriente ses travaux de recherche vers l'optique, notamment dans le but d'améliorer la précision des observations en astronomie. Il s'intéresse alors à la nature ondulatoire et polarisée de la lumière ; dans ce contexte, il découvre la polarisation rotatoire du quartz, ainsi que les conditions d'obtention des franges d'interférence en lumière polarisée. Très influent, il entreprend une carrière politique qui le conduit à rédiger le décret d'abolition de l'esclavage dans les colonies françaises.

## Henri Becquerel

Physicien français, né à Paris en 1852 et mort à Le Croisic en 1908. Polytechnicien, puis professeur à l'École Polytechnique, il découvre en 1896, sur des sels d'uranium, trois mois après la mise en évidence des rayons X par W. Röntgen, la radioactivité bêta moins du thorium 234, c'est-à-dire l'émission d'électrons par des noyaux. Ses travaux sur la radioactivité sont récompensés en 1903 par le prix Nobel qu'il partage avec P. et M. Curie.

## Hans Bethe

Physicien américain, d'origine allemande, né à Strasbourg (ville allemande à cette époque) en 1906, et mort à Ithaca (état de New-York) en mars 2005. Après des études à Munich, Bethe prépare une thèse sous la direction de Sommerfeld, puis devient professeur à l'Université de Munich d'abord puis à celle de Tübingen. En 1933, après l'arrivée d'Hitler, il est démis de ses fonctions, en raison de ses origines juives. Il s'installe aux États-Unis en 1935, précisément à Ithaca, à l'Université Cornell où il enseigne la physique. Il devient célèbre en 1938 en décrivant le cycle du carbone dans les étoiles et en détaillant les réactions nucléaires de fusion qui sont à l'origine du rayonnement intense qu'elles émettent. En 1943, il dirige le groupe de physique théorique dans le projet Manhattan chargé de développer les premières bombes par fission nucléaire. Il reste cependant un adversaire du développement des armes nucléaires en s'opposant notamment au projet américain de guerre des étoiles. Il reçoit en 1967 le prix Nobel de physique pour l'ensemble de ses travaux. À partir de 1975, il s'intéresse à l'astrophysique et publie quelques contributions remarquables sur les supernovae.



### **Arthur Compton**

Physicien américain, né à Wooster (Ohio) en 1892 et mort à Berkeley en 1962. Il rend parfaitement compte de la diffusion des rayons X par le graphite en interprétant ce phénomène comme une collision entre un photon incident et un électron libre du matériau. Cette contribution, publiée en 1923, lui valut le prix Nobel en 1927.

### **Marie Curie**

Physicienne et chimiste française, née à Warsovie (Pologne) en 1867 et morte à Sallanches (Haute Savoie en 1934). À 24 ans, Marya Sklodowska quitte sa ville natale pour se rendre à Paris afin d'y effectuer des études scientifiques. Excellente étudiante à la Sorbonne, elle est reçue première à l'agrégation de physique en 1896. Elle est ensuite accueillie à l'École de Physique et Chimie de Paris, où elle étudie le nouveau rayonnement bêta découvert par H. Becquerel. Avec l'aide de son mari P. Curie, enseignant et chercheur dans cette École, elle identifie le radium et le polonium. En 1903, elle passe sa thèse, puis reçoit le prix Nobel de physique qu'elle partage avec son mari et Becquerel. Après la mort accidentelle de P. Curie, elle lui succède comme professeur à la Sorbonne. En 1911, elle reçoit un second prix Nobel, celui de chimie, pour avoir déterminé la masse molaire du radium. Curieusement, l'Académie des Sciences ne l'a jamais admise en son sein. Pendant la Première Guerre mondiale, elle crée un service de radiologie aux armées. Elle meurt en 1934 des suites d'une leucémie contractée précisément par une trop grande exposition aux rayons X et au rayonnement bêta.

### **Paul Dirac**

Physicien anglais, né à Bristol en 1902 et mort à Tallahassee en 1984. Grâce à des qualités exceptionnelles en mathématiques, il imagine un formalisme permettant de concilier l'approche ondulatoire de Schrödinger et la démarche matricielle d'Heisenberg, ce qui lui vaut d'obtenir en 1932 la célèbre chaire qu'occupa Newton à Cambridge. Sa contribution la plus importante, intitulée « L'équation d'onde relativiste de l'électron », a été publiée en 1928. Cette théorie prédit non seulement le spin de l'électron, mais aussi l'existence du positron. Il reçut le prix Nobel de physique en 1933, la même année que Schrödinger.

### **Albert Einstein**

Physicien allemand, naturalisé suisse puis américain, né à Ulm (Allemagne) en 1879 et mort à Princeton (USA) en 1955. Il est considéré, avec Newton, comme le plus grand physicien de tous les temps. Cependant ses qualités exceptionnelles ne furent remarquées ni au collège ni à l'université. En optique, ses contributions sont l'interprétation de l'effet photo-électrique, pour laquelle il reçoit le prix Nobel en 1921, celle de l'expérience de Michelson et Morley par extension du principe de relativité et celle de l'émission stimulée en 1917. Il est surtout connu pour la théorie de la relativité restreinte qu'il publie en 1905, et qu'il complète en 1915, en prenant en compte le caractère singulier de la gravitation. Son influence en cosmologie est considérable. Celle en physique statistique aussi, notamment avec la condensation dite d'Einstein-Bose.

### **Hippolyte Fizeau**

Opticien français, né à Paris en 1819 et mort à La Ferté-sous-Jouarre en 1896. Il fut le premier à mesurer la vitesse de la lumière par une expérience de laboratoire. Il montra expérimentalement, dès 1850, que la composition des vitesses, appliquée à la lumière se propageant dans un milieu liquide en mouvement, n'était pas de nature newtonienne. En outre, il découvrit la possibilité de mesurer le diamètre des étoiles à partir de méthodes interférométriques (synthèse d'ouverture). Enfin, il étendit, à l'optique, l'effet découvert en acoustique par Doppler, c'est-à-dire le décalage de fréquence mesuré par un observateur en mouvement par rapport à une source lumineuse.

### **Augustin Fresnel**

Opticien français, né à Broglie (Eure) en 1788 et mort à Ville d'Avray (région parisienne) en 1827. Il reprend les expériences d'Young (cf. *Optique*), les étend et propose, avec le physicien français François Arago, l'interprétation ondulatoire de la lumière. Il étudie également la diffraction à distance finie, ainsi que la propagation de la lumière dans les milieux cristallins. Il présente un mémoire complet sur ce dernier sujet à l'Académie des Sciences en 1823.

### **Galileo Galilei dit Galilée**

Astronome et physicien italien, né à Pise en 1564 et mort à Arcetri (près de Florence) en 1642. Il est considéré comme le précurseur de la science moderne, d'une part en utilisant les mathématiques pour décrire les lois de la physique, d'autre part en testant la validité de ces lois par l'expérimentation. Ses principales contributions en astronomie sont l'observation de la surface de la Lune et la découverte des satellites de Jupiter à l'aide d'instruments d'optique qu'il met lui-même au point. L'ensemble est publié en 1610 dans « Le messager des étoiles ». Cependant, c'est sa contribution en mécanique qui est la plus célèbre. En étudiant le mouvement des corps, il découvre les lois de la chute libre, notamment l'indépendance de la masse lorsque la résistance de l'air est négligée, l'isochronisme des petites oscillations d'un pendule ; il perçoit aussi le principe de l'inertie et se rallie aux idées héliocentriques de Copernic. Il publie alors le « Dialogue sur les deux principaux systèmes du monde » en 1632, ce qui lui vaut la condamnation de l'Inquisition en raison de sa vision copernicienne du Monde (mobilité de la Terre). C'est à la fin de ce procès qu'il aurait prononcé la fameuse phrase « eppur si muove. »

### **George Gamow**

Physicien et astrophysicien américain d'origine russe, né à Odessa en 1904 et mort à Boulder dans le Colorado en 1968. Après des études à Leningrad, à Copenhague avec N. Bohr et à Cambridge avec E. Rutherford, il obtient une charge d'enseignement en URSS. En 1928, il interprète la radioactivité  $\alpha$  à l'aide de la physique quantique, précisément l'effet tunnel. Il montre notamment qu'il est possible qu'un proton-projectile peut pénétrer dans un noyau et ainsi en modifier la constitution, ce qui est à la base de la transmutation nucléaire, réalisée pour la première fois par J. Cockroft et E. Walton. En récompensant ces derniers en 1951, le jury Nobel oublia de l'inclure dans le prix. En 1939, il s'installe aux USA et prend la nationalité américaine. Il fut le premier en 1948 à prévoir, avec deux collaborateurs, Alpher et Hermann, le rayonnement radio fossile, lequel fut découvert par hasard en 1965 par Penzias et Wilson.

Gamow fut aussi connu pour ses travaux de vulgarisateur scientifique dans lesquels se sont exprimés, outre ses grandes compétences, son style alerte et son humour.

### **William Rowan Hamilton**

Mathématicien et physicien irlandais, né en 1806 à Dublin et mort en 1865 près de Dublin. Enfant prodige puis étudiant génial, il impressionne, à 22 ans, l'Académie Royale d'Irlande en présentant un exposé moderne sur la théorie des rayons lumineux. Ce travail est le point de départ d'une contribution capitale en dynamique qui s'achèvera en 1833 sur une remarquable analogie entre l'optique et la mécanique. Cette synthèse débouchera sur la relation de L. de Broglie et sur l'équation de Schrödinger en mécanique ondulatoire.

### **Edwin Hubble**

Astrophysicien américain, né à Marshfield dans le Missouri en 1889 et mort à San Marino en Californie en 1953. À la suite d'une récompense universitaire, il interrompt en 1910 une carrière prometteuse de boxeur (!) pour suivre des études de droit (!) à Oxford, en Angleterre. Il rentre ensuite aux USA, s'installe comme avocat dans le Kentucky, puis abandonne cette activité en 1914 pour reprendre des études spécialisées en astronomie sous la direction de G. Hale. Ses observations à l'Observatoire de Yerkes (à Chicago), au Mont Wilson (Californie) en 1919, après deux ans d'arrêt pour participation à la Première Guerre mondiale, le conduisent à la mise en évidence de galaxies situées en dehors de la Voie Lactée. En découvrant les étoiles variables, les Céphéides, il peut déterminer de façon précise la distance d'objets célestes et établir la loi expérimentale de proportionnalité entre le décalage spectral cosmologique et leur distance à la Terre. Interprétant cette loi comme un effet Doppler-Fizeau, il conforte l'hypothèse de l'expansion de l'Univers. Après une participation à la Deuxième Guerre mondiale en Europe, il supervise en 1948 la réalisation et la mise au point du télescope deux mètres du Mont Palomar en Californie.

### **Georges Lemaître**

Astrophysicien belge, né à Charleroi en 1894 et mort à Louvain en 1966. Après des études d'ingénieur des mines à Louvain, qu'il interrompt en 1914, en raison de la guerre mondiale, et qu'il reprend en 1918, il s'oriente vers les mathématiques qu'il abandonne pour la physique. Une bourse lui permet de suivre des cours d'astrophysique à Cambridge (USA), puis au MIT (USA) où il soutient sa thèse en 1926. De retour en Belgique, il enseigne à l'université de Louvain, tout en poursuivant une carrière de prêtre. Il est le premier physicien à avoir émis l'hypothèse d'un Univers en expansion en 1927, mais sa publication en français passe inaperçue. Pire, traduite en 1931 par l'astrophysicien britannique A. Eddington, elle est entamée de l'information essentielle sur l'expansion ! En 1951, il s'oppose au pape Pie XII qui tente de récupérer ce phénomène pour justifier la genèse. En 1962, il s'oppose aussi à l'éviction des Wallons de l'Université catholique de Louvain.

### **Hendrik Antoon Lorentz**

Physicien néerlandais, né à Arnhem en 1853 et mort à Haarlem en 1928. Il devint en 1878 titulaire de la chaire de physique théorique à l'Université de Leyde. Ses contributions importantes concernent

l'électromagnétisme des milieux matériels, et notamment l'influence d'un champ magnétique sur le rayonnement lumineux émis par les atomes, ce qui lui vaut le prix Nobel en 1902, prix qu'il partage avec son élève P. Zeeman. Il est surtout connu pour les formules de transformation de la relativité restreinte qui respectent l'invariance de toutes les équations de Maxwell par changement de référentiel galiléen.

### **James Clerk Maxwell**

Physicien britannique, né à Edimbourg (Écosse) en 1831 et mort à Cambridge en 1879. En 1857, il publie un article sur la constitution probable des anneaux de Saturne, ce qui le fait connaître de la communauté scientifique et l'incite à s'intéresser aux systèmes constitués d'un grand nombre de particules. Il établit alors les principaux résultats de la théorie cinétique des gaz. C'est ensuite comme professeur d'université au King's College de Londres qu'il travaille sur l'électromagnétisme, chez lui (!), assisté par son épouse. Sa contribution décisive sur les équations de l'électromagnétisme date de 1876. Enfin, il est nommé à Cambridge pour diriger la construction du célèbre « Cavendish Laboratory ».

### **Albert Michelson**

Physicien américain d'origine polonaise, né à Strelno en 1852 et mort à Pasadena (Californie) en 1931. Expérimentateur de génie, il construisit un interféromètre, devenu désormais célèbre, pour mettre en évidence de très faibles chemins optiques, ce qui permit d'établir expérimentalement l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide, malgré ses propres convictions antirelativistes. Il reçut le prix Nobel en 1907 pour cette contribution qu'il publia seul en 1881 ; avec Morley, il en fournit une version plus précise en 1887. Il développa en outre la technique de synthèse d'ouverture imaginée par Fizeau pour déterminer le diamètre apparent des étoiles par des méthodes interférométriques.

### **Hermann Minkowski**

Mathématicien allemand, né à Kovno (Lituanie) en 1864 et mort à Göttingen en 1909. Après ses études à l'Université de Königsberg et une thèse qu'il présente en 1885, il exerce les fonctions de professeur, notamment à l'École Polytechnique de Zurich. C'est là qu'il rencontre son élève Einstein. Il est à l'origine de l'utilisation du formalisme quadridimensionnel pour exprimer le concept d'espace-temps en relativité.

### **Isaac Newton**

Mathématicien, astronome et physicien anglais, né à Woolsthorpe en 1642 et mort à Kensington en 1727. Il est considéré, avec Einstein, comme l'un des plus grands physiciens de tous les temps. Curieusement et comme ce dernier, il fut un élève qui ne révéla au collège aucune capacité exceptionnelle. C'est à Cambridge que l'on remarqua ses grandes possibilités. Plus influencé par Descartes que par Aristote, il publie en 1687 une synthèse magistrale de la mécanique, « Principia mathematica » ; il y énonce les fondements de la dynamique et relie, en introduisant la loi de la gravitation universelle, le mouvement des planètes et la chute des corps. En optique, il s'opposa à C. Huygens et R. Hooke, adeptes d'une théorie ondulatoire de la lumière. Cependant, sa contribution faite dans « Opticks » est, elle aussi, ex-

ceptionnelle : il interprète la décomposition spectrale de la lumière à partir d'expériences conçues avec des prismes et montre que la couleur blanche est un mélange des différentes couleurs spectrales ; il explique aussi la formation des images par des miroirs, et suggère même la possibilité d'échanges entre lumière et matière.

### **Henri Poincaré**

Mathématicien et physicien français, né à Nancy en 1854 et mort à Paris en 1912. Après des études à l'École Polytechnique et un diplôme d'ingénieur au corps des Mines, il passe une thèse en mathématiques en 1879. Deux ans après, il est nommé professeur à la Sorbonne. À 33 ans, il entre à l'Académie des Sciences. Sa contribution en mathématiques est considérable et fortement inspirée par la physique. Aussi ses apports à l'électromagnétisme et à la mécanique sont-ils considérés comme majeurs. Il a ainsi joué un rôle essentiel dans la recherche d'un groupe de transformation compatible avec l'invariance des équations de Maxwell et dans l'introduction des concepts relativistes développés par Einstein ; il est actuellement établi qu'il fut le premier à étendre le principe de relativité newtonien aux phénomènes électromagnétiques. En outre, sa contribution sur les équations différentielles, issues de la physique, en a fait le fondateur de la théorie des systèmes dynamiques à comportement chaotique.

### **Ernest Rutherford**

Physicien britannique, né à Brightwater, près de Nelson, en Nouvelle Zélande en 1871 et mort à Cambridge en 1937. Même si très jeune, en classe, il excellait sur tous les sujets, Rutherford fut intéressé surtout par les sciences et les mathématiques, au point de construire chez lui, pendant sa scolarité, un appareil lui permettant d'étudier la propagation des ondes électromagnétiques. Boursier, il poursuit ses études en Angleterre, à Cambridge, où il devint l'élève de J.J. Thomson, celui qui détermina pour la première fois le rapport  $e/m_e$  pour l'électron. Il fut successivement professeur à Montréal, à Manchester, puis à Cambridge en 1909, et prit la direction du Laboratoire Cavendish en 1919. Il est surtout connu pour ses travaux sur la radioactivité, notamment l'étude des rayons  $\alpha$ , qu'il identifie à des noyaux d'hélium, et de leur diffusion, ce qui lui permet d'établir le modèle de la structure atomique, dans lequel une charge positive est concentrée au centre, le noyau, et une charge négative est répartie autour. En 1920, au cours d'une conférence, il prévoit l'existence d'une particule, de masse égale à celle du proton, mais de charge nulle ; cette particule sera découverte dans son laboratoire par James Chadwick en 1932 et appelée neutron par ce dernier. Curieusement, il reçut, en 1908, le prix Nobel de chimie mais pas celui de physique.

# Constantes physiques, notations et symboles

## Constantes physiques

|                                                    |                                                                                                |
|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Constante de gravitation ou constante de Newton :  | $G = 6,674\,28(67) \times 10^{-11} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-2}$                   |
| Constante d'Einstein (valeur exacte) :             | $c = 2,997\,924\,580 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$                                             |
| Charge élémentaire :                               | $e = 1,602\,176\,487(40) \times 10^{-19} \text{ C}$                                            |
| $q_e^2 = e^2/(4\pi\epsilon_0)$ :                   | $q_e^2 \approx 230,708 \times 10^{-30} \text{ SI}$                                             |
| Masse de l'électron :                              | $m_e = 9,109\,382\,15(45) \times 10^{-31} \text{ kg}$<br>$m_e c^2 \approx 0,511 \text{ MeV}$   |
| Masse du proton :                                  | $m_p = 1,672\,621\,637(83) \times 10^{-27} \text{ kg}$<br>$m_p c^2 \approx 938,27 \text{ MeV}$ |
| Constante de Planck :                              | $h = 6,626\,068\,96(33) \times 10^{-34} \text{ J.s}$                                           |
| Constante de Planck divisée par $2\pi$ :           | $\hbar = 1,054\,571\,628(53) \times 10^{-34} \text{ J.s}$                                      |
| Nombre d'Avogadro :                                | $N_A = 6,022\,141\,79(20) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$                                     |
| Constante de Boltzmann :                           | $k_B = 1,380\,650\,4(24) \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$                                     |
| Constante des gaz parfaits :                       | $R = N_A k_B = 8,314\,472(15) \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$                                |
| Constante de Faraday :                             | $F = N_A e = 96\,485,339\,9(24) \text{ C.mol}^{-1}$                                            |
| Constante de structure fine :                      | $\alpha_e = q_e^2/\hbar c$<br>$= 7,297\,352\,537\,6(50) \times 10^{-3} \approx 1/137,036$      |
| Longueur d'onde de Compton relative à l'électron : | $\lambda_C = 2,426\,310\,217\,5(33) \times 10^{-12} \text{ m}$                                 |
| Unité de masse atomique :                          | $u = 1,660\,4 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931,5 \text{ MeV.c}^{-2}$                           |

Les valeurs de ces constantes fondamentales sont celles actualisées en 2006 (<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>). La valeur de la constante de Newton doit se lire :

$$G = 6,674\,28(67) \pm 0,000\,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-2}$$

## Notations et symboles

$\mathcal{R}$  et  $\mathcal{R}'$

$x, y, z$  ;  $x', y', z'$

$\mathbf{v}, \mathbf{a}$

$\mathbf{v}', \mathbf{a}'$

référentiels (repères d'espace et de temps)

composantes cartésiennes du vecteur position dans  $\mathcal{R}$  et  $\mathcal{R}'$

vecteurs vitesse et accélération d'une particule par rapport à  $\mathcal{R}$

vecteurs vitesse et accélération d'une particule par rapport à  $\mathcal{R}'$

|                                                                      |                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\mathbf{v}_e$                                                       | vitesse d'entraînement de $\mathcal{R}'$ en translation par rapport à $\mathcal{R}$        |
| 4- $x$ ( $ct, x, y, z$ )                                             | quadrivecteur espace-temps                                                                 |
| $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$                               | carré de l'intervalle élémentaire entre deux événements                                    |
| $\ 4-x\ ^2$                                                          | carré de la pseudo-norme de 4- $x$ : $c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$                           |
| $d\tau = ds/c$                                                       | durée propre élémentaire                                                                   |
| $m$                                                                  | masse d'une particule                                                                      |
| $M$                                                                  | masse d'un système de particules                                                           |
| $\beta_e = v_e/c$                                                    | rapport de la vitesse de translation de $\mathcal{R}'$ par rapport à $\mathcal{R}$ sur $c$ |
| $\gamma_e = (1 - \beta_e^2)^{-1/2}$                                  | facteur relativiste associé à $v_e$                                                        |
| $\beta = v/c$                                                        | rapport de la vitesse quelconque d'une particule sur $c$                                   |
| $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$                                      | facteur relativiste associé à la vitesse $v$ quelconque d'une particule                    |
| 4- $v$ ( $\gamma c, \gamma \mathbf{v}$ )                             | quadrivecteur vitesse                                                                      |
| 4- $a$                                                               | quadrivecteur accélération                                                                 |
| 4- $k$ ( $\omega/c, \mathbf{k}$ )                                    | quadrivecteur d'onde                                                                       |
| 4- $p$ ( $\gamma mc, \mathbf{p} = \gamma m\mathbf{v}$ )              | quadrivecteur énergie-quantité de mouvement                                                |
| $\mathbf{L}$                                                         | moment cinétique                                                                           |
| $\mathcal{E}_k = (\gamma - 1)mc^2$                                   | énergie cinétique d'une particule                                                          |
| $\mathcal{E}_0 = mc^2$                                               | énergie de masse d'une particule                                                           |
| $\mathcal{E}_p$                                                      | énergie potentielle                                                                        |
| $\mathcal{E}$                                                        | énergie d'une particule libre                                                              |
| $\mathcal{E}_t$                                                      | énergie totale d'une particule dans un potentiel                                           |
| 4- $f$ ( $\gamma \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}/c, \gamma \mathbf{F}$ ) | quadrivecteur force                                                                        |
| $\mathcal{R}^*$                                                      | référentiel du centre de masse                                                             |
| $\mathbf{E}, V$                                                      | champ et potentiel scalaires électriques                                                   |
| $\mathbf{B}, \mathbf{A}$                                             | champ et potentiel vecteur magnétiques                                                     |
| $\omega_c = qB/(\gamma m)$                                           | pulsation cyclotron d'une particule en dynamique einsteinienne                             |
| $\mathbf{P} = \mathbf{p} + q\mathbf{A}$                              | impulsion d'une particule ou moment linéaire                                               |
| $\mathcal{L}, \mathcal{H}$                                           | lagrangien, hamiltonien                                                                    |
| 4- $J$ ( $\rho c, \mathbf{J}$ )                                      | quadrivecteur source du champ électromagnétique                                            |
| 4- $A$ ( $V/c, \mathbf{A}$ )                                         | quadrivecteur potentiel                                                                    |
| 4- $\nabla$ ( $\partial/\partial ct, -\nabla$ )                      | quadiopérateur nabra                                                                       |
| $\square = \partial^2/c^2 \partial^2 t^2 - \nabla^2$                 | dalembertien                                                                               |
| $H$                                                                  | coefficient de Hubble                                                                      |
| $z$                                                                  | décalage spectral relatif                                                                  |
| $\Lambda$                                                            | constante cosmologique                                                                     |
| Gan                                                                  | giga-année (milliard d'années, 1 Gan = $3,155\,76 \times 10^{16}$ s)                       |

Alphabet grec

|         |          |            |        |           |           |         |          |          |         |            |            |
|---------|----------|------------|--------|-----------|-----------|---------|----------|----------|---------|------------|------------|
| alpha   | <i>A</i> | $\alpha$   | êta    | <i>H</i>  | $\eta$    | nu      | <i>N</i> | $\nu$    | tau     | <i>T</i>   | $\tau$     |
| bêta    | <i>B</i> | $\beta$    | thêta  | $\Theta$  | $\theta$  | xi      | $\Xi$    | $\xi$    | upsilon | $\Upsilon$ | $\upsilon$ |
| gamma   | $\Gamma$ | $\gamma$   | iota   | <i>I</i>  | $\iota$   | omicron | <i>O</i> | $o$      | phi     | $\Phi$     | $\phi$     |
| delta   | $\Delta$ | $\delta$   | kappa  | <i>K</i>  | $\kappa$  | pi      | $\Pi$    | $\pi$    | khi     | <i>X</i>   | $\chi$     |
| epsilon | <i>E</i> | $\epsilon$ | lambda | $\Lambda$ | $\lambda$ | rhô     | <i>P</i> | $\rho$   | psi     | $\Psi$     | $\psi$     |
| zêta    | <i>Z</i> | $\zeta$    | mu     | <i>M</i>  | $\mu$     | sigma   | $\Sigma$ | $\sigma$ | oméga   | $\Omega$   | $\omega$   |

milli (m) =  $10^{-3}$

micro( $\mu$ ) =  $10^{-6}$

nano (n) =  $10^{-9}$

pico (p) =  $10^{-12}$

kilo (k) =  $10^3$

méga (M) =  $10^6$

giga (G) =  $10^9$

téra (T) =  $10^{12}$

péta (P) =  $10^{15}$



# Description de l'ouvrage

L'ouvrage « Relativité » est découpé en dix leçons dont les trois dernières sont des compléments succints de physique nucléaire, d'électromagnétisme et de gravitation. Le déroulement de ce cours, qui s'adresse à des étudiants de licence 2 ou 3, est le suivant :

Leçons 1 à 5 : Introduction, Transformation de Lorentz-Poincaré, Intervalle entre deux événements, Dilatation des durées, Contraction des longueurs, Effet Doppler-Fizeau, Composition des vitesses, Loi fondamentale de la dynamique einsteinienne, quadrivecteur énergie-quantité de mouvement, énergie cinétique et énergie de masse.

Leçons 6 à 7 : Mouvement de particules chargées dans des champs électriques et magnétiques, Collisions élastiques et inélastiques entre particules.

Leçons 8 à 10 : Physique nucléaire, Électromagnétisme et Relativité Générale.

Les leçons 1, 2, 3, 4 et 5 tiennent un rôle central, car elles contiennent les éléments indispensables (définitions, lois et principes) à l'étude des leçons qui suivent. Même si ces dernières sont présentées dans un certain ordre, on peut les aborder dans un ordre quelconque, selon l'intérêt du moment ; en effet, toutes les leçons sont présentées de façon quasi autonome et le renvoi à des formules éloignées est pratiquement inexistant.

## Méthode de travail

### Lecture des leçons

Dans une phase initiale, une leçon doit être lue une première fois, en insistant sur l'introduction, laquelle situe la leçon dans le cours, et sur la conclusion qui répertorie l'ensemble des résultats essentiels.

Dans une deuxième phase, l'étudiant doit refaire avec soin tous les calculs intermédiaires.

Enfin, une dernière lecture devrait permettre d'appréhender complètement la leçon, notamment les résultats essentiels, les exemples significatifs et les ordres de grandeur.

### Exercices et problèmes

La lecture de la leçon achevée, l'étudiant doit passer à la phase d'application en faisant des exercices simples et courts, directement liés au contenu de la leçon ; il doit essayer de les résoudre avec le seul support que constitue le cours. En cas de difficultés, un coup d'œil rapide sur la solution, proposée en fin d'ouvrage, devrait l'aider. Il faut cependant éviter la simple lecture de la solution proposée et la mémorisation de la démonstration : mieux vaut revenir sur la leçon pour résoudre l'exercice. En cas de difficulté majeure, lire la solution et tenter de la refaire, sans aucune aide, un ou deux jours plus tard.

Une fois ces exercices rédigés, tenter de résoudre des problèmes d'examens et concours, généralement plus longs.

## Révision

Pour réviser, une ultime lecture devrait conforter l'apprentissage. Ne pas hésiter à souligner au crayon les parties essentielles et à porter en marge des remarques personnelles suggérées par la lecture d'autres ouvrages ou de documents annexes, tels que des revues à grand public (La Recherche, Pour la Science, Ciel et Espace, Science et Vie, etc.).

## Comment résoudre un problème de relativité ?

La pratique pédagogique de l'enseignement de relativité nous conduit à souligner préalablement quelques points essentiels en cinématique et en dynamique einsteiniennes.

### Cinématique

C'est la partie la plus délicate, car non intuitive. On la résout correctement si l'on suit les règles suivantes, même lorsque le texte du problème n'invite pas à le faire.

1) On s'astreint à écrire systématiquement les coordonnées des différents événements considérés. On change de référentiel en appliquant la transformation de Lorentz-Poincaré.

2) On écrit cette dernière transformation sous sa forme canonique, dans laquelle toutes les variables sont homogènes à une longueur ( $ct$  au lieu de  $t$ ).

3) On identifie le référentiel propre pour les durées (référentiel par rapport auquel les deux événements sont localisés au même point) et pour les longueurs (référentiel par rapport auquel la tige dont on mesure la longueur est fixe).

4) On introduit le quadrivecteur vitesse et le quadrivecteur d'onde, lesquels se transforment comme les coordonnées spatio-temporelles.

5) On distingue soigneusement les trois facteurs relativistes :  $\gamma_e$  associé à la vitesse d'entraînement  $\mathbf{v}_e$  de  $\mathcal{R}'$  par rapport à  $\mathcal{R}$ ,  $\gamma$  fonction de la vitesse  $\mathbf{v}$  de la particule par rapport à  $\mathcal{R}$  et  $\gamma'$  dépendant de la vitesse de cette même particule par rapport à  $\mathcal{R}'$ .

6) Enfin, on vérifie l'analyse par le test d'invariance de l'intervalle entre deux événements, lequel remplace le temps newtonien qui, en relativité, n'est plus universel.

### Dynamique et énergétique

C'est la partie la moins délicate et la plus riche sur le plan des applications : particules chargées dans des champs, électrique et magnétique, collisions élastiques ou inélastiques. Les précautions à prendre sont les suivantes.

1) Les théorèmes à appliquer sont analogues à ceux de la mécanique newtonienne, avec des expressions évidemment plus riches de la quantité de mouvement et de l'énergie  $\mathcal{E}$  d'une particule libre :

$$\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v} \quad \text{et} \quad \mathcal{E}_k = (\gamma - 1)mc^2 \quad \text{avec} \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

au lieu de  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$  et  $\mathcal{E}_k = mv^2/2$ .

2) La quantité  $\mathcal{E}_0 = mc^2$ , concept nouveau appelé énergie de masse, est reliée à la quantité de mouvement  $\mathbf{p}$  et à son énergie  $\mathcal{E}$  de particule libre par la relation générale :

$$\mathcal{E}^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 = \mathcal{E}_0^2$$

3) Dans l'application de la loi fondamentale de la dynamique, il est préférable de privilégier le concept de quantité de mouvement. Techniquement, cela revient à obtenir d'abord la quantité de mouvement par intégration puis à en déduire la vitesse par la relation :

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{p}}{\gamma m} = \frac{\mathbf{p}c^2}{\mathcal{E}} = \frac{\mathbf{p}c^2}{(p^2 c^2 + m^2 c^4)^{1/2}}$$

4) Pour toute collision, élastique ou inélastique, la quantité de mouvement totale et l'énergie totale se conservent. Dans le premier cas, cette dernière conservation implique celle de l'énergie cinétique. Comme en mécanique newtonienne, le référentiel du centre de masse est commode pour établir des propriétés caractéristiques ou pour déterminer des seuils énergétiques.

## Simulation

Le recours à la simulation numérique est particulièrement utile dans l'étude du mouvement de particules chargées rapides dans des champs non uniformes, et surtout dans le tracé de faisceaux de particules.

## Quelle est l'interprétation des résultats obtenus ?

Cette *dernière* phase est capitale, car elle permet d'apprécier la nature physique des résultats obtenus et donc de revenir sur des erreurs de calcul ou de programmation malheureuses. Dans la plupart des applications numériques, il est judicieux d'utiliser le MeV pour l'énergie, le  $\text{MeV} \cdot c^{-1}$  pour la quantité de mouvement et le  $\text{MeV} \cdot c^{-2}$  pour la masse.

# La relativité en vingt questions

1. *Pourquoi* dit-on parfois que la relativité est une théorie mal nommée ?
2. On lit souvent la phrase suivante : « Les quatre équations de Maxwell ne sont pas invariantes par transformation de Galilée ». *Pourquoi* une telle affirmation n'est-elle que partiellement correcte ?
3. *Pourquoi*, malgré certaines analogies, les ondes électromagnétiques sont-elles fondamentalement différentes des ondes acoustiques ?
4. On lit souvent, dans des textes relativistes, pas nécessairement destinés au grand public, que les intervalles temporel et spatial sont séparément invariants en relativité galiléenne. *Pourquoi* cette affirmation est-elle en partie incorrecte ?
5. Il existe deux façons d'écrire l'intervalle entre deux événements, l'une privilégiant le temps, l'autre privilégiant l'espace. *Pourquoi*, malgré une même efficacité calculatoire, la première est-elle pédagogiquement et même conceptuellement préférable à la seconde ?
6. En relativité restreinte, il est souvent commode de mesurer le temps en mètre, en utilisant la coordonnée  $ct$  au lieu de la variable temps  $t$ . *Pourquoi* cependant la phrase suivante souvent entendue : « Avec la relativité, le temps et l'espace ont désormais des statuts identiques », est-elle abusive ?
7. Lors d'une émission télévisée grand public sur la relativité, un scientifique (!) voulant illustrer la contraction des longueurs a affirmé qu'un voyageur, situé dans un train se déplaçant à grande vitesse par rapport à la Terre, voyait la largeur de la fenêtre de son compartiment se rétrécir. *Pourquoi* une telle affirmation traduit-elle une incompréhension de la relativité ?
8. *Pourquoi* n'y a-t-il pas réciprocité de situation dans l'expérience de pensée sur les jumeaux de Langevin ?
9. *Pourquoi* James Bradley a-t-il pu, en 1729, estimer la vitesse de la lumière dans le vide, avec une efficacité remarquable, en étudiant l'aberration de l'étoile  $\gamma$  du Dragon, alors qu'il s'appuyait sur la simple théorie newtonienne ?
10. *Pourquoi* l'expérience interférométrique de Fizeau, où la lumière se propage dans de l'eau en mouvement, suffisait à valider le point de vue d'Einstein sur l'espace et le temps, sans le recours de l'expérience de Michelson et Morley ?

11. *Pourquoi* le concept de masse variable ne présente aucun intérêt, et qu'en outre il est pédagogiquement dangereux ?
12. *Pourquoi* la tentative d'interpréter l'avance du périhélie de Mercure par une théorie relativiste d'espace-temps plat a-t-elle conduit à un échec ?
13. *Pourquoi* un ensemble de deux photons, de même énergie et de quantités de mouvement opposées, se comporte-t-il comme un système de masse non nulle ?
14. *Pourquoi* le mouvement relativiste d'une particule chargée, dans un champ magnétique seul, est-il simple à étudier et important à connaître ?
15. Dans l'étude des collisions entre particules rapides, on introduit souvent, même en mécanique einsteinienne, le référentiel du centre de masse. *Pourquoi* ?
16. Lorsqu'on veut créer de nouvelles particules, on s'arrange pour que le projectile et la cible soient en mouvement, de telle sorte que le référentiel du laboratoire soit aussi le référentiel du centre de masse. *Pourquoi* ?
17. *Pourquoi* un ensemble de deux champs orthogonaux, l'un électrique et l'autre magnétique, peut-il se réduire, dans d'autres référentiels, à un seul champ électrique ou à un seul champ magnétique ?
18. *Pourquoi* le rayonnement d'une étoile ne peut-il être attribué à un effondrement gravitationnel ?
19. Malgré une masse nulle, un photon émis par une étoile est dévié de sa trajectoire par une masse telle que le Soleil. *Pourquoi* ?
20. *Pourquoi* la constante cosmologique  $\Lambda$  exprime-t-elle l'équivalent d'une force répulsive ?



# 1

## Introduction. Principe de relativité

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, la plupart des physiciens étaient persuadés que l'ensemble des phénomènes physiques pouvaient être interprétés, soit par la mécanique de Newton (cf. *Mécanique*), soit par l'électromagnétisme de Maxwell (cf. *Électromagnétisme*). Cependant, dans ce tableau d'une science physique pratiquement maîtrisée, *seulement deux* questions restaient à résoudre, selon notamment l'éminent physicien écossais Lord Kelvin : *i*) le mode de propagation de la lumière ainsi que le comportement singulier de sa vitesse, *ii*) le rayonnement émis par les corps condensés.

Cette seconde question constitue le point de départ de la physique quantique (cf. *Quantique*),

Quant à la réponse à la première question, elle est à l'origine de la théorie, dite de la *Relativité*, qui se présente, après analyse, comme une double extrapolation du principe de relativité newtonien, selon lequel aucune expérience de *mécanique* ne permet de distinguer entre deux référentiels galiléens (cf. *Mécanique*). La première extrapolation, qui concerne l'extension de ce principe à la lumière, est la *Relativité Restreinte* (RR), la seconde est la *Relativité Générale* (RG).

Il convient donc avant tout de rappeler la Relativité Newtonienne.

### I. — RELATIVITÉ NEWTONIENNE

On appelle *relativité newtonienne* des lois de la mécanique leur invariance, par changement de référentiel galiléen (cf. *Mécanique*). Rappelons que ces derniers sont des référentiels en translation, rectiligne, uniforme, les uns par rapport aux autres, dans lesquels les forces qui apparaissent sont uniquement dues à l'interaction du corps considéré avec d'autres corps situés dans son voisinage.

**Remarque :** Il convient de ne pas confondre la translation, qui exprime l'absence de rotation d'un référentiel par rapport à un autre référentiel, et le mouvement rectiligne qui, lui, ne concerne qu'un point dont la trajectoire au cours du temps est une droite (cf. *Mécanique*). C'est une incorrection que l'on peut malheureusement lire, encore aujourd'hui, dans des textes écrits par des scientifiques.

#### I.1. — Coordonnées d'un événement

On exprime la relativité newtonienne en exprimant le changement de coordonnées d'un *événement*, c'est-à-dire d'un phénomène physique localisé, dans un référentiel donné, à la fois dans le temps (instant) et dans l'espace (lieu).