



S C I E N C E S & H I S T O I R E S

# La physique du XX<sup>e</sup> siècle

Michel Paty



Extrait de la publication



# La physique du XX<sup>e</sup> siècle

## Du même auteur

*Études d'interactions de neutrinos...* (CERN 65-12, Publications du CERN, Genève, 1965).

*L'étrange histoire des quanta*, avec B. Hoffman, collection « Points-sciences » (Seuil, Paris, 1981) ; nouvelle édition augmentée en 1992.

*La matière dérobée. L'appropriation critique de l'objet de la physique contemporaine*, Préface de L. Geymonat (Éd. des Archives Contemporaines, Paris, 1988) [Trad. en portugais, Brésil].

*L'analyse critique des sciences, ou le tétraèdre épistémologique (sciences, philosophie, épistémologie, histoire des sciences)*, collection « Conversciences » (L'Harmattan, Paris, 1990).

*Einstein philosophe. La physique comme pratique philosophique*, collection « Philosophie d'aujourd'hui » (Presses Universitaires de France, Paris, 1993).

*Albert Einstein, ou la création scientifique du monde*, collection « Figures du savoir » (Belles Lettres, Paris, 1997).

*D'Alembert ou la raison physico-mathématique au siècle des Lumières*, collection « Figures du savoir » (Belles Lettres, Paris, 1998).

*Matière et concepts. Rationalité et historicité des contenus conceptuels en physique*, collection « Penser avec les sciences » (EDP-Sciences, Les Ulis, à paraître).

## Édition d'ouvrages

*Quantum mechanics, a half century later*, avec J. Leite Lopes (Reidel, Dordrecht, 1977).

*Les particules et l'Univers. La rencontre de la physique des particules, de l'astrophysique et de la cosmologie*, avec J. Audouze, P. Musset (Presses Universitaires de France, Paris, 1990).

*A ciência nas relações Brasil-França (1850-1950)*, avec A.I. Hamburger, M.A. Dantes, P. Petitjean (Coleção Seminários, EDUSP, São Paulo, 1996).

*Le droit à l'énergie. Penser le XXI<sup>e</sup> siècle*, avec E. Malet (Éditions Passages, Paris, 1996).

*Aux frontières de la science*, avec E. Malet (Éditions Passages, Paris, 1999).

*Analyse et dynamique. Études sur l'œuvre de d'Alembert*, avec A. Michel (Presses de l'Université Laval, Québec, Paris, 2002).

Paul Langevin, son œuvre et sa pensée. Science et engagement, avec B. Bensaude-Vincent, M.-C. Bustamante, O. Freire, *Épistémologiques* 2(1-2), (2002), numéro spécial.

*Changes in interpretation and conceptual contents*, avec C. Debru, Symposium at the XXIIth International Congress of History of Science, Mexico, 2003.

# La physique du XX<sup>e</sup> siècle

Michel Paty

Directeur de recherche au CNRS



17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

**« Sciences & Histoires »**  
**Collection dirigée par Bénédicte Leclercq**

*La collection Sciences & Histoires s'adresse à un public curieux de sciences. Sous la forme d'un récit ou d'une biographie, chaque volume propose un bilan des progrès d'un champ scientifique, durant une période donnée. Les sciences sont mises en perspective, à travers l'histoire des avancées théoriques et techniques et l'histoire des personnages qui en sont les initiateurs.*

**Déjà paru :**

Léon Foucault, par William Tobin, adaptation française de James Lequeux

**À paraître :**

Le roman de la physique : de la baignoire à la pomme, par Cherif Zananiri

*Conception de la couverture :* Éric Sault

*Illustration de couverture :* Cygnus Loop. © Jeff Hester (Arizona State University) and Nasa. Portraits de la frise (de gauche à droite) : Paul Langevin, Werner Heisenberg, Albert Einstein, Jean Brossel, Claude Cohen-Tannoudji.

**ISBN : 2-86883-518-X**

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2003

# Sommaire

<b>Avant-propos</b>	<b>vii</b>
<b>1 Nouveaux concepts et transformation des sciences physiques</b>	<b>1</b>
<b>2 La théorie de la relativité</b>	<b>11</b>
<b>3 La physique quantique</b>	<b>25</b>
<b>4 L'interprétation des concepts quantiques</b>	<b>37</b>
<b>5 Atomes et états de la matière</b>	<b>55</b>
<b>6 Matière subatomique</b>	
<b>1. Dans le noyau de l'atome</b>	<b>77</b>
<b>7 Matière subatomique</b>	
<b>2. Les champs fondamentaux et leurs sources</b>	<b>95</b>
<b>8 Systèmes dynamiques et phénomènes critiques</b>	<b>125</b>
<b>9 Dynamique de la Terre</b>	<b>155</b>
<b>10 Les objets du cosmos : planètes, étoiles, galaxies, radiations</b>	<b>169</b>
<b>11 La cosmologie contemporaine : déploiement et transformations de l'Univers</b>	<b>203</b>
<b>12 Remarques sur les recherches des origines</b>	<b>225</b>
<b>13 Objets et méthodes</b>	<b>257</b>
<b>14 Conclusion. Quelques leçons de la physique du XX<sup>e</sup> siècle et un regard vers le XXI<sup>e</sup></b>	<b>269</b>

<b>Bibliographie</b>	<b>277</b>
<b>Index des noms de personnes</b>	<b>301</b>
<b>Index des notions</b>	<b>309</b>

Ce livre est dédié à la mémoire de André Lagarrigue, Paul Musset, André Roussel, physiciens.

# Avant-propos

En ce début du XXI<sup>e</sup> siècle, il est possible d'avoir un regard rétrospectif sur les accomplissements survenus dans nos connaissances au cours des cent dernières années. La physique, en particulier, a connu au cours du XX<sup>e</sup> siècle des renouvellements considérables grâce aux révolutions relativiste et quantique et à l'exploration de nouveaux domaines de la structure de la matière inimaginables au siècle précédent : physique atomique et constitution atomique de la matière condensée, chimie quantique, physique nucléaire et subnucléaire ou physique des particules élémentaires (réunies sous le chapitre de la « physique subatomique » avec les théories récentes d'unification), astrophysique et cosmologie. D'autres descriptions ont été renouvelées, comme celle de la physique des objets courants et les phénomènes dynamiques non-linéaires (dits « chaotiques »). La géophysique s'est développée entre la géologie, la physique et la géographie physique, en ouvrant une nouvelle perspective sur l'histoire de la Terre, de l'hypothèse de la dérive des continents à la tectonique des plaques. Cette histoire remarquable n'est qu'un exemple, parmi de nombreux autres, des interactions de la physique avec les autres sciences. Elles vont parfois donner naissance à de nouvelles disciplines à la jonction des anciennes, plus traditionnelles mais qui ne cessent pas, pour autant, d'exister et de fournir la base sur laquelle les nouvelles s'appuient.

Tous ces développements sont décrits dans ce livre, sur onze chapitres, dans leurs traits essentiels et en mettant en évidence les rapports interdisciplinaires qu'ils impliquent, leurs racines historiques, les nouveautés conceptuelles, ainsi que les interrogations que ces dernières suscitent du point de vue épistémologique. Bien entendu, il ne s'agira pas d'être exhaustifs. Nous voudrions surtout donner une idée de la dynamique de la connaissance qui a non seulement apporté de nouvelles données et révélé de nouveaux phénomènes, mais aussi puissamment contribué à renouveler sur bien des points notre conception de la nature, et nos moyens d'approche de celle-ci.

Le thème du chapitre suivant (chapitre 12), inhabituel dans un livre sur la physique, se tient à l'interface de cette science et d'autres disciplines, comme prolongement dans une autre direction d'un thème abordé au chapitre 11 avec la cosmologie : celui des origines de la vie, à la frontière de la physico-chimie et de la biologie. Quelques aspects de la question des origines dans son ensemble sont abordés à ce propos. On s'attend à ce que cette question, naguère suspecte à l'esprit scientifique, se présente de manière bien différente selon la nature de ce dont on considère l'origine, ou les origines. On peut d'ailleurs commencer avec l'apparition de la pensée, et notamment de la pensée réflexive qui est celle de la connaissance et se manifeste avec l'homme (peut-on dire comment, et à quel moment ?) : question qui n'est pas déplacée dans un

ouvrage sur les sciences physiques, s'il nous importe de mesurer la place originare de l'homme dans la nature physique. La question des origines se pose de la manière la plus concrète à partir de l'établissement de l'évolution des formes, formes du vivant en biologie, formes des objets cosmiques et de l'Univers en cosmologie. Mais nous verrons que la question des origines de la vie se pose, dans sa localisation spatio-temporelle, d'une manière très différente de celle de l'Univers, en raison, en particulier, de l'unicité et de la totalité de ce dernier (qui définit avec lui-même l'espace et le temps).

Le chapitre 13 est consacré à quelques éléments d'information et de réflexion sur certains changements caractéristiques survenus dans les méthodes de la physique. D'une part, les méthodes théoriques, caractérisées par une abstraction accrue dans le recours à des théories mathématiques, semblent de plus en plus éloignées des notions communes et des intuitions familières. D'autre part, les méthodes expérimentales évoluent vers la réalisation de grands appareillages complexes réalisés à l'aide d'importants moyens financiers, matériels et humains. Par ailleurs, l'organisation des expériences s'effectue sur un mode qui se rapproche du mode industriel avec ses stratégies, ses spécialisations, ses concurrences, ses justifications et ses rapports au succès, liés à la capacité des prédictions théoriques (ce qui constitue les caractères de la « big science »). Mais c'est aussi, et en partie par cela même, la nature des sciences physiques qui se voit questionnée d'une manière plus forte en apparence que par le passé. Cette interrogation concerne tout d'abord leur *objet*, le statut de leur « formalisation » mathématique et du rapport de celle-ci à ce qui peut être dit « physique » (pensé à travers les phénomènes donnés dans l'expérience). Ces changements ont contribué à multiplier les applications de la physique et de ses techniques à d'autres sciences (par exemple, les méthodes de datation, l'utilisation des rayonnements tant en technologie qu'en médecine, l'analyse de données par visualisation, de la physique des particules élémentaires à l'astrophysique de l'Univers lointain...).

Le quatorzième et dernier chapitre reprend quelques leçons du parcours effectué, et esquisse brièvement quelques interrogations sur ce que seront peut-être, ou non, les sciences et la physique au XXI<sup>e</sup> siècle. Si certaines directions peuvent être esquissées, la connaissance scientifique, par définition, réserve les nouveautés de l'inconnu. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, à la veille des révolutions relativiste et quantique qu'il était loin d'imaginer, le physicien Lord Rayleigh considérait que la physique était une science presque achevée, qui comportait deux ombres seulement : la non-détection du vent d'éther et le comportement du « rayonnement noir ». Or, ces deux phénomènes, inexpliqués par la physique classique d'alors, étaient gros des deux révolutions (quantique et relativiste) qui ont ensuite bouleversé cette science. Mais, en même temps, ces deux révolutions ne surgirent pas de rien : les connaissances de l'époque les portaient (au moins en partie), pour ainsi dire, dans leur sein. S'il est donc présomptueux de prétendre prédire ce que sera la physique de demain, le regard sur celle du siècle qui vient de se terminer nous permet de risquer quelques réflexions épistémologiques pour mieux comprendre ce qui s'est réellement passé, en profondeur, dans les renouvellements de nos connaissances, en tentant d'en saisir le mouvement dans l'ordre des significations. Cette perspective constitue, en fait, l'axe du présent ouvrage.

Le texte est parfois ponctué, lorsque la nécessité s'en fait sentir, notamment pour des détails biographiques, de notes de bas de page. Chaque chapitre est accompagné d'encadrés explicatifs et d'illustrations. Une bibliographie de textes sources et de lectures complémentaires, relativement détaillée sans être, bien entendu, exhaustive, est donnée en fin de volume, séparément pour chaque chapitre.

En rédigeant ce livre, je me suis efforcé de le rendre lisible du plus grand nombre, sans jargon spécialisé ni appareil mathématique, en développant de la manière la plus claire possible les notions même difficiles, dans l'intention d'en donner à comprendre les enjeux, du point de vue de la nature telle que nous la concevons et de la connaissance, sans les brouiller par des images faciles et trompeuses. Le lecteur pourra ainsi se donner une représentation à son propre usage de ce qu'est cette matière dont il est fait et dont est constitué l'Univers où il se trouve plongé. Le récit de ces connaissances et de leur établissement est celui d'une aventure de l'esprit, somme toute assez extraordinaire, qui le concerne aujourd'hui tout autant que les héros qui en ont tissé l'histoire au long du siècle écoulé, à la suite de ceux qui les ont précédés. Puisse le lecteur partager un peu de la passion intellectuelle qui les a menés. Communiquer cette passion, et ses raisons, telle est la motivation qui me l'a fait écrire.

*Cette page est laissée intentionnellement en blanc.*

# Chapitre 1

## Renouveaux conceptuels et transformation des sciences physiques

Sommes-nous aujourd'hui (au début du XXI<sup>e</sup> siècle) en mesure de dire ce qui aura été important et caractéristique de telle ou telle science, d'une manière générale et en particulier de la physique, au long du XX<sup>e</sup> siècle ? Si tel est le cas, cela suppose que notre regard actuel soit capable d'évaluer ce qui est advenu dans cette discipline pendant le siècle qui vient de s'écouler, disons de 1900 à 2000. Cela suppose que nous soyons en mesure de dresser le tableau bien compris des connaissances acquises, du moins d'en reconnaître les grandes lignes et les significations fondamentales. L'établissement d'un tel tableau demande, en particulier, de ne pas s'en tenir aux seuls résultats, théoriques et expérimentaux, et à leurs incidences et applications pratiques, mais de les saisir dans une certaine perspective intellectuelle. Celle-ci doit établir le rapport de ces résultats entre eux, dans chaque grand domaine ou discipline de cette science, mais également dans leur ensemble, dans le champ disciplinaire dénommé « la physique », en partie différent de ce qu'il était aux siècles précédents, et aussi dans ses relations avec d'autres domaines de la connaissance.

L'histoire des sciences et des idées n'est pas ici à une bien meilleure enseigne que l'histoire « tout court » (c'est-à-dire l'histoire sociale, économique, politique), bien que l'objet des connaissances scientifiques tienne *a priori* moins à la contingence des événements purement historiques. En effet, l'histoire des sciences n'est pas seulement celle des hommes (au sens générique !) qui font la science, mais celle des idées, « exactes » ou « objectives », de cette science, soit de la nature, soit des formes mathématiques. D'une manière générale,

cette histoire nous enseigne que même si l'on se croit capable de faire un tel bilan, rien ne nous dit qu'il soit vraiment définitif, car l'avenir est ouvert : la connaissance actuelle se situe entre son passé et son futur, et les connaissances passées doivent, en règle quasi générale, faire l'objet de réévaluations dans le temps, et même parfois à court terme. Le rythme de ces réévaluations s'est accéléré dans les derniers siècles avec les mutations sociales et le progrès des connaissances dans tous les domaines.

Cependant, nos connaissances « bien acquises », acceptées de manière générale et enseignées, nous semblent souvent si assurées qu'il nous est difficile d'imaginer que celles du futur, au moins du futur immédiat, ne seraient pas directement prévisibles à partir d'elles. Les premiers auteurs de science-fiction moderne (Jules Verne, Herbert-George Wells, ...), même si nous admirons leurs anticipations imaginatives et ingénieuses, nous paraissent bien timides à côté de ce que nous avons connu après eux, et « la science dépasse la fiction » dans la mesure où la nature dépasse les représentations que nous nous en donnons à un stade donné, et nous oblige à les modifier.

Nous pouvons penser décrire de manière objective et directe les connaissances acquises par la physique au cours du XX<sup>e</sup> siècle et, à partir de là, prévoir quelles seront les grandes lignes de celle du siècle qui s'ouvre devant nous. Mais comment en être sûrs ? Un petit apologue nous aidera à comprendre la difficulté, non seulement à anticiper nos connaissances futures mais à évaluer exactement les connaissances que nous venons d'acquérir. Imaginons qu'au lieu d'avoir à décrire l'essentiel des connaissances en physique acquises au XX<sup>e</sup> siècle, on nous demande d'établir un bilan de celles du siècle précédent, le XIX<sup>e</sup>. Nous aurions deux manières possibles de répondre à une telle demande.

La première manière serait d'essayer de jouer « le jeu du contexte », en nous imaginant en historien scrupuleux de cette période quand celle-ci s'achève, et en ne tenant pas compte, par méthode, des connaissances acquises postérieurement (au XX<sup>e</sup> siècle). Nous essaierions donc de nous situer à la fin de l'époque considérée, en 1899 ou 1900. Cependant, nous serait-il possible de ne tenir absolument aucun compte de ce que nous avons appris depuis, quant à la signification des connaissances que nous avons alors ? Cela ne paraît pas si facile compte tenu des diversités d'appréciation de l'importance au cours du temps de tel ou tel résultat, sur lequel les connaissances nouvelles jettent une lumière souvent très différente,

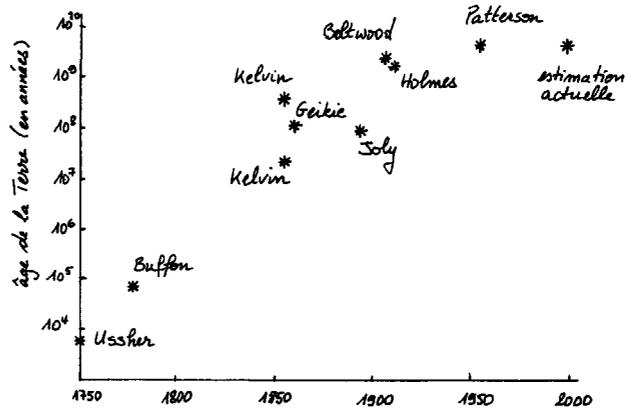
et compte tenu des réorganisations parfois radicales qu'elles entraînent.

Nous pouvons du moins tenter l'exercice en nous mettant dans la position de l'historien qui se proposerait de saisir l'époque étudiée comme de l'intérieur. Dans la mesure du possible, il mettrait entre parenthèses ce qu'il a appris des périodes ultérieures, qui ne lui servirait, en vérité, qu'à prendre un certain recul par rapport à l'objet de sa description, à se situer par rapport à elle (et peut-être à ajuster son objectivité à son égard). Il essaierait cependant de s'en tenir strictement aux connaissances de l'époque et à la signification qui leur était attribuée alors. Il dresserait ainsi le tableau de ces savoirs acquis, de leurs connexions entre eux, de leurs applications techniques et de ce qu'ils représentaient par rapport à la culture, aux questions philosophiques, à la situation de l'homme dans le monde et dans l'Univers... Un bon matériau de base lui serait fourni par les bilans et les perspectives en physique, en mathématiques, en chimie, en biologie, dans les sciences de la Terre, en astronomie, qui ont été préparés à l'époque par les meilleurs esprits, les meilleurs spécialistes de ces disciplines.

La seconde manière de réaliser une description de ce même passé serait de la faire tout simplement à partir d'aujourd'hui, et de considérer les mêmes connaissances acquises au long du XIX<sup>e</sup> siècle avec cette fois le recul d'un siècle en plus. Le bilan que nous en ferions serait certainement très différent du précédent. En effet, les développements marquants dans chaque science survenus au XX<sup>e</sup> siècle ont changé les appréciations que nous faisons aujourd'hui par rapport à celle que les savants (ou le public) pouvaient en faire au XIX<sup>e</sup> siècle. Souvent, ce qui nous semble important aujourd'hui leur était simplement inconnu ou leur paraissait de portée secondaire. Dans la plupart des cas, on ne pouvait tout simplement pas alors imaginer des éléments fondamentaux des connaissances futures qui devaient bouleverser les manières de voir les plus courantes.

Par exemple, considérons les propriétés du champ (électrique ou magnétique), représentées par des équations différentielles partielles, désormais sans le support d'un *éther matériel* comme milieu continu : alors que ce dernier paraissait nécessaire pour penser ces *champs* avant la théorie de la relativité restreinte, nous nous en passons très bien depuis. Ou encore, prenons l'âge de la Terre (objet de spéculations à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle) en fonction des connaissances de l'époque, notamment en thermodynamique : dans une perspective de refroidissement, sans apport significatif d'énergie,

Figure 1.1. Âges de la terre proposés par différents physiciens et géologues.



on envisageait l'histoire de la Terre comme celle d'une suite de contractions, et l'âge qui lui était ainsi attribué la rajeunissait considérablement par rapport aux quelques quatre milliards d'années environ que la science d'aujourd'hui lui octroie. La physique apporta, dans les premières années du XX<sup>e</sup> siècle, la connaissance de sources d'énergie terrestre internes très grandes, avec la radioactivité naturelle, d'où résultait la possibilité de transformations dynamiques. L'observation de la complémentarité des côtes de l'Afrique occidentale et de l'Amérique du Sud orientale (Brésil et Argentine), notée dès la fin du siècle précédent, jointe à la découverte plus récente de l'expansion des fonds océaniques, conduisit à une théorie de la dérive des continents fondée sur la tectonique des plaques. Très assurée aujourd'hui, elle serait apparue proprement impossible il y a cent ans. De même, les estimations sur la durée de « vie » du Soleil (calculées par William Thomson, Lord Kelvin), dans une perspective de combustion chimique, étaient sans commune mesure avec celle que devait fournir la connaissance de l'énergie dégagée dans les réactions de fusion nucléaire produites au sein de notre étoile.

On pourrait évoquer aussi bien d'autres sciences. Par exemple, les statistiques génétiques faites sur des petits pois par Gregor Mendel à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, qui intéressaient peu et pouvaient être vues au mieux comme un passe-temps de moine-jardinier : les lois de la génétique selon la biologie moléculaire développée dans la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle donnaient la raison profonde de ce qui n'était jusqu'alors apparu à la plupart que comme une curiosité sans grande conséquence. Désormais les lois de Mendel, passées quasiment inaperçues au début, sont considérées comme l'une des acquisitions les plus importantes de la biologie de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Considérons encore la question des fondements logiques des mathématiques, de Gottlob Frege et Bertrand Russell à Kurt Gödel, qui a connu un renversement fulgurant de perspective : le célèbre théorème dû à ce dernier exclut de pouvoir fonder rationnellement les mathématiques (même les plus simples, comme l'arithmétique) sur la seule logique. Nous pourrions aussi évoquer les développements technologiques qui ont suivi les avancées de la physique et qui ont modifié notre environnement quotidien et nos conditions de vie (de l'énergie nucléaire aux rayons laser, à l'électronique des ordinateurs, à la chirurgie de haute précision, aux voyages dans l'espace...).

Ces évocations suffisent à montrer combien les développements les plus marquants qui ont surgi au XX<sup>e</sup> siècle étaient assurément imprévisibles, même s'ils n'étaient pas tous et totalement impensables à strictement parler. Ceux qui l'étaient se sont développés à partir de germes déjà présents dans les connaissances acquises, mais selon des modalités qui n'étaient elles-mêmes pas totalement prévisibles : elles impliquaient nécessairement d'autres développements dont on pouvait difficilement se faire alors une idée précise. Les sciences sont liées entre elles, et les transformations des connaissances et des techniques se déploient en étroite corrélation. Pour pouvoir prédire ce que les unes et les autres seront, il faudrait dominer en même temps la connaissance de tous ces fronts. Toutefois cela resterait encore insuffisant, car l'essence de l'inconnu c'est précisément de ne pas exister encore dans l'espace de la connaissance. Et l'essence de la science c'est, pour ainsi dire, d'élargir et de renouveler cet espace en faisant advenir le « nouveau », qu'il faut d'abord reconnaître comme tel, puis qui fait voir l'ensemble des connaissances, anciennes et nouvelles, sous un autre jour.

La comparaison des deux manières de décrire les connaissances du passé, l'immédiate *sur le vif* de l'époque et la plus lointaine *disposant du recul*, nous montre la relativité des points de vue, et comment notre appréciation des connaissances est dépendante de l'histoire. Mais cette relativité des connaissances et de leur évaluation n'est pas « absolue », elle n'est pas la seule chose que l'on puisse en dire. Le caractère historique de ces connaissances, qui tient à ce qu'elles sont produites par des êtres humains, eux-mêmes inscrits dans une existence sociale et historique, n'efface pas leurs contenus. Pour mesurer la dépendance temporelle de nos jugements sur les connaissances, nous pourrions aussi reproduire notre exercice de pensée en examinant les acquis du passé par sauts de

siècle en siècle. Les travaux des historiens des sciences, comme matériaux de base, s'ajouteraient à la comparaison des réévaluations postérieures successives. Ce serait sans doute une excellente méthode pour évaluer ce « progrès des connaissances » dont on parle et pour comprendre ses caractéristiques. Nous observerions, en particulier, des réorganisations périodiques des savoirs eux-mêmes, et leur solidarité avec des changements de perspectives plus généraux, d'ordre réflexif (ou épistémologique), philosophique, culturel, ...

Ce n'est pas mon propos d'effectuer ici de telles analyses. Par l'apologue des différents regards que l'on peut porter sur une science du passé, je ne voulais que faire remarquer comment, en matière de connaissances, et particulièrement de connaissances scientifiques, non seulement le futur nous reste imprévisible, mais le passé lui-même ne nous est pas immédiatement transparent, même à la lumière des connaissances ultérieures.

De même, à propos des connaissances, nous avons vu se poser des questions comme celles de la vérité, de l'objectivité, de la nouveauté, de la signification, de l'universalité, du caractère provisoire et relatif, du progrès. Ce sont des questions fort générales, certes, qui débordent les connaissances scientifiques, du moins en ce qui concerne leur description et leurs contenus. Mais, sans de telles notions, qui servent pour ainsi dire de référent aux contenus des connaissances, celles-ci ne signifieraient rien, nous ne saurions pas vraiment de quoi nous parlons ; en même temps, notre apologue les met elles-mêmes en question, les soumet à un doute généralisé. Cependant, ce doute est tempéré par la conviction intime (plus ou moins ferme car parfois contestée sur des points de détail) que les *connaissances* d'aujourd'hui sont meilleures, plus riches et plus fines que celles d'hier, en gardant d'ailleurs ce qui était assuré : et si elles le transforment, c'est en l'élargissant. Le savoir (comme état des connaissances) est cumulatif et se prête à l'idée de progrès : mais on ne saurait étendre sans autre examen cette considération aux autres dimensions de l'histoire humaine.

Ainsi, la compréhension des raisons profondes des contenus de nos connaissances nous vient, en définitive, à mesure que celles-ci progressent, autrement dit : *le sens advient au passé du futur*. La proposition paraît hardie, et elle l'est en effet, mais elle ne fait que refléter l'idée même de progrès des connaissances. Car, à y bien réfléchir, n'est-ce pas la seule manière de concevoir que la pensée humaine puisse s'approprier le monde (la nature), en se nourrissant de ce qu'il est,

transformant en connaissance rationnelle ce qui nous était inconnu et qui nous vient d'abord empiriquement, ensuite progressivement assimilé par l'exercice de la raison ? Mais ce mouvement en avant qui nous entraîne, qui entraîne la pensée et la rationalité élargie à de nouvelles perspectives, n'est en même temps possible que parce que ces connaissances, à chaque étape, font sens et contiennent leur propre signification. Nous en jugeons selon la raison, et notre recherche, motivée par la conscience des limites de notre savoir, nous porte à ce dépassement de la raison par elle-même, selon ses propres exigences.

Ceci nous montre aussi que la réflexion sur les sciences dans leur histoire rejoint les plus hautes questions de la philosophie. Mais ce n'est pas sur celles-ci que portera la suite. Nous nous en tiendrons modestement à l'exposé de résultats de la physique, en ne les accompagnant de réflexions épistémologiques ou philosophiques que dans la mesure où celles-ci seront strictement nécessaires... Libre ensuite au lecteur de les prolonger à sa guise.

Notre apologue démontre combien, en tentant de dresser un tableau des connaissances acquises en physique au cours du siècle écoulé (désormais, le XX<sup>e</sup> siècle), nous avons conscience de ses limites, le nez collé sur des données sans doute trop récentes pour pouvoir être encore pleinement évaluées. Il est cependant utile de se proposer un tel regard en arrière, juste après cette étape franchie (le dernier siècle du second millénaire). Certes, les siècles qui se succèdent ne sont séparés les uns des autres que par la convention du calendrier : les périodes ne sont que les coordonnées de l'histoire, et toute autre division serait aussi légitime. Le choix d'un siècle est celui que l'on fait habituellement, et c'est un fait culturel dont il n'est pas dénué de sens de tenir compte. Nous attachons bien de l'importance aux anniversaires : en voici un, du moins, commun à beaucoup, sinon à tous, embarqués que nous sommes dans une histoire de plus en plus partagée (ou subie).

Or, lorsque nous évoquons le XX<sup>e</sup> siècle, ce sont d'abord les bouleversements de l'histoire de la planète qui nous saisissent. Les deux grands conflits mondiaux en ont marqué la première moitié. Le premier (la Grande Guerre de 1914-1918) a certainement constitué une rupture bien plus grande avec la période qui a précédé que le tournant proprement du XIX<sup>e</sup> au XX<sup>e</sup> siècle, à tel point que l'historien britannique Eric Hobsbawm fait commencer le XX<sup>e</sup> siècle en 1918, pour ce qui est des mouvements de l'histoire. Bien que nous ne voulions pas traiter

ici de l'histoire (pas plus que des grandes conceptions philosophiques), nous ne pouvons éviter d'en évoquer des aspects dans cette introduction. Car c'est d'une manière spéciale que l'histoire a marqué le renouvellement des idées en physique au début du XX<sup>e</sup> siècle.

Au moment même où la Première Guerre mondiale faisait rage, témoignant de la folie des peuples, de nouvelles connaissances scientifiques prenaient forme. Elles allaient bouleverser, plus que ce ne fut jamais le cas avec une telle rapidité dans l'histoire de l'humanité, l'image que l'homme se faisait du monde, ainsi que sa propre image et ses conceptions sur la connaissance. Lorsque les fumées du grand affrontement meurtrier se dissipèrent, ce fut par bien des aspects un nouveau paysage qui s'offrit à la vue, sur un horizon immensément élargi.

La modification la plus grandiose et la plus surprenante, qui suscita des débats passionnés et la fascination de beaucoup, concernait la vision du monde physique et de l'Univers. L'expédition scientifique menée en mai 1919 en Guinée et au Brésil, sous la direction de l'astronome Arthur Eddington (1882-1944) et commanditée par la Royal Society et la Royal Astronomical Society de Londres, pour observer une éclipse de Soleil à l'équateur était en elle-même tout un symbole. Son enjeu dépassait de loin la seule connaissance astrophysique de la couronne et des éruptions solaires, puisque son but principal était l'observation d'une éventuelle courbure des rayons lumineux provenant d'étoiles lorsqu'ils passent à proximité du Soleil. Cette propriété signifiait que l'espace est courbé par les grandes masses de matière qu'il contient et constituait l'une des principales conséquences de la théorie de la relativité générale, présentée par Albert Einstein (1879-1955) à l'Académie des sciences de Berlin dès la fin de l'année 1915.

La théorie de la relativité d'Einstein modifiait en profondeur les concepts physiques d'espace et de temps et obligeait, en même temps, à rectifier la manière dont les physiciens les appréhendaient depuis plus de deux cents ans, selon une sorte d'évidence intuitive. En même temps, la cosmologie mettait en quelque sorte l'Univers tout entier à portée de la main des savants, qui découvraient son immensité et, peu après, son mouvement d'expansion. Les années de la fin de la Grande Guerre de 1914-1918 virent encore une phase décisive d'une autre révolution. Celle-ci était peut-être plus radicale puisqu'elle concernait la connaissance de la matière « commune » dans sa structure intime, atomique d'abord, subatomique ensuite (cette dernière surtout à partir de la fin de la Seconde

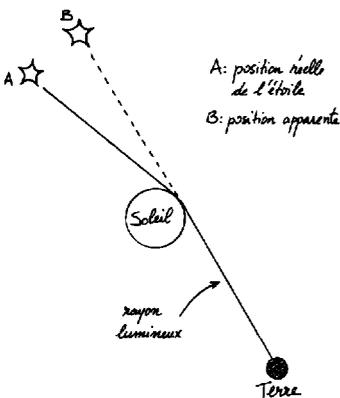


Figure 1.2. Schéma de la courbure des rayons lumineux provenant d'étoiles.

- Particules  
 (charmées) : 104  
 (élémentaires, fondamentales) : 39, 40, 77, 80–82, 86, 95–124, 197, 198, 258  
 (étranges) : 81, 93, 103–105  
 (ponctuelles) : 96  
 (- « habillées » par leur champ) : 101  
 (virtuelle d'échange) : 86, 90, 101, 122 (Voir aussi : Boson, méson)
- Partons : 109
- Pensée humaine : 6, 226, 269, 272, 274
- Périhélie (Avance du - de la planète Mercure) : 23, 175, 181
- Périodes géologiques : 157, 160
- Percolation : 127, 151–153
- Perturbation  
 (dynamiques) : 177, 181  
 (due à l'interaction de la mesure) : 41  
 (Calcul de -s) : 100, 129, 141–143, 175
- Pétrographie : 156
- Phénoménoteknik : 275
- Philosophie, philosophique : 7, 40, 46, 170, 226, 257, 270, 274  
 (de l'observation, de la complémentarité) : 41, 42
- Photon : 30, 43, 52, 53, 66, 70, 80, 82, 86, 89, 100, 123, 219, 270
- Photoélectrique (Effet -) : 26
- Physico-chimie : Voir : Chimie physique
- Physique : 64  
 (atomique, moléculaire) : 42, 273  
 (des basses températures) : 70, 265  
 (classique) : 39, 41, 47, 49, 258  
 (de la matière condensée, du solide) : 66–74, 125  
 (quantique) :  
 Voir : Quantique  
 (du quotidien) : 127, 151–153  
 (subatomique) : 77–124, 215  
 (des hautes énergies, des particules élémentaires, subnucléaire) : 35, 78, 95–124, 204  
 (nucléaire) : 35, 77–94, 184
- Pile atomique (ou réacteur nucléaire) : 87, 264
- Planète, planétologie : 155, 166, 172, 189, 258, 271  
 (extrasolaire) : 173, 176–180, 184, 189
- Plaque (continentale) : 164  
 (Tectonique des -s) :  
 Voir : Tectonique
- Plasma  
 (électromagnétique) : 93, 126, 141, 187, 188, 191  
 (de quarks et de gluons) : 92, 93, 141
- Point de vue : Voir : Regard
- Politique : 88, 276
- Polymère : 55, 152, 244
- Pompage optique : 28, 70
- Positivisme, positiviste : 55, 77, 170
- Positron : 80, 82, 84, 85, 99, 103, 266
- Pratique : 39, 46, 257 (Voir aussi : Familiarisation)
- Précession (de Larmor) : 67
- Prédiction, prédictivité : 38, 45, 65, 106, 139, 142, 165
- Préparation (d'état) : 47, 48
- Pression interne, quantique, des étoiles : 188, 190
- Prévisible, imprévisible : 5, 6, 135, 138–140, 275
- Principes : 40, 260  
 (anthropique) : 250–253, 255  
 (de complémentarité) : Voir : Complémentarité  
 (de correspondance) : 27, 31  
 (cosmologique) : 209  
 (d'exclusion de Pauli) : 29, 30, 63, 68, 190  
 (de Mach) : 206  
 (physiques et contenus conceptuels) : 12  
 (de superposition) : 30, 38, 39, 43  
 (de relativité) : (restreint aux mouvements d'inertie) : 12; (étendu de la mécanique à l'optique et à l'électromagnétisme) : 12, 16, 17; (généralisé aux mouvements quelconques) : 21  
 (Énoncé de -s physiques) : 12
- Probabilité : 26, 28, 40, 43, 47, 56, 133, 150  
 (Amplitude -) : 32, 33, 43
- Probabiliste (Interprétation -) : 32
- Progrès : 42, 266  
 (des connaissances) : 6, 265, 266
- Protéines : 74, 75
- Proton : 39, 80, 83–86, 102, 103, 108, 197, 214
- Puces : 69
- Pugwash (Mouvement -) : 88
- Pulsar : 181, 190, 191  
 (- binaire) : 23, 182
- Q**
- Quantité de mouvement :  
 Voir : Impulsion
- Quantification  
 (- de l'énergie des atomes) : 25–28, 58, 59, 61  
 (- du rayonnement) : 25–28
- Quantique  
 (Chimie -) : Voir : Chimie  
 (Chromodynamique -) : 90, 92, 119–124, 141, 142, 246, 260  
 (Cryptographie -) : 44, 49  
 (Concept -, domaine -) : 47, 270  
 (Électrodynamique -) : 25, 35, 64, 82, 85, 96, 113, 119, 142, 246  
 (Gravitation -) : 217, 246, 247

- (Hypothèse -, postulat -) : 61  
 (Mécanique -) : 25, 28–34, 45, 64, 69, 75  
 (Nombre -) : 39, 64, 260  
 (Opérateur -) : 31  
 (Particules -s) :  
   Voir Particules élémentaires  
 (Physique -, Théorie -) : 8, 25–53, 71, 75, 77, 184, 194, 259, 260, 269  
 (Probabilité -, statistique -) : 64 (Voir aussi : Probabilité, Statistique)  
 (Rapport du - au classique) : 45 (Voir aussi : Classique)  
 (Système -) : 47, 51 (Voir aussi : Quanton)  
 (Théorie - des champs) : 25, 34, 35, 85, 96, 142  
 Quantum d'action : 26, 41, 59  
 Quark : 39, 82, 90, 92, 96, 102, 106–112, 119–123, 220, 246–249, 260  
 (Confinement des -s) : 90, 92, 120, 220  
 Quasar : 169, 181, 196, 258, 270
- R**
- Radar : 69  
 Radiations : Voir : Rayonnement  
 Radioactivité : 57, 83, 157, 158, 162, 266  
 (artificielle) : 60, 78, 82, 85  
 (naturelle) : 4, 60  
 Raison, rationalisation, rationnel : 7, 46, 269, 272  
 Rayon, radioactivité  
 ( $\alpha$ ) : 59, 60, 79, 82  
 ( $\beta$ ) : 57, 60, 79, 81  
 ( $\gamma$ ) : 60, 79, 175, 198, 266  
 (X) : 57, 66, 67, 266  
 Rayonnement : 33, 169, 254, 255  
 (cosmique) :  
   Voir : Cosmique  
 (du corps noir) : 25  
 (fossile isotrope, micro-onde, thermique) : 181, 201, 213–215, 219, 249  
 (synchrotron) : 266  
 (impulsion du -) : 28  
 (loi du - de Planck) : 29  
 Réacteur nucléaire, centrale nucléaire : 88  
 Réalité physique, réel : 34, 37, 40, 41, 274  
 (d'un système physique individuel) : 42–45  
 Réduction (Postulat de -) : 45, 46  
 (Voir aussi : Mesure)  
 Réductionnisme : 272, 273  
 Réflexif, réflexivité : Voir : portée Critique  
 Refroidissement  
 (des atomes) : 66, 73  
 (stochastique d'antiprotons) : 118, 265  
 Regard  
 (prospectif) : vi, 2, 5  
 (rétrospectif) : v, vi, 1–9  
 Relatif (État -) : 45  
 Relativité  
 (des connaissances) : 5  
 (générale) : 8, 11, 20–24, 95, 173, 174, 180–184, 204, 206, 220, 222, 245, 247, 251, 258, 260, 274  
 (restreinte ou spéciale) : 8, 11–20, 88, 186, 222, 258  
 (de la simultanéité) : Voir : Simultanéité  
 (Principe de -, théorie de la -) : 11–24, 37  
 Religion et science : 235  
 Renormalisation : 96, 101, 141–143, 272  
 Réorganisation des connaissances : 3, 6 (Voir aussi : Connaissances)  
 Résonances : 81, 103–105  
 Responsabilité : 276  
 Rift : 163  
 RMN (Résonance Magnétique Nucléaire) : 64, 75, 266
- S**
- Saveur (Nombre quantique de -) : 108–112, 119, 123, 260  
 Science (scientifique)  
 (humaine, sociale) : 271  
 (de la nature) : 271  
 (de la Terre) : 167, 257 (Voir aussi : Géophysique)  
 (de l'Univers) : 257 (Voir aussi : Astrophysique, Cosmologie)  
 (de la vie) : 257 (Voir aussi : Biologie)  
 (Lien des -s entre elles) : 5  
 (Voir aussi : Connaissance)  
 Séismologie, sismographe : 155, 161, 162, 166  
 Semi-conducteur :  
   Voir : Conducteur  
 Séparabilité : (Principe de -)  
 (Non-locale) : 32, 43–45, 48–53 (Voir aussi : Intrication)  
 Sens : 46, 226 (Voir aussi : Signification)  
 Série radioactive : 57, 62  
 SIAL : 157, 159, 160, 161  
 Signification  
 (des connaissances) : 2, 3, 6, 7, 273 (Voir aussi : Philosophie)  
 (physique) : 32, 37, 38, 138  
 (Voir aussi : Contenu)  
 (physique des probabilités) : 26, 56  
 (physique des coordonnées d'espace-temps) : 22  
 SIMA : 157, 159, 160, 161  
 Simplicité : 261, 262  
 Simultanéité (Relativité de la -) : 11, 17, 18  
 Singularité : 134, 251  
 Singulier (Point -) : 39, 128  
 Sociologie : 116