

Les contributions d'Einstein à l'élaboration de la première théorie des quanta

RESUME.

On rappelle les contributions d'EINSTEIN à la théorie quantique de 1905 à 1911. C'est EINSTEIN qui a réalisé le premier la quantification de l'énergie en tant que fait physique ; qui a le premier proposé un élargissement de la théorie quantique à d'autres domaines que ceux du rayonnement ; qui a le premier accepté la contradiction entre les aspects ondulatoire et corpusculaire. Dans sa démarche, EINSTEIN est soutenu par la nécessité d'un remaniement théorique profond dont il pose quelques-unes des conditions.

Elle est de Max BORN cette remarque selon laquelle, à supposer — chose impensable — que la conception du monde physique d'EINSTEIN soit divisible en compartiments étanches et qu'il n'ait pas écrit une seule ligne sur la Relativité, il n'en demeurerait pas moins l'un des plus grands physiciens de tous les temps. Ne s'en étonneront que ceux qui s'en tiendraient à la légende qui court sur sa figure et son œuvre, et se rapporte avant tout à l'inventeur de la Relativité restreinte et générale, dont elle fait le démiurge de l'espace et du temps, le sorcier de l'équivalence entre la matière et l'énergie, de l'identité établie entre la gravitation et la géométrie, et le père théorique — affublé en prophète — des cosmogonies rhodernes. L'aura de la légende brode bien entendu sur une réalité, et celle-ci se prête assez bien à une interprétation et une déformation spectaculaires puisqu'on peut y situer l'origine de bouleversements parmi les plus apparents de nos conceptions et de notre rapport au monde. Par ailleurs, la direction des recherches d'EINSTEIN à laquelle cette image exclusive se réfère semble bien avoir été privilégiée par ce dernier, ne serait-ce que parce qu'il lui a entièrement consacré la deuxième moitié de sa vie. On peut considérer en outre, avec Louis DE BROGLIE que la théorie de la Relativité est sortie tout entière du cerveau créateur d'EINSTEIN alors que ses autres contributions s'inscrivent dans un effort plus collectif — et notamment cette théorie des quanta « dont PLANCK a posé les premières pierres » et qui doit — toujours selon les termes de

DE BROGLIE — « à la pensée d'EINSTEIN quelques-uns de ses plus admirables prolongements ». Il est vrai enfin que ses recherches dans la vie de la Relativité et de la théorie du champ ont plus immédiatement répondu à ce qu'il attendait d'une théorie physique véritablement fondée — que, d'un petit nombre de principes au départ, le reste découlât logiquement — alors que, de la mécanique quantique, il devait reconnaître dès avant les années 30 et jusqu'à sa mort qu'elle résistait à une telle approche.

La position des spécialistes — physiciens, historiens des sciences, épistémologues — à ce sujet est ambiguë, et c'est pourquoi l'on a évoqué plus haut le mythe, qui apparaît à quelques égards, significatif. Tous reconnaissent que les travaux d'EINSTEIN sur la physique quantique auraient suffi à justifier une stature scientifique de première grandeur. N'est-ce pas d'ailleurs « pour ses contributions à la théorie des quanta », que le prix Nobel de 1921 lui fut attribué (en 1922), et non pour la Relativité, alors controversée ? (Mais nous verrons que l'acceptation des idées d'EINSTEIN, et surtout la notion de quanta de rayonnement, a demandé du temps, bien davantage que celles de PLANCK). Il n'en demeure pas moins cette difficulté : l'un des fondateurs de la théorie quantique par des contributions majeures de 1905 à 1917 — et encore en 1922 —, EINSTEIN n'a pas participé à son développement quand elle est devenue une *mécanique*, élevant au contraire de multiples objections à son encontre. Une majorité de scientifiques lui en feraient aujourd'hui reproche, attribuant son refus des conceptions en vigueur sur la mécanique quantique à un effet de son vieillissement, voire de sénilité, et voyant dans sa recherche d'une théorie du champ unifié plutôt une quête abstraite, spéculative, vaine et utopique, et dans son obstination la sclérose d'un grand esprit ; témoignant ainsi qu'à leurs yeux, c'est l'EINSTEIN « empiriste » de la période précédente, celui qui faisait feu de tout phénomène physique avec hardiesse et génie au nom d'un « opportunisme sans scrupules », qui leur paraît le plus remarquable. Ils rejoignent, par cette position, l'exclusive de la légende, en estompant la portée et la signification de la contribution d'EINSTEIN à la théorie quantique, et le renvoyant finalement à son mythe — fondateur génial mais prophète marginal, vieilli et dépassé.

Or, c'est cette portée et cette signification qu'il importe de considérer. On en présentera ici une esquisse partielle qui sera comme un historique commenté des premiers travaux d'EINSTEIN sur les quanta : le commentaire devrait être poursuivi en analyse épistémologique ; celle-ci ferait voir les conceptions sous-jacentes, voire les exigences de la pensée physique d'EINSTEIN, les suivant dans leur évolution aussi bien qu'en parallèle avec ce qui s'affirme au même moment dans les travaux sur la Relativité.

Il serait alors possible d'en dire davantage sur l'épistémologie et la philosophie propre d'EINSTEIN, et de mieux saisir cette unité de la réflexion à laquelle faisait allusion Max BORN que nous citons en commençant — unité dans ses recherches comme dans ses conceptions, unité comme exigence et comme direction poursuivie — ce qui permettrait de mieux comprendre le caractère de ces contributions comme la nature de sa critique. C'est à la première étape de ce programme — le retour historique — qu'on s'en tiendra dans cet article.

Les débuts de la Physique quantique

- 1900 : PLANCK — Explication du rayonnement du corps noir.
- 1905 : EINSTEIN — Explication de l'effet photoémissif.
- 1907 : EINSTEIN — Interprétation des chaleurs spécifiques aux très basses températures.
- 1911 : EINSTEIN — Relation entre la compressibilité d'un cristal et son absorption optique.
- 1913 : BOHR — Théorie sur la structure des atomes et les spectres d'émission.
- 1914 : MILLIKAN — Mesure de h à partir de l'effet photoémissif.
- 1917 : EINSTEIN — Synthèse de la physique des quanta.

PLANCK : QUAND LA THEORIE COMMENCE AVEUGLE, OU LA REVOLUTION DANS L'EAU DORMANTE.

Les débuts de la théorie quantique ont fait l'objet de suffisamment d'exposés détaillés pour qu'on puisse se contenter ici d'en rappeler seulement quelques aspects, dans la mesure où ils nous éclairent sur l'originalité de la contribution d'EINSTEIN. On rapporte en général à la date du 14 décembre 1900 la naissance de la théorie des quanta : c'est le jour où Max PLANCK exposa un mémoire « sur la théorie de la loi de la distribution d'énergie du spectre normal », dans lequel il proposait sa loi du rayonnement du corps noir, donnant la densité d'énergie U , par intervalle d'unité de fréquence ν , en faisant intervenir une partition de l'énergie des résonateurs suivant des quantités discrètes, et en introduisant la « constante universelle h » dont il donnait la valeur :

$$U_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad h = 6,55 \times 10^{-27} \text{ erg. sec.}$$

La seule manière de rendre compte des observations du spectre des fréquences était de considérer des éléments d'énergie proportionnels aux fréquences : $\varepsilon = h\nu$. Dans ses premiers travaux, PLANCK n'insista pas sur le fait que l'énergie moyenne des oscillateurs d'une fréquence donnée est un multiple entier de la fréquence : à lui-même, aussi bien qu'aux autres physiciens de cette époque, l'introduction de la constante h apparaissait comme un procédé mathématique sans réelle signification physique. Il s'agissait, comme PLANCK l'a écrit plus tard, d'un « acte de désespoir », effectué parce qu'il « fallait à tout prix une explication théorique » aux phénomènes de rayonnement du corps noir que la théorie classique ne parvenait aucunement à fournir. Plus tard, il devait longtemps chercher à minimiser la signification de h en tentant de retrouver cette constante par des considérations classiques. Il présenta au début de 1912, à partir d'une « inconsistance logique » dans son travail de 1900 relevée par EINSTEIN dès 1916, une modification de sa théorie : c'est la « seconde théorie » de PLANCK, dans laquelle l'absorption de l'énergie électromagnétique par des oscillateurs est ramenée à un processus continu, seule l'émission étant discontinue, se faisant par quanta entiers d'énergie soumis à des lois de probabilités. Et, en 1914, il proposa une « troisième théorie » dans laquelle l'émission et l'absorption sont toutes deux des processus continus, les effets quantiques étant dus à des collisions de particules atomiques ; mais il apparut très vite qu'une telle hypothèse était inacceptable.

Au surplus, l'introduction de h peut, à ce stade, apparaître comme une hypothèse *ad hoc*, faite à l'usage du seul rayonnement du corps noir. Bien qu'elle fût rapidement étayée par toutes les expériences effectuées dans ce domaine, son utilisation restreinte à cet unique phénomène en limitait singulièrement la portée physique et la signification profonde. Pour ces raisons, c'est en quelque sorte dans une très grande modestie quant à sa véritable nature que naissait en 1900 la théorie des quanta. Ce n'est que plus tard, une fois reconnue sans recours, son irréductibilité à la théorie classique de l'électromagnétisme et de la thermodynamique et réalisée la portée générale de ses propositions — sa validité dans d'autres domaines — qu'elle devint véritablement la *théorie* des quanta : sa fécondité se marqua dès lors, notamment par l'application qu'en fit BOHR pour décrire la structure des atomes. Nous verrons comment l'apport d'EINSTEIN fut décisif dans ce passage d'une *hypothèse mathématique* d'application limitée à une *théorie physique*.

Mais cette théorie ne devint une mécanique, c'est-à-dire ne se substitua réellement aux théories classiques, qu'au prix d'un renouvellement du cadre conceptuel de la physique, cadre dont « l'ancienne théorie des quanta », ainsi qu'on l'appelle aujourd'hui, se satisfaisait (les calculs quantiques dans ce cadre sont dits « semi-classiques ») : elle combinait ce cadre conceptuel à la considération d'énergies et d'actions discontinues. (C'est à SOMMERFELD qu'il revient d'avoir, en 1911, réalisé que la dimension de h — une action — ne relevait pas d'un simple hasard numérique, mais que sa signification physique était bien d'un quantum élémentaire d'action). Cette deuxième étape, qui donna naissance à la mécanique quantique, fut rendue possible par la prise en considération de la dualité des ondes et des corpuscules. Généralisée à toute particule matérielle par LOUIS DE BROGLIE en 1923-1924, celle-ci fut introduite explicitement dès 1909 par EINSTEIN pour la lumière et le rayonnement électromagnétique. Mais sa racine profonde se trouve dans un mémoire de PLANCK qui précède de quelques mois celui déjà cité de décembre 1900. Là non plus, PLANCK ne réalisa pas la portée de l'idée qu'il introduisait à son insu, sous la forme de ce qu'il croyait n'être qu'une formule d'interpolation.

Informé des derniers résultats expérimentaux de RUBENS et KURLBAUM, relatifs au corps noir, sur le comportement de la densité d'énergie, proportionnelle à la température absolue T pour les basses fréquences et les grandes températures, c'est-à-dire contraire à la loi de WIEN (valable au contraire pour les hautes fréquences), PLANCK fut conduit à concilier les deux formules :

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{\text{const}}{U^2} \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{\text{const}}{U}$$

(S étant l'entropie et U l'énergie moyenne d'un oscillateur caractérisé par une température absolue T et une fréquence ν). Il avait déduit la première formule du comportement aux basses fréquences et grandes températures, dont la loi de RAYLEIGH-JEANS rendait bien compte, et la seconde de la loi de WIEN. PLANCK proposa donc un compromis, en supposant une forme :

$$\frac{\partial^2 S}{\partial U^2} = \frac{a}{U(U + b)}$$

C'est cette formule d'interpolation qu'il présenta le 19 octobre 1900 à la Société allemande de physique sous le simple titre suivant : « sur une amélioration de la loi de rayonnement de WIEN », et qu'il allait par la suite s'attacher à retrouver en recherchant un mécanisme pour le rayonnement du corps noir. L'hypothèse du quantum d'action devait lui permettre de passer d'une loi très

empirique à une explication plus profonde, la nécessité d'introduire une forme combinatoire des distributions d'énergie entraînant la discontinuité des échanges élémentaires. Or, rétrospectivement, il apparaît que cette interpolation, dans la manière dont PLANCK la justifie, c'est-à-dire par le mécanisme explicatif qu'il en propose, revient à combiner les aspects ondulatoire et corpusculaire du rayonnement : elle conjugue en effet une partie purement électrodynamique, basée sur la théorie de MAXWELL et faisant intervenir des énergies continues, et une partie purement statistique où les énergies sont considérées comme discrètes. Mais de cela, PLANCK ne s'était pas rendu compte, et c'est EINSTEIN qui, en 1906, releva l' « inconsistance logique » de son raisonnement, puis en 1909, reconnût la dualité onde-corpuscule pour la lumière. De ce point de vue, on peut voir, avec Max JAMMER, dans la communication de PLANCK du 19 octobre 1900, la présence de « certaines implications qui, une fois reconnues par EINSTEIN, devaient affecter de façon décisive les fondements même de la physique », et considérer cette date comme le véritable commencement de la théorie des quanta, étant donné l'importance pour son développement futur de la dualité onde-corpuscule qui s'y trouve implicitement contenue, pour la première fois.

EINSTEIN 1905, QUANTA DE LUMIERE ET D'ENERGIE : POINT DE VUE HEURISTIQUE OU BRULOT THEORIQUE ?

Jusqu'à l'article d'EINSTEIN de 1905 intitulé « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière », les quanta d'énergie n'étaient considérés que relativement aux processus d'interaction entre la matière et le rayonnement. L'idée que le rayonnement lui-même puisse être quantifié était si contraire à la théorie électromagnétique que, on l'a vu, PLANCK lui chercha longtemps des alternatives et que, en proposant cette hypothèse, EINSTEIN la présenta comme un simple « point de vue heuristique ».

Le travail d'EINSTEIN peut être considéré comme indépendant de celui de PLANCK, bien qu'il en soit informé, et utilise la constante de PLANCK h . Comme l'a écrit Martin J. KLEIN, « il est davantage frappé par ce que PLANCK n'a pas fait dans sa théorie du corps noir que par ce qu'il a fait » et, pour lui, l'origine de la difficulté qui conduit à l'hypothèse quantique se trouve « dans la distinction formelle profonde entre les idées théoriques des physiciens sur les gaz et autres corps pondérables et la théorie de MAXWELL des processus électromagnétiques dans l'espace soi-disant vide ». Ce à quoi EINSTEIN s'attache pour sa part, dans son article de 1905, c'est à chercher les propriétés du rayonnement que l'on peut déduire de l'application du deuxième principe et de l'interprétation statistique.

Exprimant le changement d'entropie du rayonnement du corps noir en fonction du changement de volume de v_0 à v , dans le domaine de validité de la loi de WIEN, c'est-à-dire pour les faibles densités de rayonnement ou les grandes fréquences (correspondant à de grandes valeurs de v/T), EINSTEIN fut conduit à la formule :

$$S - S_0 = k \log \left(\frac{v}{v_0} \right)^{E_v/\beta v k}$$

(où k est la constante de BOLTZMANN, β le coefficient de la loi de WIEN ; explicité par PLANCK, ce coefficient a la valeur $\beta = \frac{h}{k}$).

L'entropie du rayonnement a donc une forme logarithmique. Or, cette forme est la même pour un gaz idéal constitué de particules. En effet, $\left(\frac{v}{v_0} \right)^n$ étant la probabilité de trouver n par-

ticules, à un instant quelconque, dans une partie v du volume v_0 , la théorie cinétique des gaz entraîne, par l'équation fondamentale de BOLTZMANN entre l'entropie et la probabilité ($S = k \log W$) :

$$S - S_0 = k \log \left(\frac{v}{v_0} \right)^n$$

Identifiant les deux formules, EINSTEIN en déduit que $E_v = n h v$, et conclut que « le rayonnement monochromatique de faible densité (...) se comporte comme s'il était constitué de quanta indépendants d'énergie » de valeur $h v$. Bien qu'une telle proposition paraisse étrange, elle entraîne plusieurs conséquences qui sont en accord avec les observations expérimentales : les phénomènes auxquels EINSTEIN applique ce nouveau point de vue sont la photoluminescence (transformation d'une lumière de fréquence donnée en lumière de fréquence différente, régie par la loi de STOKES selon laquelle la fréquence secondaire ne peut être supérieure à la fréquence incidente), l'effet photoélectrique (émission d'électrons par un métal soumis à un rayonnement lumineux), la photo-ionisation (ionisation de gaz soumis à un rayonnement ultraviolet ou X). Dans ces trois cas, les lois observées n'avaient pas d'explication en termes de théorie classique : l'hypothèse des « quanta de lumière » leur en fournissait une particulièrement simple.

L'effet photoélectrique, découvert par HERTZ en 1886 et indépendamment par SCHUSTER ainsi que par ARRHÉNIUS en 1887, apporta par la suite les confirmations les plus probantes de la théorie des quanta de lumière. (Il vaut la peine de noter que les mêmes expériences de HERTZ, qui confirmaient la théorie de MAXWELL en démontrant l'existence des ondes électromagnétiques,

contenaient le germe de sa remise en cause...). De nombreux travaux expérimentaux, au premier rang desquels se situent ceux de P. LENARD, aboutirent à mettre en évidence la nature électronique des particules émises, puis l'existence d'un seuil de fréquence et l'indépendance de l'énergie des électrons par rapport à l'intensité du rayonnement incident. Ces deux derniers caractères étaient impossibles à concilier avec la théorie électromagnétique, mais la théorie d'EINSTEIN les expliquait fort bien : chaque quantum de lumière peut interagir avec un seul électron qui peut être libéré du métal moyennant un certain travail P. Le bilan énergétique de l'interaction entraîne :

$$h\nu = P + \frac{1}{2} m v^2.$$

La mesure des vitesses maximales des photoélectrons émis par divers métaux, effectuée en 1912, s'avéra en parfait accord avec la théorie. Mais la confirmation la plus forte fut obtenue de 1914 à 1916 par R. MILLIKAN, mesurant le potentiel d'arrêt des photoélectrons (c'est-à-dire le potentiel nécessaire pour les empêcher d'atteindre une deuxième plaque métallique), et vérifiant directement cette prédiction d'EINSTEIN selon laquelle le potentiel d'arrêt devait être « une fonction linéaire de la fréquence de la lumière incidente (...), la pente étant indépendante de la nature de la substance étudiée ». Il obtenait ainsi expérimentalement la détermination de la constante de PLANCK, en accord avec la valeur avancée en 1900 par ce dernier. Ce n'est que de cette confirmation de l'équation de l'effet photoélectrique proposée par EINSTEIN que le quantum de lumière et d'énergie commença d'être effectivement considéré comme une réalité physique : non sans de longues hésitations sur lesquelles nous reviendrons.

Il faut souligner que les prédictions d'EINSTEIN relativement au potentiel d'arrêt des électrons étaient, comme l'écrit justement M. J. KLEIN, « presque aussi remarquables que l'hypothèse elle-même, dans la mesure où l'on ne savait pratiquement rien, en 1905, de la dépendance en fréquence du potentiel d'arrêt pour les photoélectrons » : dix ans furent en effet nécessaires pour les confirmer expérimentalement. Comme toujours chez EINSTEIN, l'expérience entretient par rapport à la théorie un rapport particulièrement riche dans la cohérence de capacités prédictives qui sont à longue portée et concernent en fin de compte assez peu les données factuelles immédiates. Par rapport à ces dernières, il suffit à EINSTEIN de partir d'un fait, inexpliqué, en désaccord avec toutes les conceptions existantes, ce qui lui donne le caractère exemplaire d'un principe nouveau, ou de défaut de principes existants, et lui confère en réalité une portée bien plus grande. N'oublions pas qu'au même moment, EINSTEIN considère comme

des « faits » de véritables principes qui le conduisent à la théorie de la Relativité. Ce rapport spécifique aux faits d'expérience n'est donc pas fondamentalement différent, chez EINSTEIN, dans des domaines aussi distincts que la Relativité ou les quanta encore balbutiants : contentons-nous de noter ici ce rapprochement et d'avancer déjà le soupçon que même pour les quanta, l'activité « empiriste » d'EINSTEIN, son souci va essentiellement à des problèmes théoriques de fond.

LA CONSTRUCTION CRITIQUE DE LA THEORIE QUANTIQUE : LA DUALITE DES ONDES ET DES CORPUSCULES ET LA NECESSITE D'UN REMANIEMENT THEORIQUE.

Dans un article de 1906, EINSTEIN décela, comme on l'a dit plus haut, une inconsistance logique dans le raisonnement de PLANCK : l'application simultanée d'une théorie (celle de MAXWELL) à énergie d'oscillateur continue, et celle d'un traitement statistique où cette même énergie est considérée discrète. En fait, cet aspect discret de l'énergie chez PLANCK n'était pas évident, puisque ce dernier le masquait — à ses propres yeux — comme on l'a vu ; ce qui permet de dire que les quanta d'EINSTEIN, en 1905, ne sont pas les mêmes que ceux de PLANCK. L'indépendance conceptuelle des deux hypothèses est assez bien résumée dans cette formule de A. PAIS : « En 1900, PLANCK avait découvert la loi du rayonnement du corps noir sans utiliser les quanta de lumière. En 1905, EINSTEIN découvrait les quanta de lumière sans utiliser la loi de PLANCK ». Mais, en 1906, EINSTEIN se rend compte que chez PLANCK également l'énergie du rayonnement est discrète : que cela est implicite dans la dérivation de la formule de PLANCK (une conclusion que ce dernier serait long à admettre). D'où l'inconsistance logique : si l'énergie, même à s'en tenir au changement d'énergie du résonateur, ne peut être que discontinue, alors, pour EINSTEIN, on ne peut pas appliquer la théorie de MAXWELL, même pour le calcul des énergies moyennes. « La théorie de PLANCK doit, ajoute-t-il, faire l'hypothèse que bien que la théorie de MAXWELL des résonateurs élémentaires ne soit pas applicable, l'énergie moyenne d'un tel résonateur, entouré par le rayonnement, est égale à celle qui serait obtenue par un calcul basé sur la théorie de l'électricité de MAXWELL ». Or, il montre, et il le précisera en 1909, que cette condition n'est pas réalisée, car il y a une partie du spectre où la quantité $\epsilon = h\nu$ n'est pas petite devant l'énergie moyenne U . Ce qu'EINSTEIN veut souligner par cette remarque, c'est essentiellement que l'hypothèse des quanta de PLANCK ne saurait échapper à un remaniement théorique profond : les quanta, loin d'être un artifice sans portée physique, ont des implications fondamentales. Et s'il avait pu lui-même considérer, en 1905, que les points de vue continu et dis-

continu pouvaient être conciliés par le recours aux moyennes [1], il réalise dès lors que les choses ne sont pas aussi aisées, et que la nécessité d'un remaniement considérable se fait jour en matière de théorie du rayonnement. Il ne suffit pas de supposer, comme l'a fait PLANCK, que l'émission et l'absorption de rayonnement se font par multiples de $h\nu$; il est absolument nécessaire de supposer que l'énergie de rayonnement elle-même ne peut exister que par multiples de $h\nu$, ce qui est sa propre hypothèse de 1905.

Il le démontre à partir d'une évaluation des fluctuations d'énergie du rayonnement du corps noir. Le carré moyen de la fluctuation d'énergie, noté $\bar{\epsilon}^2$, se présente, dans l'hypothèse quantique, comme une somme de deux termes dont l'interprétation est la suivante : l'un est un terme d'interférences entre des ondes partielles, et correspond à la théorie ondulatoire de la lumière de MAXWELL ; l'autre correspond à des quanta de lumière qui seraient traités statistiquement comme des particules dans la théorie cinétique et tout se passe donc comme si la lumière était bien, sous ce rapport, de nature corpusculaire. La même année 1909, EINSTEIN propose un essai de représentation du corpuscule lumineux comme une singularité dans l'espace liée à un champ de forces, la superposition de champs assurant le caractère ondulatoire : ce qui était une manière de reprendre la théorie des accès de NEWTON, et de réconcilier la nature ondulatoire de la lumière avec la structure quantique ; ou du moins, comme il le dit explicitement, de montrer que les deux ne sont pas incompatibles [2]. Mais cette tentative n'apparaît pas très convaincante, et son auteur exprima par la suite des hésitations sur une interprétation si crûment corpusculaire. Quoiqu'il en soit, EINSTEIN annonce « une nouvelle phase du développement de la physique théorique qui verra produire une théorie de la lumière comme une sorte de fusion entre les théories ondulatoire et de l'émission » (corpusculaire)...

Un tel souci — de concilier les aspects ondulatoire et corpusculaire — était rendu nécessaire à l'époque, l'hypothèse des quanta de lumière étant encore généralement rejetée — même par un SOMMERFELD en 1911, ou par un LORENTZ — en raison de sa contradiction avec la théorie de MAXWELL, mais également en raison du caractère partiel des explications par les quanta, et de l'absence de signification dynamique de la constante h qui paraissait assez arbitraire : cette signification, la dualité onde-corpuscule devait seule la lui octroyer. M. JAMMER rappelle, comme illustration des difficultés à s'imposer rencontrées par l'hypothèse des quanta de lumière, la lettre adressée en 1913 par PLANCK, WARBURG, NERNST et RUBENS au ministre allemand de l'Éducation pour proposer EINSTEIN au siège de l'Académie prus-

sienne des sciences, siège laissé vacant par le décès de J.-H. VAN'T HOFF : « on trouverait difficilement un seul problème parmi ceux, majeurs, dont la physique moderne est si riche, auquel EINSTEIN n'ait apporté une contribution importante. On ne doit pas trop lui reprocher d'avoir parfois raté la cible, au cours de ses spéculations, comme c'est le cas, par exemple, de l'hypothèse des quanta de lumière ; car il n'est pas possible d'introduire des idées fondamentalement neuves, même dans les sciences les plus exactes, sans prendre de temps en temps des risques ». (C'est pour cette même hypothèse des quanta de lumière qu'il recevra le prix Nobel huit ans plus tard !)

L'hypothèse d'EINSTEIN différait donc clairement de celle de PLANCK — qui fut au contraire généralement acceptée, du moins à partir de 1911 —, bien que les deux aient en commun la formule $E = h\nu$. PLANCK ne proposait qu'une hypothèse sur l'interaction entre le rayonnement et la matière, alors qu'EINSTEIN donnait un modèle « corpusculaire » (une interprétation atomistique) disait PLANCK) du rayonnement, qui entraînait une contradiction avec la théorie de MAXWELL.

Plus encore qu'un « réalisme corpusculaire » — lequel serait en tout état de cause très nuancé (il manque la considération de l'impulsion, et les calculs d'EINSTEIN portent essentiellement sur des fluctuations, non sur des interactions de corpuscules) —, il y a au cœur de son hypothèse des quanta de lumière l'exigence d'un remaniement théorique profond. C'est elle qui fait la différence radicale entre ses conceptions et celles de PLANCK. Un autre rapprochement avec l'élaboration de la théorie de la Relativité s'impose d'ailleurs ici : son hypothèse paraît à EINSTEIN être le seul moyen de rétablir la symétrie entre l'émission et l'absorption du rayonnement que la théorie ondulatoire de MAXWELL enfreignait mais qui lui semblait expérimentalement prouvée [3]. Cet argument sur la nécessité d'éliminer une dissymétrie n'est pas, en effet, sans rappeler celui par lequel s'ouvre l'article de 1905 sur la Relativité restreinte [4].

L'EXTENSION DU DOMAINE DE VALIDITE DES QUANTA : LE PROBLEME DES CHALEURS SPECIFIQUES.

Ce remaniement théorique qu'il entrevoit, il le conçoit sur une base beaucoup plus vaste que les seuls phénomènes du rayonnement. Il remarque que les mouvements moléculaires, que l'on pensait jusqu'ici soumis aux lois « du mouvement des corps que nous percevons directement », sont tels que « l'ensemble des états possibles (d'ions en vibration) est plus restreint que pour les corps dont nous avons directement l'expérience » : c'est, estime-t-il, la théorie cinétique moléculaire elle-même qui doit

être modifiée et non seulement celle de la chaleur et du rayonnement. C'est à cette extension de la mise en cause de la validité des conceptions classiques, laquelle va s'avérer en même temps une généralisation du domaine d'application de l'hypothèse des quanta, qu'EINSTEIN s'attache dans son article de 1907 sur la théorie des chaleurs spécifiques. « Si la théorie du rayonnement de PLANCK, écrit-il, touche vraiment à quelque chose de fondamental, on doit s'attendre à ce que, dans d'autres domaines que la théorie de la chaleur, il y ait également des contradictions entre la théorie cinétique moléculaire actuelle et l'expérience, et qu'elles puissent être résolues par la méthode proposée ». Tel est le problème des chaleurs spécifiques des solides, choisi par EINSTEIN pour y appliquer l'hypothèse quantique. La loi de DULONG et PETIT (1819) selon laquelle la chaleur spécifique est la même pour tous les atomes des corps simples et ne varie pas avec la température, valable pour des températures moyennes ou élevées, était mise en défaut pour les éléments légers, et s'était vue systématiquement contredite par les expériences dès qu'il fut possible d'atteindre des basses températures (à partir de 1872 et surtout vers la fin du 19^{me} siècle). Or, cette loi recevait son explication naturelle de la physique classique, laquelle ne pouvait au contraire rendre compte de la décroissance des chaleurs spécifiques avec celle de la température de telle sorte qu'elles semblaient devoir s'annuler au zéro absolu.

Pour EINSTEIN, il s'agit là d'une insuffisance du théorème de l'équipartition. Il étudie le phénomène en termes d'oscillations harmoniques, en supposant que les atomes, indépendants les uns des autres, oscillent à la même fréquence. Il obtient ainsi l'énergie par mole, d'où la chaleur spécifique $\left(\frac{dU}{dT}\right)$, qui présente bien le comportement observé (il la compare aux données relatives au diamant) : les chaleurs spécifiques de tous les solides cristallins s'annulent en approchant le zéro absolu de température. Par ailleurs, la loi de DULONG et PETIT est retrouvée comme une limite pour les températures élevées, comme il l'avait requis au début de l'article. (La simplification en quoi consistait l'hypothèse d'une même fréquence d'oscillation atomique devait être modifiée peu après, mais sans que cette précision change rien à l'essentiel de l'explication).

Cette extension du domaine d'application de la théorie des quanta fut déterminante pour l'acceptation de cette dernière. Elle fut à l'origine du ralliement de NERNST — qui travaillait expérimentalement sur les chaleurs spécifiques et trouva qu'elles s'accordaient avec la formule d'EINSTEIN — et, probablement par

l'intermédiaire de celui-ci, de l'organisation des Congrès Solvay qui allaient s'avérer si importants pour le développement de la physique quantique. Plus que de simple extension, il s'agit en fait d'un véritable renversement de point de vue : les phénomènes de rayonnement découlent désormais de la théorie des vibrations atomiques, ce qui constitue indéniablement une simplification de la situation théorique, et la rapproche d'une perspective fondamentale.

En 1911, EINSTEIN tire une autre conséquence inattendue de la théorie des quanta sur les propriétés de la matière : il montre à partir d'une suggestion de MADELUNG et SUTHERLAND, la relation qui existe entre la compressibilité d'un cristal et sa fréquence d'absorption optique, donc sa chaleur spécifique. Cette relation, susceptible d'être testée expérimentalement, l'est bientôt par NERNST, dont les mesures dans le cas de l'argent montrent un excellent accord avec la formule trouvée par EINSTEIN et donnée dans son article sur les « relations entre le comportement élastique et la chaleur spécifique des corps solides à molécules monoatomiques » [4].

Ce n'est qu'à l'occasion du Congrès Solvay de 1911 que l'hypothèse quantique se vit réellement — c'est-à-dire sans retour — prise au sérieux. PLANCK acceptait de renoncer à une interprétation classique de h et de mettre en doute l'absolue validité de la mécanique classique, SOMMERFELD proposait une interprétation de h en terme d'action, ce qui contribuait à en faire réellement un concept physique et non plus une simple constante numérique et préluait à l'élaboration d'une nouvelle mécanique ; POINCARÉ, qui ne s'était penché réellement sur les problèmes du rayonnement et la théorie des quanta que depuis très peu de temps, et surtout à l'occasion des discussions du Congrès, démontrait quelques jours après qu'il était impossible de se passer de discontinuité dans les phénomènes de rayonnement si l'on voulait aboutir à des quantités finies, et que l'hypothèse des quanta s'imposait absolument. Il concluait : « l'hypothèse des quanta est la seule qui conduise à la loi de PLANCK ». Déjà, à vrai dire, en 1909, EINSTEIN avait établi, à partir de sa formule de fluctuation où apparaissaient deux termes indépendants dont on a parlé précédemment, qu'il n'était pas possible de faire l'économie de l'hypothèse des quanta en la remplaçant par une condition plus conforme aux conceptions classiques ; comme l'écrit M.-J. KLEIN, « alors que PLANCK avait introduit la quantification comme une condition *suffisante* pour établir sa distribution, EINSTEIN soutenait qu'elle était une conséquence nécessaire ». En outre, juste avant la tenue de la réunion Solvay, EHRENFEST venait de démontrer que les quanta étaient nécessaires pour éviter la « catastrophe ultraviolette » de la loi de RAYLEIGH-JEANS : mais son tra-

vail fut ignoré lors des discussions du Congrès. Il ne fallait pas moins que l'autorité scientifique de POINCARÉ pour faire accepter une telle idée...

Au demeurant, l'hypothèse des quanta qui était ainsi désormais acceptée était-elle celle de PLANCK, c'est-à-dire relative aux phénomènes d'émission et d'absorption. Celle d'EINSTEIN, c'est-à-dire la quantification de l'énergie du rayonnement lui-même, devait, pour l'être, demander davantage de temps : aussi bien était-il difficilement concevable que le rayonnement ait à la fois des propriétés ondulatoires et corpusculaires. MILLIKAN lui-même, qui mesura le potentiel d'arrêt des photoélectrons et vérifia de façon très précise la prédiction faite par EINSTEIN en 1905, pensa longtemps que si la formule proposée était correcte, la manière dont elle avait été introduite était pour le moins suspecte. « J'ai passé dix années de ma vie, écrivit-il, à tester cette équation d'EINSTEIN de 1905 et, contrairement à tout ce à quoi je m'attendais, je fus obligé de reconnaître, en 1915, qu'elle était vérifiée sans aucune ambiguïté, en dépit de son caractère peu raisonnable puisqu'elle semblait violer tout ce que nous savions de l'interférence de la lumière ».

Bien que n'ayant pas d'explications à proposer, EINSTEIN acceptait, dès 1909, cette apparente contradiction dans le comportement du rayonnement entre l'aspect ondulatoire et l'aspect corpusculaire : il nous restera à évaluer ce qu'elle signifiait conceptuellement pour lui. On a pu entrevoir, par ce qui précède, comment ce qui intéresse fondamentalement EINSTEIN, c'est le soubassement théorique — inconnu — de tous ces phénomènes, dont il attend la solution des contradictions apparentes. Après 1911, il lui paraît difficile d'avancer dans cette direction : il ne voit pas comment aborder le problème d'une manière fondamentale ; de fait, entre 1911 et 1916, EINSTEIN ne donna pratiquement plus de contribution dans le domaine du rayonnement et des quanta. Lorsque BOHR eut accompli ses travaux — pendant cette période, précisément — sur la quantification des niveaux d'énergie des atomes, EINSTEIN eut la possibilité d'accomplir une dernière avancée décisive, en effectuant par son fameux article de 1917 une magistrale synthèse de la physique des quanta et du rayonnement ramenée à ses concepts et principes fondamentaux, à partir desquels il décrivait la loi de PLANCK de 1900. Cet aboutissement prend, à la lumière de son cheminement antérieur ici esquissé, toute sa signification quant au but que vise EINSTEIN en matière de théorie physique et à la démarche qui lui est propre. C'est ce que je tenterai de montrer dans une autre étude.

Michel PATY,

(Lycée Louis-Pasteur - Strasbourg).

NOTES ET REFERENCES

Voir, du même auteur :

« Sur le réalisme d'Albert EINSTEIN », *La Pensée*, n° 204, avril 1979, 18-37 ; « EINSTEIN et la philosophie en France : à propos du séjour de 1922 », *Bulletin de la Société Française de Physique*, à paraître ; également : *Cahiers Fundamenta Scientiae*, n° 93, 1979, à paraître.

- [1] EINSTEIN rappelait, au début de son article de 1905, que les observations optiques, qui confirment totalement la théorie ondulatoire de la lumière, « se rapportent à des moyennes sur le temps, et non à des valeurs instantanées », et émettait de ce point de vue l'idée d'une conciliation possible entre le point de vue ondulatoire et l'émission et la transformation discontinue de la lumière.
- [2] EINSTEIN 1909 b. En fait, la notion de corpuscule lumineux n'est pas encore pleinement explicitée : ce n'est, comme on le verra dans la suite, qu'en 1916, qu'EINSTEIN énoncera la deuxième relation $p = h/\lambda$.
- [3] Dans une conférence à la Société Suisse de Physique donnée à Neuchâtel en 1910 (EINSTEIN 1910), EINSTEIN expose que son hypothèse, plus radicale que celle de PLANCK, du quantum de lumière, ne peut être réconciliée avec la théorie classique du rayonnement, et qu'elle localise l'énergie électromagnétique à la façon d'une particule qui aurait l'énergie $h\nu$. Il se garde encore d'identifier totalement le quantum de lumière à un corpuscule au sens classique. Cette réserve, qui ne sera abandonnée qu'en 1916, me semble importante, et quant à la méthode et quant aux conceptions exactes d'EINSTEIN.
- [4] On peut se demander avec JAMMER (op. cit. p. 1), si la théorie quantique n'aurait pas pu se développer directement de cette façon, avec moins de difficultés conceptuelles, la lenteur à l'acceptation du concept de quantum résultant de la priorité historique accidentelle des phénomènes du rayonnement.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- Niels BOHR 1964, *Physique atomique et connaissance humaine* (trad. fr. 1961, par E. BAUMER et R. OMNÈS), Gauthier-Villars, Paris, 1961 ; Gonthier, Genève, 1964, p. 55-108.
- Louis DE BROGLIE 1951, *Savants et découvertes*, Albin Michel, Paris, 1951 ; original fr. dans EINSTEIN, Hachette, Paris, 1969.
- LOUIS DE BROGLIE 1956, *Nouvelles perspectives en microphysique*, Albin Michel, Paris, 1956.
- Albert EINSTEIN 1904, « Allgemeine molekulare Theorie der Wärme », *Annalen der Physik* 14, 1904, 354-362.

- Albert EINSTEIN 1905, « Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt », *Annalen der Physik* 17, 1905, 132-148 ; engl. transl. by A.-B. ARONS and M.-B. PEPPARD, in *American Journal of Physics*, 33, 1965, 367-374.
- Albert EINSTEIN 1906, « Zur theorie des Lichterzeugung und Lichtabsorption », *Annalen der Physik* 20, 1906, 199-206.
- Albert EINSTEIN 1907, « Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Theorie der spezifischen Wärme », *Annalen der Physik* 22, 1907, 180-190 ; 800.
- Albert EINSTEIN 1909 a, « Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems », *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909, 185-193. Trad. française par E. DE PRUNELÉ, dans *Annales Fondation Louis de Broglie* 4, 1979, 151-171.
- Albert EINSTEIN 1909 b, « Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung », *Physikalische Zeitschrift* 10, 1909, 817-826.
- Albert EINSTEIN 1910, « Sur la théorie des quantités lumineuses et la question de la localisation de l'énergie électromagnétique », *Archives des Sciences Physiques et Naturelles* 29, 1910, 525-528.
- Albert EINSTEIN 1911 a, « Eine Beziehung zwischen dem elastischen Verhalten und der spezifischen Wärme bei festen Körpern mit einatomigen Molekül », *Annalen der Physik* 34, 1911, 170-174 ; 590.
- Albert EINSTEIN 1911 b, « L'état actuel du problème des chaleurs spécifiques », Congrès Solvay 1911, in LANGEVIN - M. DE BROGLIE, p. 407-435.
- Albert EINSTEIN 1916, « Strahlung-emission und -absorption nach der Quanten-theorie », *Verh. Deutsche Phys. Ges.* 18, 1916, 318-323.
- Albert EINSTEIN 1917, « Zum Quanten theorie der Strahlung », *Mitteilungen der Phys. Ges. Zurich* n° 18, 1916, 47-62 ; *Physikalische Zeitschrift*, 18, 1917, 121-128. Trad. française par M. DEMBNO-TCHAIKOVSKY et D. FARGUE, *Annales Fondation Louis de Broglie*, 4, 1979, 65-82. Trad. anglaise dans Van der Waerden, p. 63-77.
- Albert EINSTEIN et Michele BESSO, *Correspondance*, trad. P. SPEZIALI, Hermann, Paris, 1972.
- Albert EINSTEIN et Max BORN, *Correspondance 1916-1955*, commentée par Max BORN (1969), trad. P. LECCIA, Seuil, Paris, 1972.
- A.-P. FRENCH éd., *Einstein, le livre du centenaire* (version française réalisée par G. DELACÔTE et J. SOUCHON-ROYER, trad. par J.-B. YELNIK, D. LEDERER, F. BALIBAR, J. MOLGO, M. BIEZUNSKI), Hier et Demain, Paris, 1979 (Ed. en anglais : Heinemann Educational Books, London, 1979).

- Max JAMMER 1966, *The Conceptual development of Quantum mechanics*, Mc Graw Hill, New-York, 1966.
- Paul LANGEVIN et Maurice DE BROGLIE éd., *La théorie du rayonnement et les quanta, Instituts Solvay, 1er Conseil de Physique, 1911, Rapports*, Gauthier-Villars, Paris, 1912.
- Rémy LESTIENNE et Michel PATY 1964 a, « Il y a cinquante ans naissait la Mécanique Quantique », *La Recherche* 5, 1974, 644-653.
- Rémy LESTIENNE et Michel PATY 1964 b, « L'édification de la Mécanique Quantique », *Cahiers Fundamenta Scientiae*, n° 17, 1974, p. 1-37.
- Paul-Arthur SCHILPP ed, *Albert Einstein, Philosopher-Scientist* (1949), The library of living philosophers, Evanston, 1949.
- B.-L. Van der WAERDEN ed, *Sources of Quantum Mechanics*, North Holland, Amsterdam, 1967.
-