La seconde année miraculeuse d'Einstein

Françoise Balibar

Professeure émérite, Université Paris-Diderot, France. Présidente du colloque

Propos transcrits et complétés par Jean Pierre Treuil, A.E.I.S

En 2015, on a célébré le centenaire de la théorie de la relativité générale. C'est en effet au cours du mois de novembre 1915 qu'Einstein présenta à l'Académie des Sciences de Prusse en trois séances mémorables l'essentiel de sa théorie enfin achevée. Cet anniversaire a donné lieu à plusieurs manifestations ; le présent colloque s'inscrit dans cette perspective.

Mais il me semble qu'en choisissant la date de février 2016 pour la tenue de la rencontre d'aujourd'hui, les organisateurs ont voulu rappeler que l'héritage d'Einstein ne se réduit pas à ses deux théories de la relativité (restreinte, et générale) et comporte également quelques contributions essentielles à la théorie quantique, dont l'une, élaborée au cours de l'été 1916, est à la base d'importants travaux actuels. La période qui s'étend de part et d'autre du changement d'année, de 1915 à 1916, mérite le nom d'*annus mirabilis*, tout autant que la fameuse année 1905.

Je me propose d'organiser mon exposé autour de la contribution en 1916 d'Einstein à la théorie du rayonnement, et par là-même à la théorie quantique encore en cours d'élaboration. Il est remarquable qu'à peine la théorie de la relativité générale achevée, Einstein ait eu assez de puissance théorique pour publier en plus un article important dans un tout autre domaine, celui de la théorie quantique. Cependant cette prouesse paraît moins étonnante si l'on songe que pendant toute sa vie, de 1905 à sa mort en 1955, Einstein n'a cessé d'être hanté (le mot n'est pas trop fort) par les quanta, qu'il avait lui-même introduits au sein de la théorie physique au terme d'un raisonnement « heuristique » développé en 1905 pour expliquer certaines particularités du rayonnement dans ses rapports avec les échanges de chaleur. Cette préoccupation incessante apparaît nettement à la lecture de sa correspondance (tout particulièrement dans les lettres adressées à ses amis Michele Besso et Paul Ehrenfest).

En 1916, à Berlin, en pleine guerre, la vie n'est pas facile et l'atmosphère déprimante : au détour d'une phrase, par exemple, Einstein note dans sa correspondance avec l'un de ses amis, que l'une de leurs connaissances communes « vient de perdre ses deux fils... ». Depuis le début de la guerre, Einstein, citoyen suisse, travaille avec acharnement - que pourrait-il faire d'autre ? - et continue à réfléchir à la « réalité » des quanta qu'il a introduits à titre d'hypothèse en 1905, mais dont il aimerait déterminer le statut ontologique. L'occasion lui est donnée de mettre en ordre et d'approfondir ses réflexions lorsqu'il lui est demandé de contribuer à un volume publié par la Société Physique de Zurich, en hommage à l'un de ses membres éminents, Alfred Kleiner, récemment décédé. Alfred Kleiner avait été l'un des directeurs de thèse d'Einstein ; plus exactement, Einstein avait entrepris avec Kleiner un travail de thèse qui d'un commun accord ne fut pas achevé et les deux hommes avaient continué à entretenir de bonnes relations. Einstein écrit pour cet hommage un texte qui constituera la première partie de l'article dont il exposera le contenu en octobre-novembre 1916 à Berlin à la Société allemande de Physique et qui sera publié en mars 1917. La correspondance qu'entretient Einstein avec son ami Besso fait apparaître que la question du rayonnement et de l'émission dirigée a été au centre de ses préoccupations pendant tout l'été 1916, et permet de suivre l'élaboration de ce qu'il appelle une nouvelle théorie quantique.

La théorie du rayonnement n'est cependant pas le seul domaine qu'abordera Einstein dans cette année 1916, au cours de laquelle il publiera une quinzaine d'articles. C'est l'année par exemple où il écrit un premier article de cosmologie, publié en 1917¹, acte de naissance de la cosmologie moderne. C'est également l'année où il rédige un premier texte de vulgarisation, ou du moins d'explicitation des fondements, de la théorie de la relativité. Au terme de cette année de grande ébullition intellectuelle, Einstein tombera malade - victime comme on dirait aujourd'hui d'un « burnout » - et le restera pendant toute l'année 1917 et une partie de 1918. De fait, Einstein ne s'est jamais complètement remis de cette période d'épuisement.

I. La construction d'une théorie de l'interaction matière/rayonnement

Ainsi donc, l'« invention » de la théorie quantique du rayonnement s'est faite en deux temps, correspondant l'un à l'article en hommage à Kleiner au début de l'été 1916, l'autre au travail présenté à l'automne de la même année à Berlin et publié en 1917.

Le modèle d'atome d'hydrogène élaboré par Bohr en 1913 imposait à Einstein de reprendre, sur de nouvelles bases, l'étude du rayonnement du corps noir à partir de laquelle il avait émis l'hypothèse « heuristique » de 1905 concernant la production et l'émission de lumière par quanta d'énergie bien définie. Il lui fallait désormais introduire dans le bilan de l'échange d'énergie entre matière et rayonnement, échange « à somme nulle », le fait nouveau constitué par ce que l'on appelle par abus de langage « la quantification de l'énergie de la matière », à savoir l'idée que cette énergie, elle-même somme des énergies des

(1) A. Einstein, Kosmologische Betrachtungen sur allgemeinen Relativität Theorie, *Preussische Akademie der Wissenschaft, Sitzungberichte*, 1917 (part. 2) 606-608.

constituants « atomiques » de la matière ne peut varier que par quanta d'énergie correspondant à l'écart entre deux niveaux d'énergie de chacune de ces « particules »².

Abandonnant (pour un temps) les interrogations qui le taraudaient depuis 1905 concernant la « réalité » des quanta de lumière, ainsi que la série d'arguments développés entre 1909 et 1913 visant à établir la double nature, ondulatoire et corpusculaire, du rayonnement, Einstein reprit donc l'étude de l'émission et l'absorption du rayonnement par la matière menée en 1905, à la lumière du résultat de Bohr, c'est-à-dire en faisant porter l'accent sur la matière elle-même. Résultat qui, de son point de vue, présentait un *intérêt épistémologique majeur*. Il permettait en effet d'effacer une de ces dissymétries dont on sait qu'Einstein fut toute sa vie un ardent pourfendeur ; en l'occurrence, il s'agit de la dissymétrie dans le traitement réservé en 1905 aux deux entités en interaction, la matière et la lumière : traitement quantique pour la lumière, dont l'énergie est quantifiée ; traitement classique, c'est-à-dire portant sur des valeurs moyennes, pour la matière.

Dans la mesure où le modèle de Bohr est relatif à *un* atome (et non à une collection d'atomes, ou « molécules »), son incorporation au raisonnement de 1905 imposait de remplacer le bilan énergétique de l'interaction matière/rayonnement qui dans l'article de 1905 portait sur des valeurs moyennes, par un bilan *détaillé*, portant sur les transitions d'un niveau d'énergie ϵ_m à un autre ϵ_n ($\epsilon_m < \epsilon_n$) d'une « molécule » isolée, émettant ce faisant un quantum de lumière de fréquence ν telle que $h\nu = \epsilon_n - \epsilon_m$. Le cadre ainsi posé, Einstein en vient à l'essentiel : « Introduisons, écrit-il³, quelques hypothèses sur les lois régissant cette transition ». « Hypothèse » est ici à prendre en un sens fort : il s'agit en effet d'imaginer, d'inventer à partir de presque rien, un mécanisme quantique plausible pour la production et l'absorption de rayonnement par des « molécules », dont on ne sait rien sinon que, comme dans le modèle d'atome de Bohr, leur énergie est quantifiée en niveaux $\epsilon_0 < \epsilon_1 \dots < \epsilon_m \dots < \epsilon_n \dots$ et qu'elles sont susceptibles de produire et d'absorber des quanta de lumière de fréquences déterminées par les écarts entre niveaux.

On peut penser que si le schéma alors inventé par lui : émission spontanée, absorption induite, émission induite - avait été aussi simple et « naturel » qu'il paraît aujourd'hui, il n'aurait pas fallu à Einstein tant de temps pour parvenir à lui donner une forme satisfaisante⁴.

Le choix de ces « hypothèses » était gouverné en aval par l'objectif que s'était fixé Einstein : retrouver la « formule de Planck » donnant la densité spectrale d'énergie du corps noir, dans l'hypothèse canonique (à l'équilibre caractérisé par la température fixe T), problème qui, a priori, n'admet pas qu'une seule solution. Einstein n'est donc pas vraisemblablement

(2) De fait, l'énergie qui est quantifiée, dans le modèle de Bohr, est celle de l'électron de l'atome d'hydrogène (supposé en orbite autour du proton) identifiée à « l'énergie de l'atome d'hydrogène ». Einstein, en 1916, étend la validité de cette définition au cas des « molécules » (sans plus de précision) constituant la matière, dont il suppose que l'énergie est elle aussi quantifiée, au même sens que l'est l'énergie de l'atome d'hydrogène.

(3) A. Einstein, « Zur Quantentheorie der Strahlung », *Physikalische Zeitschrift*, vol. XVIII, 1917. Traduit en français dans Albert Einstein, *Oeuvres choisies*, volume I, Quanta ; Paris, co-édition Seuil/CNRS, 1989.

(4) Rappelons que ce schéma introduit les « fameux » coefficients A et B contrôlant les probabilités de transition de la « molécule » entre ses deux niveaux d'énergie, lors de son interaction avec le rayonnement : coefficient A pour l'émission spontanée, B et B' pour l'absorption et l'émission induite. L'hypothèse d'équilibre thermique posée par Einstein détermine la valeur de ces coefficients, en amenant notamment $B = B'$.

« tombé du premier coup » sur le mélange d'absorption et d'émissions conduisant au « bon » résultat. Autant l'hypothèse heuristique des quanta de lumière allait de soi (c'était la plus simple de celles s'accordant avec la forme de la variation d'entropie lors d'un changement de volume du système), autant les hypothèses avancées en 1916 nécessitaient pour être inventées une bonne dose d'imagination ; pour imaginer, par exemple, un processus spontané d'émission, inattendu mais imposé par l'obligation d'établir un bilan énergétique équilibré (modulé par la loi de Boltzmann donnant la répartition statistique des états d'énergie de la « molécule » en fonction de la température⁵) ; une bonne dose d'imagination, mais aussi un certain flair dans le choix de ce qui dans la théorie classique devait être préservé lors du passage à une théorie quantique ; en l'occurrence le fait que sous l'effet d'un champ électromagnétique les « résonateurs de Planck »⁶ voient leur énergie augmenter ou diminuer selon la phase relative du résonateur et du champ inducteur, fait conduisant à l'idée d'absorption et d'émission induites au sein de la « molécule », induites par le rayonnement dans lequel elle se trouve immergée.

Etablissant alors, sur la base de ces hypothèses, un bilan détaillé (« détaillé » en ce sens que ce bilan vaut pour une molécule et qu'il concerne l'une des transitions possibles pour cette molécule, entre les états d'énergie ϵ_m et ϵ_n , à la température T fixant la répartition statistique de ces états d'énergie en régime canonique), Einstein retrouve très simplement l'expression de la densité spectrale de rayonnement, autrement dit la « loi du corps noir », ou « formule de Planck », conformément à l'objectif qu'il s'était fixé. « Une lumière m'est tombée sur la tête et j'ai trouvé une démonstration purement quantique » écrit-il à Besso, et il ajoute que cette démonstration est « verbluffend einfach », « bluffante »⁷ de simplicité.

2. Le passage du classique au quantique

Einstein décrit la démarche qui est la sienne en 1916 comme une fabrication d'hypothèses « obtenues par transfert (Übertragung) des relations (Verhältnisse) connues en théorie classique ... à celles encore inconnues de la théorie quantique ». On sait que la question de savoir comment « régler à chaque moment l'évolution des rapports d'une théorie quantique encore incertaine de ses fondements avec les théories classiques de la mécanique et de l'électrodynamique⁸ » a été au centre des préoccupations des premiers explorateurs de la théorie quantique, jusqu'à ce que Niels Bohr codifie ces rapports, en 1920, en énonçant un « principe de correspondance ». La solution adoptée par Einstein dès 1916 est à cet égard tout à fait singulière. Il s'agit en somme de prendre acte du fait que l'« oscillateur de Planck » n'est qu'un modèle, une construction intellectuelle forgée par la théorie classique

(5) Dans le raisonnement d'Einstein, la température T est imposée par l'équilibre thermique atteint dans la population de molécules. De nos jours c'est le rayonnement qui constitue le thermostat stabilisateur de la distribution (canonique) des niveaux d'énergie et qui impose donc sa température à la population des « molécules ». Comme l'exposera Jean Dalibard dans la suite de ce colloque, ce renversement est à la base des techniques de refroidissement d'atomes : on impose une basse température, ce qui permet de ralentir ces atomes et par conséquent de faire des observations impossibles à faire autrement.

(6) Dipôles mis en oscillation par l'effet du champ électromagnétique.

(7) Je ne résiste pas au plaisir de traduire *verbluffend* par « bluffant », au risque d'un faux-sens.

(8) C. Chevalley, Entrée « Principe de correspondance » du *Glossaire* ajouté à la réédition de l'ouvrage de N. Bohr, *Physique atomique et connaissance humaine*, Paris, Gallimard, coll. Folio/Essais, 1991, p 414 et suivantes.

pour rendre compte de certains effets physiques mais qui n'a pas d'existence réelle (à tout prendre, penser que la matière est constituée de « molécules » paraît plus conforme à la « réalité des choses » que se la représenter comme une collection d'« oscillateurs de Planck »). De ce fait, remplacer une construction théorique classique par une autre rendant les mêmes services⁹, mais relevant de prémisses théoriques différentes (en l'occurrence « quantiques ») paraît tout à fait justifié.

Cela revient cependant à construire la nouvelle théorie progressivement, morceau par morceau, en pièces détachées, chaque morceau de la théorie classique étant remplacé lorsque c'est possible par son équivalent quantique, obtenu par « transfert » du domaine classique au domaine quantique. Il ne s'agit pas, à proprement parler, d'une traduction (cela supposerait que l'on connaisse déjà en quoi consiste le « parler quantique », vocabulaire et syntaxe), mais bien d'un remplacement pierre par pierre de la théorie physique. Procéder ainsi ne se justifie que si la division en « morceaux » est la même en théorie quantique qu'en théorie classique. On se souvient ici de la distinction établie plus tard (en 1919¹⁰) par Einstein entre théories à principes (dont la théorie de la relativité est le plus bel exemple) et théories construites (parmi lesquelles il inclut alors la théorie quantique), conformément à sa propre expérience en tant que bâtisseur de la théorie quantique. Mais d'où Einstein tire-t-il une telle idée, sinon de sa propre expérience en tant que bâtisseur de la théorie quantique. A cet égard, la démarche adoptée à peu près à la même époque par Niels Bohr paraît plus ambitieuse dans la mesure où il s'était fixé comme objectif de « développer systématiquement les *principes* de la théorie quantique » avec le souci de réaliser « une cohérence interne¹¹ ».

Une dernière remarque s'impose à propos du style de travail d'Einstein durant cette seconde *annus mirabilis* ; celle-ci marque un changement de perspective radical dont nous n'avons plus guère conscience, tant la nouvelle perspective nous paraît aujourd'hui « aller de soi » : le rayonnement qui était jusqu'alors conçu indépendamment de la matière apparaît désormais comme un sous-produit de cette dernière. Le rayonnement en effet était l'objet même de la théorie électromagnétique de Maxwell, subissant divers avatars mais toujours au centre de la théorie. Il perd ce statut à partir de 1916. Certes, Einstein intitule son article de 1917 « Théorie quantique du rayonnement », mais en réalité c'est la matière qui en est le personnage principal. C'est elle qui – via la structure interne (intime, serait-on tenté de dire) des atomes (ou molécules) dont elle est constituée – façonne (au sens où l'on travaille quelque chose en vue de lui donner une « façon » particulière) le rayonnement. Autrement dit, alors que dans la théorie classique le lien entre matière et rayonnement était traité de manière métaphorique, la matière se comportant comme un ensemble imaginé de dipôles électriques indifférenciés qui parce qu'ils sont « oscillants », sont *ipso facto* rayonnants, dans la nouvelle théorie, le rayonnement porte la marque indélébile de la matière qui l'a produit : non seulement le rayonnement n'existe pas par lui-même, sans la matière, mais de plus, il fonctionne comme *révélateur de la structure interne* de la molécule.

(9) On serait tenté de dire dans ce contexte que les coefficients *A* et *B* d'absorption et d'émission introduits par Einstein en 1916 ont pour fonction de « mimer » le comportement de l'oscillateur de Planck classique.

(10) A. Einstein, « My theory », *Times* (London), 28/11/1919.

(11) N. Bohr, lettre à A. Sommerfeld, 30/04/1922 ; cité par C. Chevalley, *op. cit.* ; p. 422 (souligné par moi, FB.).

Le rayonnement émis ou absorbé est donc ce par quoi la matière se fait connaître, ou reconnaître. Un peu à la manière de Bernoulli (Johann) qui ayant reconnu la patte de Newton dans un article non signé par celui-ci, s'était exclamé « *tanquam ex ungue leonem* » (le lion se reconnaît à ses griffes) ; le rayonnement est ce que la molécule laisse filtrer de son intimité, exporte en dehors d'elle-même, sa marque en quelque sorte, que ce soit quand l'atome est isolé (émission spontanée) ou quand il baigne dans un rayonnement (émission induite et absorption). Peut-être faut-il voir là la raison pour laquelle Einstein établit une division en deux genres : *Ausstrahlung*, rayonnement sortant (*aus*) spontanément de l'atome, et *Einstrahlung*, rayonnement, émis et/ou absorbé, par l'atome du fait qu'il se trouve immergé (*ein*) dans un rayonnement inducteur. Pour lui, on l'a dit, le fait nouveau c'est l'émission spontanée, seul processus qui ne corresponde à rien en théorie classique, imposé par la nécessité d'équilibrer le bilan énergétique et qu'il s'empresse de comparer à un autre phénomène d'émission spontanée non classique, l'émission de rayonnement γ lors d'une désintégration radioactive. Aujourd'hui, du fait des applications technologiques liées à l'existence de l'émission induite, nous avons tendance à mettre l'accent sur ce processus plus que sur celui d'émission spontanée - ce qui conduit à privilégier la distinction émission/absorption par rapport à celle (spontanée/induite) suggérée par Einstein.

3. La symétrie matière/rayonnement

Mais là n'est pas aux yeux d'Einstein le résultat essentiel. Celui-ci ne lui apparaîtra comme tel qu'à la fin de l'été 1916 (et sera l'objet principal de l'exposé qu'il fera à Berlin à l'automne) ; le point fondamental est que les émissions de lumière, émission induite mais aussi émission spontanée, sont des *processus* (*Prozess* ou *Vorgang*) *orientés*, dirigés dans une direction unique. Cela apparaît lorsque l'on considère les processus non pas sous l'angle de l'émission ou de l'absorption du rayonnement en tant qu'objet théorique indépendant (conception maxwellienne) mais bien sous l'angle d'une interaction entre une molécule de matière et le rayonnement qu'elle produit ou absorbe. Interaction réglée, comme il se doit, par les lois de conservation - conservation de l'énergie, mais également de l'impulsion¹² de la molécule : « la question, écrit Einstein, est de savoir si la molécule, lorsqu'elle absorbe, ou émet, de l'énergie, ne subit pas une poussée ». Au terme de l'examen détaillé du mouvement d'une « molécule » dans un champ de rayonnement, Einstein aboutit à la conclusion suivante : « Il s'avère que l'on n'aboutit à une théorie libre de contradiction¹³ que si l'on conçoit les processus élémentaires comme totalement orientés¹⁴ ». Résultat fondamental, non prévu par la théorie classique, qui peut être interprété comme une confirmation du

(12) Ce qui n'avait pas été fait avant 1916, au motif que les impulsions transférées sont très faibles, donc négligeables devant les autres causes du mouvement. « Mais dans les arguments théoriques, il faut accorder à ces mêmes effets la même importance qu'aux effets plus visibles liés au transfert d'énergie ; et ceci, dans la mesure où énergie et impulsion sont étroitement liés » est la phrase par laquelle se termine l'article de 1917.

(13) « Théorie libre de contradiction », expression qu'affectionne Einstein. La capacité d'une théorie à résister à toutes les tentatives de mettre en évidence des contradictions - dans sa logique interne ou dans sa confrontation aux observations - ne fait-elle pas en effet de cette théorie une bonne candidate pour approcher la vérité ?

(14) A. Einstein, « Zur Quantentheorie der Strahlung », *op. cit.*

caractère « particulière¹⁵ » des quanta de lumière qui se trouvent ainsi caractérisés outre leur *énergie* $h\nu$, par leur *quantité de mouvement*, $h\nu/c$ (dans la direction du rayonnement). D'une certaine façon le photon, qui ne porte pas encore son nom, est né en 1916.

Le cas de l'émission spontanée est intéressant à un autre titre : alors que selon les règles de l'électrodynamique classique, on s'attendrait à une émission sous forme d'ondes sphériques (distribution symétrique), la « nouvelle » théorie quantique indique qu'il n'en est rien et que l'émission spontanée est elle aussi dirigée. « *Ausstrahlung in Kugelwellen gibt es nicht* »¹⁶ (l'apposition suivie de l'inversion *gibt es*, au lieu de *es gibt*, a une connotation emphatique), il n'y a pas d'émission spontanée de lumière sous forme d'ondes sphériques, écrit Einstein.

Ce ton emphatique s'explique par le fait que ce résultat apporte un élément de réponse à une question qu'Einstein s'était déjà posée en 1909. Dans la communication qu'il fit alors à la Conférence de Salzbourg réunissant les physiciens de langue allemande, portant sur l'évolution de nos conceptions (*Anschauungen*) sur la nature et la constitution du rayonnement, Einstein avait émis l'idée que la caractéristique fondamentale de la théorie ondulatoire, rendant problématique son insertion dans un raisonnement statistico-thermodynamique, est que « contrairement à ce qui se passe en théorie cinétique moléculaire, où à chaque processus élémentaire (par exemple à chaque collision moléculaire), correspond un processus inverse, en théorie ondulatoire, un ion oscillant engendre une onde sphérique se propageant vers l'extérieur, sans qu'existe un processus élémentaire inverse »¹⁷. Le fait que cette difficulté ne se présente pas dans la théorie quantique du rayonnement élaborée en 1916 - puisque la possibilité d'émission sous forme d'ondes sphériques en est exclue - ne pouvait que conforter Einstein dans son appréciation des insuffisances de la théorie classique ondulatoire.

Pourtant, Einstein n'était pas entièrement satisfait de son propre travail. L'émission spontanée qui donc ne se fait pas sous forme d'onde sphérique, mais bien dans une seule direction, n'est pas complètement décrite puisque cette direction n'est pas déterminée et reste aléatoire : « les instants et les directions des processus élémentaires [et singulièrement du processus d'émission spontanée] y sont laissés au hasard ». En sorte que la difficulté repérée en 1909 n'est pas vraiment résolue ; elle s'est plutôt déplacée. Ou encore comme le note Pauli, revenant trente ans après sur cet épisode, dans sa contribution au livre d'hommages présenté à Einstein à l'occasion de son soixante-dixième anniversaire : « l'incompatibilité entre les caractéristiques « interférentielles » du rayonnement (qui ne peuvent être décrites qu'en faisant intervenir le principe de superposition de la théorie ondulatoire) et les caractéristiques « échangeistes » (échange d'énergie et de quantité de mouvement) de l'interaction du rayonnement avec la matière (qui ne peuvent être décrites qu'à partir d'une image corpusculaire) restait entière et semblait à première vue insurmontable ».

(15) « La faiblesse de la théorie réside ... dans ce qu'elle ne nous rapproche guère d'une unification avec la théorie ondulatoire » conclut Einstein, visiblement toujours préoccupé par l'idée de dualité onde-corpuscule.

(16) A. Einstein, « Zur Quantentheorie der Strahlung » *op. cit.*

(17) Cf. A. Einstein, « On the development of our understanding of the nature and composition of radiation ». *Physikalische Zeitschrift*, vol. 10, N° 22, pgs 817... (1909) ; Einstein remarquait en effet, « A spherical wave propagating inward is indeed mathematically possible, but it needs a number of emitting elementary structures for its precise realization. »

Pauli n'avait pas tort. L'émission spontanée dirigée (et non isotrope), si elle apportait bien un élément nouveau à l'intelligibilité du processus de production du rayonnement, mettait en évidence la différence irréconciliable entre les conceptions ondulatoire et corpusculaire. Si l'on en croit Pauli, la situation allait être débloquée quelques années plus tard par de Broglie et sa théorie de la dualité. Il n'est pas sûr qu'Einstein ait partagé cette opinion, persuadé qu'il était que la difficulté soulevée n'était pas propre à la théorie classique du rayonnement, mais bien plutôt à toutes les théories du champ - et donc à sa propre théorie du champ de gravitation. Ainsi écrivait-il à Lorentz, le 17 juin 1916, comme pour ajouter un bémol au bilan glorieux de sa seconde année miraculeuse : « Je n'ai pas achevé la théorie du rayonnement des systèmes matériels. Une chose est claire : les difficultés des quanta concernent tout autant la nouvelle théorie de la gravitation que la théorie de Maxwell ». Nul doute que Serge Haroche, dans son intervention qui doit porter sur la dualité onde-corpuscule, nous en dira plus demain.