

La lumière : ondes ou particules ?

Le sous-titre de cette conférence est : « la mystérieuse nature de la lumière », ce qui est quand même un peu paradoxal parce que c'est la lumière qui révèle la nature des choses. Donc, que la lumière elle-même soit mystérieuse, est, en ce sens, un paradoxe. Je crois qu'il est bon, pour un sujet aussi général, de situer les choses rapidement et sommairement, dans l'histoire de la science, au moins en ce qui concerne cet aspect des connaissances, matière et lumière. La solution à ce problème a énormément progressé depuis ce dernier siècle. Depuis 1900, les 25 premières années du XX^e siècle, ont apporté des découvertes extrêmement importantes, à savoir :

En 1905, la découverte de la relativité restreinte, par EINSTEIN,

En 1915, 10 ans plus tard, la relativité générale toujours par EINSTEIN,

En 1925, la mécanique quantique, c'est à dire tous les 10 ans

Ce sont vraiment les grandes découvertes du siècle. Je ne veux pas dire qu'après 1925 il ne s'est plus passé grand chose ; des quantités de découvertes expérimentales ont été faites ; par ailleurs, ces trois grandes théories ont beaucoup progressé. Néanmoins, les idées majeures, les idées capitales qui ont été à l'origine de tout développement scientifique de la physique au cours du XX^e siècle sont dues à ces trois grandes découvertes. Par conséquent, il est intéressant de voir où en était la situation au début de ce XX^e siècle qui a vu ces très grandes découvertes. Je vais donc aller très vite en développant d'abord des notions très générales.

A l'aube du XX^e siècle donc, les phénomènes physiques sont étudiés et on considère que ces phénomènes se déroulent dans l'espace et au cours du temps. Nous avons une scène, c'est le contexte dans lequel se déroulent ces phénomènes. Bien entendu, c'est l'espace et le temps. Tout phénomène physique se déroule dans l'espace, au cours du temps, c'est une banalité. Par ailleurs ces phénomènes physiques mettent en jeu deux types d'acteurs : la matière et la lumière, ce sont les deux partenaires principaux en jeu dans les phénomènes.

En ce qui concerne l'espace, on considère que cet espace est repéré par rapport à ce qu'on appelle un référentiel qui fait que tout événement est repéré par rapport à des axes, aux coordonnées du point où ce phénomène se produit ; par ailleurs on suppose que cet espace est continu, c'est à dire qu'il n'y a pas de lacune dans cet espace, tous les points de l'espace peuvent être occupés par des phénomènes. On suppose que la géométrie qui fonctionne dans cet espace est la géométrie euclidienne que l'on apprend encore dans tous les lycées et collèges, et que cet espace est absolu. Que cet espace soit absolu veut dire que ça constitue un référentiel qui a une réalité intrinsèque, c'est l'espace. Par exemple, si la Terre est aplatie sur le plan équatorial, on dit *c'est parce qu'elle tourne* ; et elle tourne par rapport à quoi ? Par rapport à l'espace. On considère que cet espace absolu, que NEWTON a inventé, est un concept fondamental.

Ensuite, on s'est rendu compte, avec la relativité restreinte, qu'on ne doit pas considérer d'espace absolu, que toutes localisations sont relatives par des référentiels qui peuvent être choisis dans une certaine mesure, arbitraire.

En ce qui concerne le temps, on considère également que c'est un continuum, en ce sens que par exemple, la variable t qu'utilise le physicien, est une variable continue. Par ailleurs, on imagine que ce temps est universel et absolu, c'est à dire qu'il peut être défini de telle manière à avoir un sens absolu dans tout l'univers ; ce qui supposerait par exemple qu'on puisse dire qu'en ce moment, dans cet instant présent, il se passe quelque chose dans la galaxie d'Andromède ; on suppose que le temps est commun et universel. Là encore, la relativité restreinte a détruit cette notion, nous montrant que le temps, comme l'espace, est relatif.

Revenons à la lumière : donc tous les phénomènes mettent en jeu deux types d'acteurs sur cette scène de l'espace et du temps, d'une part, la matière, d'autre part, la lumière.

En ce qui concerne la matière, on a vu le triomphe de la théorie atomique ; on suppose donc que cette matière est portée par des particules indépendantes les unes des autres, qui réagissent entre elles par des chocs dont les mouvements sont régis par les équations de Newton.

En ce qui concerne la lumière, on savait déjà au début du siècle que la lumière, celle du moins que nous voyons, à laquelle nous sommes sensibles dans nos yeux, n'est qu'une partie extrêmement ténue d'un rayonnement qui est le rayonnement électromagnétique. Quand je dis ténue, ça veut dire que ce rayonnement est un phénomène qui est considéré comme ondulatoire, porté par des ondes, comme des ondes à la surface de l'eau, qui se déplaceraient dans un milieu matériel qu'on appelle « l'éther » et qui seraient des vibrations de l'éther. Ces vibrations, comme toutes les ondes (imaginons la surface de l'eau), ont des longueurs d'ondes, c'est à dire la distance qui sépare deux crêtes consécutives de cette onde.

Pour la lumière visible, la longueur d'onde varie seulement entre 4000 et 7000 angströms, donc une partie très faible du rayonnement complet qui lui peut varier avec des valeurs qui sont de l'ordre de 10^{-13} cm jusqu'à des ondes qui peuvent faire jusqu'à plusieurs kilomètres, des grandes ondes radio par exemple. Il n'y a pas de limite supérieure à ces longueurs d'onde, pas de limite inférieure non plus. Et notre œil lui, n'est sensible qu'à une toute petite plage de ce rayonnement immense. Néanmoins c'est à partir de cette partie de rayonnement qu'on a pu réaliser tout un ensemble de mesures expérimentales qui ont pu s'extrapoler aussi bien dans l'infiniment grand que dans l'infiniment petit et nous permettre d'étudier tout cet aspect fondamental des phénomènes portés par ce qu'on appelle le rayonnement électromagnétique et dont la lumière visible n'est qu'un aspect. Tous ces phénomènes sont étudiés dans des cours d'optique et d'électricité. Ces ondes donnent lieu à des interférences. Tous ces phénomènes sont régis par des équations complètement différentes des équations de Newton, qu'on appelle les équations de Maxwell. Au début du siècle, ces ondes sont considérées comme des vibrations d'un milieu matériel hypothétique qu'on a appelé l'éther.

Alors, puisque j'ai parlé de la scène et des acteurs, quel est le programme de la physique ? Ca consiste évidemment à comprendre les phénomènes, comprendre la nature, pour savoir se servir de ces connaissances pour des applications technologiques ou plus profondément, par ailleurs, connaître les lois qui régissent ces phénomènes, c'est à dire connaître les règles du jeu que joue la nature. Alors qu'est ce que comprendre ? Si on se réfère à l'étymologie « cum préhendere » en latin, veut dire : mettre ensemble, et l'intelligence, c'est « inter ligare » lier ensemble. Donc, comprendre, c'est voir la profonde unité de tous ces phénomènes qui nous paraissent très différents les uns des autres, c'est une fantasmagorie des apparences, et comprendre, c'est s'apercevoir que nous ne sommes pas en présence uniquement de cette fantasmagorie, comme si tous ces phénomènes étaient indépendants les uns des autres. Mais le but de la science est de montrer que, derrière toutes ces apparences, il y a une profonde unité, portée par des lois qui régissent ces phénomènes. Donc, comprendre, c'est unifier. Expliquer, c'est faire une synthèse. Je reprends un exemple : dans l'ancienne mécanique, avec Kepler, il y avait 3 lois, apparemment indépendantes les unes des autres, concernant le mouvement des planètes. Et, ce qu'a montré Newton, c'est que les 3 grandes lois de Kepler n'étaient que des conséquences d'une loi unique qui est la fameuse loi de la mécanique : $f = m c$. Ensuite, avec cette mécanique de Newton, on n'a pas seulement étudié les lois de Kepler, mais ça a été à l'origine du développement foudroyant de toute la mécanique dont toute la technologie, autour de nous, constitue des applications. Donc, comprendre, c'est unifier, faire une synthèse.

De même, en ce qui concerne l'électricité et l'optique, qui étaient des chapitres différents et indépendants, au XVIII^e et encore au début du XIX^e siècle, Maxwell a montré que tout cela était régi par des équations communes, c'est à dire qu'il n'y avait pas de différence fondamentale entre l'électricité, le magnétisme et l'optique. C'est une des plus belles synthèses qui a été réalisée dans tous les siècles précédents.

Puisque comprendre, c'est unifier : que s'agissait-il d'unifier ? Précisément, d'une part, la particule et l'onde et par ailleurs, l'espace et le temps. A vrai dire, cette dernière unification, qui a été réalisée en premier, en 1905 par Einstein, n'était pas prévue, elle est venue, en plus. Ce qui était visé, c'était de rendre compte de cette unification. En effet, jusqu'ici, on considérait que les phénomènes lumineux étaient des vibrations. Or, quand on dit vibrations, il y a un support à ces vibrations, il y a quelque chose qui vibre ; donc on voulait un support matériel. C'est la raison pour laquelle on avait imaginé ce milieu qu'on a appelé « éther » électromagnétique qui était un milieu matériel, supposé être le support matériel de ces vibrations. De même que le son émet des ondes sonores qui se propagent dans un milieu matériel qui est constitué par les molécules d'air. Si, dans cette salle, il n'y avait pas d'air, si on y faisait le vide, vous ne pourriez pas m'entendre parce que les ondes sonores sont les vibrations des molécules d'air, donc, sans molécules, pas de vibrations. En revanche, vous me voyez. Donc, indépendamment des ondes sonores, des ondes acoustiques, il y a aussi des ondes électromagnétiques qui portent la lumière, de moi vers vous. On imaginait donc, à la fin du siècle précédent qu'il existait un autre support qui n'était pas constitué par des molécules d'air, mais un support matériel qui n'avait pas encore été identifié et qu'on appelait l'éther. Ce que nous a révélé la physique, à la suite de l'étude par Einstein de l'espace et du temps et qui a eu une répercussion en ce qui concerne le problème de l'onde, c'est qu'on s'est aperçu qu'il n'y avait pas d'éther, qu'il n'y avait pas de support matériel aux ondes électromagnétiques, et ça a été une révolution extrêmement importante. Pour la première fois, on découvrait qu'il pouvait exister quelque chose qui était les ondes électromagnétiques, sans qu'il y ait de matière. Tandis qu'auparavant, et depuis Démocrite, on pensait que rien n'existait que ce qui était matériel, du moins dans le domaine de la physique. La physique, pour la première fois était amenée à reconnaître qu'il peut exister quelque chose et qui donne lieu à des manifestations multiples et indiscutables, sans qu'il y ait de support matériel. Ce fut une révolution très importante et pas seulement du point de vue scientifique, mais également, à mon avis, sur un plan philosophique. Par ailleurs, il y avait le problème de la particule et de l'onde, et à partir du moment où il existait des ondes, on voulait un support matériel et, s'il y avait un support matériel, il devait être constitué de particules, puisque le triomphe de la théorie atomique avait montré que tout ce qui est matériel est porté par des particules. Le problème était donc de mettre en évidence cette structure matérielle de l'onde. Puisqu'il n'y avait pas d'éther, il y avait un problème en ce sens que le mariage entre la particule et l'onde (je dis mariage parce que je parle d'unification) n'avait pas été réalisé. Le gros problème qui est alors apparu, a été de savoir si, effectivement, il y a deux réalités distinctes, bien déterminées, bien séparées. Dans un premier temps on a cru, qu'il existait deux types de réalités : ondes et particules. Mais précisément, au début de ce siècle, on s'est aperçu qu'il n'en était rien. Je vous rappelle donc les deux explications possibles du point de vue conceptuel : le concept de particules qui est le concept du discontinu, parce que les particules sont bien séparées les unes des autres, ça se compte, c'est un problème d'arithmétique, et un autre concept, le concept d'ondes qui fait intervenir le continu. En effet, l'image simplement ondulatoire à la surface de l'eau, montre bien que ces ondulations peuvent être représentées d'une façon continue, par des courbes continues.

C'est toute l'histoire de la physique du début de ce siècle qui se trouve ainsi résumée. A la fin du XIX^e siècle, il était clair que la matière était constituée de particules : Les atomes. C'est cette théorie atomique qui a été d'abord supposée par Démocrite cinq siècles avant notre ère et qui était simplement une hypothèse qui a mis 2500 ans à s'affirmer. Il paraissait donc très clair au début de ce siècle, vers 1900, que la matière était constituée par des corpuscules, les atomes. La matière appartenait donc au camp du discontinu.

En revanche, en ce qui concerne la lumière, toutes les expériences qui avaient été faites au cours du XIX^e siècle étaient codifiées par les équations de Maxwell et laissaient croire que le rayonnement était constitué effectivement par des ondes. Vous voyez donc la séparation qui apparaissait à la fin du XIX^e siècle :

Matière = particules = discontinu

Rayonnement électromagnétique = ondes = continu

Il y avait donc un divorce entre ces deux aspects. Cela est très fâcheux en soi, mais précisément, on a constaté progressivement, que ce divorce n'existait pas lorsqu'on a étudié les phénomènes d'interaction entre la matière et la lumière. Que veut dire interaction, c'est lorsqu'il y a échange d'énergie. Par exemple lorsque la lumière du soleil tombe sur une plaque métallique, elle l'échauffe, donne de la chaleur, donc de l'énergie puisque la chaleur c'est l'agitation des atomes qui constituent la matière. C'est entièrement de l'énergie mécanique, les atomes sont mis en vibration du fait de l'énergie qui leur est apportée par le soleil. Donc, la lumière qui vient du soleil interagit avec la matière en lui fournissant de l'énergie. Inversement, il est clair que la matière peut faire l'inverse, c'est-à-dire, donner l'énergie à la lumière, se convertir en lumière, comme par exemple lorsqu'on chauffe le four du boulanger, si on regarde le fond du four, on voit bien qu'au fur et à mesure que sa température monte, il change de couleur et si on le chauffe vraiment très fort, il peut devenir blanc éblouissant. Nous savons donc que la matière, lorsqu'elle est chauffée, émet de la lumière. C'est exactement ce que fait le soleil qui émet de l'énergie lumineuse qui lui est fournie par la matière. Donc, les deux partenaires ne s'ignorent pas. Ils échangent de l'énergie, sans arrêt, ils interagissent. A partir du moment où il apparaissait nettement qu'il en était ainsi, on s'est bien rendu compte qu'on ne pouvait pas avoir deux théories complètement différentes pour l'un et pour l'autre, alors qu'en fait ces deux partenaires se connaissent très intimement. Il fallait donc étudier les échanges d'énergie, entre cette matière et ce rayonnement. C'est ce qui a été à l'origine de tous les bouleversements du début du siècle, que je vous ai rappelés.

Nous allons donc parler maintenant, plus spécifiquement de la lumière.

Dans l'histoire de l'humanité, c'est le premier élément qui est signalé. Si l'on prend tout d'abord comme exemple le texte fameux qui se trouve au début de Genèse où Dieu dit : qu'il y ait de la lumière ! Et il y eut de la lumière ; et Dieu dit que la lumière était bonne et il sépara la lumière des ténèbres, etc...

Après cette présentation poétique mais un peu simpliste de la lumière, on peut dire que depuis des milliers d'années, la lumière est pour nous quelque chose de très subtil, de très compliqué. Qu'était la lumière pour les Grecs anciens, pour les pré-socratiques, disons 4 à 500 ans avant notre ère. L'idée de tous les atomistes est de dire que toute la réalité est constituée par des atomes, c'est à dire de petites particules de différentes dimensions. Donc comment expliquer que nous voyons ? Parce que, pour les anciens, le problème n'est pas la lumière, ils n'imaginent pas tout de suite qu'il y a une réalité à la lumière, parce que ça ne se touche pas la lumière et, si on peut dire, ne se voit pas, elle permet de voir, mais elle-même ne se voit pas. Par conséquent, primitivement, le problème qui se posait aux Grecs était : Qu'est ce que voir ? Comment peut-on voir ? Qu'est ce qui se passe ? Comme on était habitué au fait que, par notre corps, nous touchons ; Que notre oreille est impressionnée par des sons, notre nez par des émanations, on pensait que pour voir, il fallait qu'il y ait quelque chose qui vienne vers le corps, qui touche le corps, d'une certaine manière. Par conséquent, comme on avait observé des phénomènes tels que, tout simplement le feu où on voit s'élever la fumée, on savait que, dans certaines circonstances, il y a des particules qui sortent des objets, plus ou moins spontanément. Ils avaient donc imaginé que les choses émettent en permanence des sortes de pellicules très fines ; et pour les odeurs, c'est d'ailleurs un peu ça, lorsque nous sentons des odeurs c'est qu'il y a des molécules qui viennent des objets vers notre nez. Donc pourquoi ne pas imaginer de la même manière qu'il y a aussi des émanations matérielles depuis les objets, qui nous permettent de les voir. Par ailleurs, il fallait aussi imaginer que lorsque ces émanations se rapprochent de l'œil, il se produit ce phénomène très étrange qui fait que, en se rapprochant, l'émanation se raccourcit et rentre dans l'œil. Cette théorie a été exprimée plus tard par Lucrèce dans son grand ouvrage « *De Natura Rerum* » où il appelait cela des simulacres. Autrement dit, voir, c'était recevoir des pellicules, sortes de modèles réduits des choses. Ceci peut paraître naïf mais il est intéressant de noter cette évolution de la pensée. Cette théorie a ensuite été remplacée par Euclide et aussi les pythagoriciens, pour lesquels : voir, c'est toucher. Mais toucher avec quoi ? Avec quelque chose

qui nous sortait de l'œil et qui allait toucher les objets. Il y a eu d'ailleurs des manifestations expérimentales qui semblaient justifier cela. Lorsqu'on dit que quelqu'un a les yeux brillants, on a le sentiment que, lorsqu'il nous regarde, d'une certaine manière, effectivement, il nous touche, pas par ses mains, mais par son regard. On pouvait donc imaginer qu'il y avait un feu intérieur dans notre tête qui faisait que (nous n'en sommes pas encore à l'idée de rayon lumineux mais on s'en approche) nous pouvions ainsi toucher les objets. Lorsqu'on regarde un objet, ce n'est pas la lumière qui rentre dans notre œil, mais lui qui émet ce qu'on appelle aujourd'hui la lumière qui va toucher les différents points matériels qui constituent cet objet. Nous sommes ici dans une théorie de pythagoriciens qui croyaient que les choses étaient fabriquées par des points matériels. Par exemple, lorsque vous voyez une aiguille au sol, vous êtes obligé de vous concentrer pour voir ce petit détail et ne voir que l'aiguille. Cela semble impliquer que nous sommes capables effectivement d'émettre ce « toucher » à distance qui serait une sorte de toucher différent. Même Euclide avait repéré le fameux angle : l'angle d'incidence est égal à l'angle de réflexion, mais exactement en sens inverse. Aujourd'hui nous disons qu'il y a un angle d'incidence qui part de l'objet et rentre dans notre œil, mais les lois sont les mêmes tout en étant inversées. Cette théorie menait à de nombreuses difficultés, par exemple, pourquoi ne voit-on rien la nuit ? Si la vue est due à un feu intérieur, on ne voit pas pourquoi, la nuit, l'œil ne serait pas capable d'émettre ce toucher à distance. Il y a eu, à ce moment-là, une autre théorie due à Empédocle, contemporain à peu près de Platon, légèrement antérieur qui imaginait qu'il y avait deux rayons, l'un émis par l'œil et un autre émis par l'objet, qui se rencontrent. Selon la manière dont ils se rencontrent et suivant l'épaisseur de ces rayons, on pourrait voir ainsi les différentes couleurs. Aristote, élève de Platon, développe pour la première fois une idée intéressante : la lumière est une vibration du milieu, comme pour le son. Il existerait un milieu support qui ferait que la lumière est une vibration. Nous devenons alors très proche de quelque chose de relativement moderne. Il suffit de préciser que ce milieu, c'est l'éther. Il faut savoir que, pour Aristote, le vide n'existe pas. Signalons ensuite Galien qui a commencé en disséquant l'œil à repérer, pour la première fois, l'existence des nerfs entre l'œil et le cerveau. Mais ceci n'a pas donné lieu à des développements intéressants. Il convient également de citer les développements qui ont été faits par le monde arabe.

A la suite de tous ces développements de la connaissance du monde pré-socratique et socratique, relativement brusquement, la science antique s'est effondrée pour différentes raisons, probablement d'ailleurs par le fait que la Grèce a perdu sa liberté, occupée successivement par Philippe, par Alexandre puis par les Romains et l'expérience montre que tout peuple asservi perd ses facultés créatrices. Il n'y a donc plus un développement aussi important, mais il convient de signaler que ce qui s'est passé en Grèce entre le VI^e et le IV^e siècle avant notre ère, est tout à fait prodigieux ; non pas tellement pour ce que les Grecs ont découvert, ce qui évidemment nous apparaît aujourd'hui naïf, encore que dans ces découvertes, il y a eu des choses sensationnelles, par exemple la géométrie euclidienne qui n'a subi aucune modification depuis Euclide ; C'est quelque chose qui a été créé et qui est quasiment moderne. Ce qui est extraordinaire c'est que les Grecs ont posé des questions, sans pouvoir y répondre, mais tellement profondes qu'encore aujourd'hui on n'y a pas répondu. Par ailleurs, ils ont émis des hypothèses, qui ensuite, ont alimenté toute la recherche ultérieure. Les Arabes ont fait ensuite des développements qui ne sont pas négligeables. Pour la première fois Alhazen (965/1039) en plein Moyen-âge, considère que la lumière a une existence propre et va de l'objet vers l'œil et pas l'inverse. Pourquoi ? Il constate, par exemple que si on fixe le soleil, on ressent une douleur. Si la lumière était émise par notre corps, on ne comprend pas pourquoi, dans certaines circonstances, elle créerait une douleur. On peut noter aussi une découverte très extraordinaire par Alhazen en ce qui concerne le mouvement de la lumière qui vient se réfléchir pour repartir avec un angle de réflexion égal à l'angle d'incidence ; il décompose le mouvement de la lumière en un mouvement horizontal et un mouvement vertical et il explique que le mouvement horizontal ne doit pas être contrarié parce qu'il ne rencontre pas d'obstacle, tandis que le mouvement vertical est contrarié par le miroir et rebondit vers le haut ce qui explique ainsi la propriété de réflexion. C'est tout à fait

remarquable car, pour la première fois, on décompose un mouvement par la superposition des 2 mouvements. Il faudra attendre Galilée pour retrouver cette idée développée.

Mais qu'est-ce donc que la lumière ? Nous allons voir successivement des théories dans lesquelles on dira, d'abord : Ce sont des particules, puis : Ce sont des ondes. Nous verrons ensuite la réponse qui est proposée aujourd'hui.

Descartes et Newton ont pensé que la lumière était faite de particules. Descartes est connu pour avoir écrit « Les lois de la réflexion » lorsque la lumière se propage dans l'air et vient tomber sur un miroir ou sur l'eau. Lorsqu'il s'agit de l'eau, une partie de la lumière entre dans l'eau et une partie est réfléchi. Il y a donc réflexion et réfraction et les angles formés par le rayon initial et le rayon réfléchi ou le rayon transmis donnent cette fameuse loi qu'on appelle loi de Descartes $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$, où n_1 est caractéristique du milieu du haut qu'on appelle son indice de réfraction, et n_2 est caractéristique du 2^o milieu et les angles i sont liés par cette loi. Ceci est quelque chose de très important en ce début du 17^o siècle où il y a très peu de formules mathématiques. Les premières formules mathématiques ont été écrites d'abord par Kepler, ce sont les lois de Kepler (les lois des aires). Le fait de représenter les phénomènes physiques en leur donnant une structure mathématique est profondément moderne. Les premières formules mathématiques qui ont été écrites ont inspiré ensuite tout le développement de la science physique.

Descartes affirme que la propagation de cette lumière issue des rayons lumineux qui sont des petits projectiles, subtiles qui se déplacent comme des tourbillons qui frappent notre œil et nous donnent la sensation lumineuse, un peu comme nous sentons la chaleur. La lumière, dans ce cas est un mouvement de particules. L'indice caractéristique du milieu dépend de la couleur de la lumière qui traverse ce milieu. Par ailleurs, il considère également que la lumière qui tombe sur un miroir forme un rebond. Ce serait la grande explication de l'arc-en-ciel. La première explication avait en fait été fournie par Thierry de Freiberg, mais Descartes a nettement amélioré le raisonnement. (C'est Newton qui a ensuite découvert que le rayonnement venu du soleil était un mélange de différentes couleurs) Etant donné que les angles de réflexion et de réfraction, dépendent de l'indice, d'après cette loi de Descartes, l'indice lui-même dépendant de la couleur ou de la longueur d'onde, ça veut dire que nous n'allons pas voir nécessairement la même direction de 42°, elle va dépendre de la couleur. Par conséquent cela signifie que, la direction dans laquelle nous regardons, pour voir le maximum de lumière diffusée, va dépendre de la couleur. Pour l'arc-en-ciel, nous avons le rouge à l'extérieur et le violet à l'intérieur, ceci pour l'arc-en-ciel principal ; mais nous pouvons avoir un deuxième arc-en-ciel qui contient le premier, pour la raison suivante qu'il peut arriver, pour le rayon incident, que son histoire soit différente et qu'il suive différentes trajectoires. Donc, pour une longueur d'onde identique, l'angle sera vu dans une direction qui n'est plus de 42° mais bien plus grande. Ce qui fait, qu'à ce moment-là nous verrons un deuxième arc-en-ciel dans lequel le bleu et le violet seront à l'extérieur et le rouge à l'intérieur. C'était déjà une très belle explication qui donnait du crédit aux idées de Descartes, que d'être en mesure d'expliquer cet arc-en-ciel.

Vint ensuite la grande découverte de Newton (né en 1642) la composition de la lumière, c'est à dire, l'origine des couleurs. Il a découvert très jeune (24/25 ans) toutes ces grandes idées, à la suite d'observations nombreuses. En 1666, il a fait une expérience très simple : il faisait entrer la lumière par la fenêtre en ayant ménagé une petite ouverture. En mettant un prisme derrière, il a constaté qu'à la sortie du prisme, il voyait différentes couleurs apparaître sur l'écran, avec une déviation maximum vers la lumière violette, et moindre vers le rouge. Il y avait donc un étalement des différentes couleurs. On avait déjà observé ce phénomène, mais on pensait que les différentes couleurs qui apparaissaient étaient créées par le matériau et que c'était l'interaction de la lumière blanche venant du soleil avec le verre, qui les créait. On pensait que les couleurs n'étaient pas préexistantes dans la lumière, que la lumière n'avait pas de couleurs et que les couleurs étaient créées par la matière traversée. Pour montrer qu'il en était autrement,

dans l'écran, il ménage une ouverture qui laisse passer une certaine couleur, par exemple le vert et ensuite, ce faisceau de couleur verte, il le fait tomber sur un deuxième prisme. Si la théorie ancienne était valable, en traversant cette matière, le vert devait à nouveau donner naissance à toutes les couleurs. Or, il n'en était rien, il n'y avait qu'un seul rayon qui était transmis conformément aux lois de la réfraction. Ceci indiquait bien que la lumière blanche était constituée par un ensemble de couleurs. Pour Newton, cette lumière est constituée de corpuscules qui sont des masses différentes et la couleur est due aux différentes masses de ces corpuscules, très petits qui sont soumis à des forces, arrachés à la matière par la chaleur et qui se propagent à une vitesse de 300.000 km par seconde. Cette vitesse de la lumière a été mesurée par Roemer en 1676 par l'observation des satellites de Jupiter. Pour Descartes, la lumière avait une vitesse infinie, donc impossible à mesurer.

Galilée lui, a suspecté que la lumière avait une vitesse finie et il s'est livré à différentes expériences qui aujourd'hui nous font sourire, à l'aide de lanternes du haut des différentes collines de Rome, sans résultat bien entendu. Mais ceci nous montre les difficultés expérimentales du temps et nous devons reconnaître le mérite immense de ces premiers scientifiques qui, avec des moyens expérimentaux absolument rudimentaires ont pu accéder à des connaissances qui ne sont pas négligeables. Un autre exemple, en ce qui concerne la géométrie euclidienne, la géométrie de l'espace : la somme des angles d'un triangle est égale à 2 droits. Ceci est considéré comme une vérité indiscutable apprise encore de nos jours. Ce n'est qu'après la découverte de la relativité générale qu'a été utilisée une géométrie non euclidienne, ce qui révèle que la géométrie est une construction de l'esprit qui n'est pas fixée une fois pour toute. Parce qu'il était très prudent, Newton a mis ensuite un temps fou avant de publier ses découvertes. Il détestait la chicane et, comme chaque fois qu'il annonçait des idées nouvelles, il avait évidemment des objections et, souvent ceci l'empêchait de publier. Heureusement, ce sont des amis qui avaient connaissance de ce qu'il avait trouvé, qui le poussaient à publier, ce qu'il n'aurait peut-être pas fait. Il a fallu beaucoup insister pour que Newton publie ses « Principes mathématiques de la philosophie naturelle » qui sont vraiment le fondement de la mécanique classique.

Venons-en maintenant aux expériences de Huygens (1629/1695), Young (1773/1829) et Fresnel (1688/1827).

Supposons que nous faisons passer des particules lumineuses au travers de deux fentes derrière lesquelles se trouve une plaque photographique. Nous constatons que, si on place un observateur qui va observer sur la plaque photographique, le point d'impact des particules, chaque fois qu'une particule tombe sur la plaque, il va interroger les détectives qui eux sont derrière chaque fente et leur demander : L'avez-vous vue ? Et à chaque fois, l'un ou l'autre répondra oui, mais jamais les deux. Nous gardons donc le caractère corpusculaire. Il n'y a pas la moitié d'une particule qui peut passer par une fente et la seconde moitié par l'autre. La particule passe indifféremment par l'une ou par l'autre. Et la particule tombera toujours sur la médiatrice de la distance entre les deux fentes. Cela devient totalement incompréhensible. Comment des particules dont nous savons par l'observation qu'elles passent par l'une ou par l'autre fente, peuvent-elles se comporter comme si elles avaient la connaissance de la distance qui sépare les fentes pour le calcul nécessaire pour tomber sur la médiatrice ? Si on fait l'expérience, on observe bien par où ça passe, mais à ce moment-là, chose qui n'était pas prévue, il n'y a plus d'interférence. Le fait d'avoir déterminé par où la particule est passée fait que, maintenant on constate bien que les particules sont détectées dans le prolongement de l'une ou l'autre fente, ce qui est logique puisque maintenant, nous savons par où elles passent. Du fait même que nous avons déterminé une partie de leur trajectoire, nous avons fait disparaître le phénomène physique d'interférence. Le phénomène d'interférence est incompatible, expérimentalement avec la détermination du chemin suivi par la particule. Ceci veut dire que la lumière n'accepte pas qu'on puisse déterminer le chemin qu'elle suit et en même temps réaliser le phénomène d'interférence. Le fait de déterminer un des points de la trajectoire éventuelle a pour effet de faire disparaître le phénomène. La conclusion est qu'on sera obligé d'admettre que lorsque le phénomène se produit

avec interférence, la particule ne suit aucun chemin. Dans ce monde microscopique de l'on commence à étudier, les particules n'ont plus de chemin. Il s'agit là d'un renversement de la théorie classique dans ses fondements les plus grands, parce que depuis Newton, tout cours de mécanique commence à l'école, au lycée et à l'université en première année en disant : toute particule a une trajectoire, il faut bien qu'elle ait une trajectoire pour qu'ensuite on puisse parler de sa vitesse et de son accélération de telle manière qu'on puisse appliquer la formule de Newton. Nous arrivons maintenant à une physique où il n'y a plus de trajectoire. S'il n'y a plus de trajectoire, il ne peut plus y avoir de vitesse tangente à la trajectoire.

S'il n'y a plus de vitesse, on ne peut pas prendre la dérivée de la vitesse pour faire une accélération. Et il n'y a plus de force non plus ! Le concept de force a également disparu, c'est à dire que tous les fondements de la mécanique classique se sont évaporés. Nous allons être obligés de construire une toute nouvelle mécanique, qu'on appelle la mécanique quantique, d'une façon tout à fait différente de la mécanique classique. C'est vraiment un renversement complet. On ne change pas la formule de Newton, c'est le concept même qui doit être abandonné. Ce résultat est dans le prolongement du développement de la science parce que, du temps des Grecs, on attribuait aux objets des qualités telles que le sec, le chaud, le froid, le sucré etc. c'est à dire toutes les propriétés que nous observons à notre échelle macroscopique, ils les donnaient aux objets microscopiques et cela paraît normal. Que pouvait être une particule qui n'avait pas de couleur : tout objet a nécessairement une couleur, s'il n'a aucune couleur, ce n'est pas un objet. Aristote gardait ces concepts familiers et les attribuait au monde microscopique comme s'il était un modèle réduit du monde macroscopique. Cette idée est encore développée dans les Pensées de Pascal qui spéculent sur le fait qu'il s'agit d'un monde semblable au nôtre mais plus petit. Pourtant, avec Galilée déjà, ce point de vue avait été abandonné. Il avait considéré que c'était nous qui donnions toutes ces qualités que nous attribuons aux choses, mais qu'elles ne sont pas dans les choses, que ce sont des qualités subjectives. De même que tout ce qui est beau ou laid n'est valable que pour un être intelligent, il n'y a pas de beauté ni de laid au niveau microscopique, et il n'y a pas non plus que qualités (sucré, salé, chaud, froid, couleur, etc.) pour un électron, mais, au moins Newton, dans le prolongement de Galilée avait bien évacué toutes ces qualités dites subjectives, simplement créées par notre cerveau, mais avait gardé une chose fondamentale, la localisation dans l'espace.

Pour Descartes, la réalité, la matière, c'est l'étendue. Pour Newton, c'était davantage la masse qui caractérisait les particules de matière ; mais, pour l'un comme pour l'autre, ce qui était fondamental c'est que tout objet est quelque part, il est à chaque instant quelque part et ceci veut dire que cet objet microscopique a nécessairement une trajectoire. Maintenant la physique quantique fait tomber l'image de trajectoire. Ça veut donc dire que les particules ont été totalement dépouillées de leurs qualités ; c'était d'ailleurs dans le prolongement de la pensée initiale de l'atomisme qui était énoncée par Démocrite lorsqu'il écrit 4 siècles avant notre ère : illusion que le rouge, illusion que l'amer, illusion que le sucré, rien n'existe que les atomes et l'espace vide. C'est l'école du matérialisme pur et dur du départ. Pour Démocrite déjà, les atomes étaient dépouillés de toutes ces qualités sensibles. Ce dépouillement a été confirmé par la théorie classique de Galilée et Newton, mais ce dépouillement va très loin maintenant, c'est l'objet lui-même qui est dépouillé de ses caractéristiques d'être localisé quelque part. C'est une révolution tout à fait extraordinaire. Mais alors, qu'est donc la lumière ? Des particules ou des ondes ? Nous avons vu qu'avec Descartes, Newton et encore Einstein, ce sont des particules. Pour les 2 premiers, c'était déjà des particules et Einstein a ramené l'idée de particule qui est le Photon de lumière. Par contre, une autre idée défendue par Huygens, Young et Fresnel, est que la lumière est des ondes. Il y avait donc un aspect corpusculaire et un aspect ondulatoire et les deux coexistaient ou s'opposaient. Donc les particules sont associées à des ondes, l'énergie du photon est associée à la fréquence des ondes ; les deux images coexistent, et la relation entre ces deux aspects est la constante de Planck. Tout ceci pour dire que la lumière est un très grand carrefour de la physique, elle est fondamentale dans toute la physique, elle a réuni et en même temps conservé, toutes les grandes théories : la relativité restreinte et la mécanique quantique. La

relativité restreinte parce que cette fameuse constante, caractéristique de la relativité restreinte, est la vitesse de la lumière qui est un invariant universel qui a la même mesure dans tous les référentiels galiléens : c'est la constante C , vitesse de la lumière 300.000 Km/seconde. C'est elle qui a réuni l'espace et le temps, le mariage de l'espace et du temps qui a été réalisé par Einstein dans ce qu'on appelle « l'espace-temps ». Cette relation a été réalisée grâce à cette constante universelle C . Par ailleurs, une autre grande constante universelle a été découverte par Planck au début du siècle, la « constante de Planck » qui réunit l'aspect corpusculaire et ondulatoire de la lumière. C'est ici que tous les aspects de la physique se réunissent à propos de la lumière. Donc maintenant, qu'est-ce que c'est que la lumière ? Ce qui est arrivé maintenant avec la mécanique quantique, c'est que ces deux images, corpusculaire et ondulatoire, sont toutes les deux inexactes, ce n'est ni l'un ni l'autre... Pourquoi ce ne sont pas des corpuscules ? Ça ne peut pas être des corpuscules puisqu'ils n'ont pas de trajectoire. Que peut être un corpuscule qui ne serait pas localisé ? on emploie le mot mais ça n'a plus rien à voir avec corpuscule. Ce n'est pas non plus une onde parce que les ondes sont les vibrations d'un support qui ne se propagent qu'à l'aide de ce support ; mais il n'y a pas de support, il n'y a pas d'éther, donc il ne peut pas y avoir d'ondes.

Nous devons accéder maintenant à des représentations beaucoup plus abstraites, celles de la mécanique quantique et de la théorie des champs. Et effectivement on s'aperçoit que, pour comprendre la nature, il faut s'adapter à elle ; c'est elle qui nous apprend le langage qu'elle parle, il ne faut pas lui imposer des idées a priori, c'est elle qui nous oblige à remettre en cause sans arrêt nos idées et nous oblige à utiliser de nouveaux concepts et une nouvelle façon de comprendre. Comme le disait Heisenberg, ce que nous a appris le développement de la physique, c'est que l'essentiel n'est pas d'augmenter notre savoir, mais de comprendre autrement. L'intelligibilité elle-même, nos méthodes pour comprendre doivent changer, notre façon de penser doit changer et la nature est notre instructeur. Ceci est vraiment une idée très importante et on n'a jamais fini de comprendre la nature parce que nous sommes un élément modeste et insignifiant pour la nature, qui nous déborde de partout ; Nous essayons de la comprendre par morceaux et nous y parvenons extrêmement difficilement et il n'est même pas sûr que nous finirons par y parvenir. J'aime beaucoup cette leçon d'humilité qui est celle des très grands découvreurs. Terminons maintenant par deux citations significatives ; la première est due à Einstein qui écrit dans une lettre à son ami Michelangelo Bosso en 1951, quatre ans avant sa mort « *cinquante années de spéculations ne m'ont pas rapproché de la réponse à la question : que sont les photons ? Il est vrai qu'aujourd'hui, n'importe qui croit le savoir, mais il se trompe* » Et on ne peut toujours pas répondre. C'est un peu décevant, mais cette quête de l'approfondissement de la nature des choses est absolument passionnante. La nature est prodigieuse. L'autre citation, plus ancienne, est celle du grand Newton qui écrivait « *je ne sais pas ce qu'il en semble au monde, mais quant à moi, il me semble que je n'ai été qu'un garçon jouant sur la plage et me divertissant de temps à autre en découvrant un galet mieux poli ou un coquillage plus beau que d'ordinaire, alors que le grand océan de la vérité s'étendait devant moi, dans la totalité de son mystère* » Des citations comme celles-là montrent ce que doit être un véritable scientifique, qui alimente ses connaissances et surtout, change sa façon de penser. On ne peut qu'être rempli d'admiration par cette humilité des très grands découvreurs.

**Conférence de Michel LAMBERT
enregistrée et mise sur papier par
Juliette BREMOND**