

Compter les photons avec S. N. Bose

*« Monsieur,
J'ai pris la liberté de vous envoyer l'article ci-joint pour votre lecture et
votre avis. Vous verrez que j'ai essayé de déduire le coefficient
dans la loi de Planck indépendamment de l'électrodynamique
classique. »*

En 1924, Satyendra Nath Bose, âgé de trente ans et maître de conférences en physique à l'Université de Dacca, envoya avec hésitation au célèbre Albert Einstein un article de quatre pages proposant une nouvelle manière de retrouver la formule de Max Planck pour le spectre du rayonnement émis par un objet chaud. Le résultat fut la découverte d'un principe fondamental des processus naturels, qui joua un rôle déterminant dans la suite du développement de la physique.

Le sujet du « rayonnement du corps noir », c'est-à-dire du rayonnement émis par un objet qui dégage facilement de la chaleur et absorbe également le rayonnement qui lui parvient, occupait les scientifiques depuis plus d'un quart de siècle. Le contexte était qu'à la fin du XIXe siècle, il avait commencé à sembler que la plupart des lois naturelles avaient été découvertes. Isaac Newton avait formulé avec élégance les lois du mouvement, et les trajectoires des corps célestes étaient comprises. Les règles suivies par les gaz lorsqu'ils étaient chauffés ou comprimés avaient été établies. La machine à vapeur et le moteur à essence avaient été inventés. L'électricité et le magnétisme étaient compris, et l'ampoule électrique, le téléphone et la télégraphie sans fil étaient devenus des réalités. Il semblait vraiment que la science était presque arrivée à son terme !

Puis vinrent des découvertes troublantes. La première fut la radioactivité, mise en évidence par Marie Curie. Il s'agissait d'un nouveau type de rayonnement émis par certains métaux et qui défiait toute explication. Puis vint le bouleversement quasi total provoqué par Albert Einstein. Einstein redéfinissait nos concepts mêmes du temps, de la mesure, voire de la simultanéité. J. J. Thomson et Ernest Rutherford montrèrent que l'atome lui-même était constitué de minuscules particules chargées négativement gravitant autour d'un noyau massif chargé positivement. La théorie existante ne pouvait expliquer comment une telle chose pouvait exister. Les deux parties n'allaient-elles pas s'attirer et se neutraliser mutuellement ? Si les électrons tournaient autour du noyau, comme un système solaire en miniature, la théorie en vigueur ne disait-elle pas qu'en tant que particules chargées, ils devaient rayonner de l'énergie et ralentir ?

La physique semblait complètement embrouillée !

Puis survint la percée, grâce à une réponse à l'ancien problème du « rayonnement du corps noir ». On savait que les objets chauds se refroidissaient en émettant un rayonnement électromagnétique. La lumière visible est une forme de rayonnement

électromagnétique. Le spectre de la lumière visible fait partie du spectre électromagnétique. Tandis que la lumière visible va du violet au rouge, il existe des « couleurs » au-delà du violet ou du rouge, mais elles ne sont pas visibles. La partie au-delà du violet est plus énergétique et s'appelle l'ultraviolet. Une lumière moins énergétique que le rouge est appelée infrarouge.

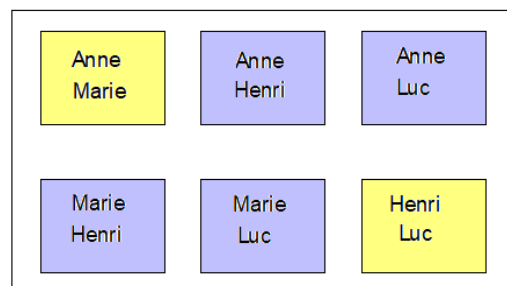
Le rayonnement des objets chauds se situe principalement dans l'infrarouge. Si l'objet est très chaud, il rayonne à des énergies plus élevées et devient « rougeoyant » ; lorsqu'il est encore plus chaud, il peut devenir « blanc incandescent ». La théorie expliquant ce phénomène affirmait que les objets contenaient tous des millions et des millions de minuscules oscillateurs élémentaires, en vibration continue, qui émettaient de l'énergie. Lorsque les objets devenaient plus chauds, les vibrations étaient plus énergétiques, tout comme le rayonnement. À mesure que l'objet chauffait, les vibrations devenaient plus rapides et la « couleur » correspondant au maximum du rayonnement se déplaçait vers le haut du spectre. En même temps que l'objet rayonnait de l'énergie, il absorbait aussi l'énergie émise par les objets environnants. En équilibre, si l'environnement était plus froid, l'objet perdait plus de chaleur qu'il n'en gagnait, et inversement.

L'étude de tels systèmes, composés d'un très grand nombre d'éléments et conduisant à un comportement global stable et « moyen », relevait des théories des gaz, un domaine qui s'était développé avec une certaine sophistication au cours du siècle précédent.

La méthode, brièvement, est la suivante. Supposons qu'il y ait deux hommes et deux femmes, tous les quatre les yeux bandés, dans une pièce. Si l'on demande à ces personnes de commencer à se serrer la main au hasard, il est facile de voir que les poignées de main les plus fréquentes auront lieu entre un homme et une femme. Cela s'explique par le fait que chaque homme a deux femmes avec qui serrer la main, mais un seul homme ; et de même, chaque femme, à son tour, a deux hommes.

On pourrait décrire la situation ainsi :

Supposons que les femmes soient Anne et Marie et les hommes Henri et Luc. Il existe six poignées de main possibles.



Nous pouvons constater qu'il y a quatre poignées de main homme-femme contre seulement deux rencontres entre personnes du même sexe !

Comme les hommes et les femmes dans une pièce, un récipient de gaz contient des milliards d'atomes, dont les énergies vont des plus faibles aux plus élevées. La seule condition est que l'énergie totale soit fixe, selon la température du gaz. Ainsi, si quelques atomes seulement possédaient des énergies extrêmement élevées, les autres devraient se partager le reste et seraient donc assez peu actifs. À l'inverse, si quelques-uns avaient des énergies très faibles, les autres devraient compenser et deviendraient alors très actifs. En examinant toutes les possibilités, on constate que la configuration où un grand nombre d'atomes possèdent presque la même énergie moyenne est de loin la plus fréquente. Un peu comme dans le cas d'une poignée de main entre un homme et une femme !

C'est pourquoi, pour un volume de gaz possédant une certaine énergie, le gaz se comporte de la même manière en tout point, et ne finit jamais avec tous les atomes rapides regroupés d'un côté du récipient, rendant cette partie plus chaude !

C'est ainsi qu'en supposant que les atomes ou les molécules d'un gaz pouvaient être identifiés individuellement, chacun comme Anne, Marie, Henri ou Luc, et leur énergie marquée comme homme ou femme, les méthodes mathématiques avaient permis d'établir des lois très satisfaisantes pour les gaz. Ces mêmes méthodes tentaient alors de comprendre comment les « oscillateurs » d'un objet chaud pouvaient rayonner de l'énergie.

Les scientifiques de l'époque considéraient donc qu'un objet possédait des oscillateurs à toutes les énergies possibles. À partir de là, connaissant l'énergie totale, ils calculaient à quel niveau d'énergie le plus grand nombre d'oscillateurs pouvait se regrouper, afin de déterminer à quelle fréquence l'objet rayonnerait le plus. Une première loi formulée fut la loi de Wilhelm Wien, et elle semblait s'accorder avec l'expérience, jusqu'à une certaine limite. Une loi plus satisfaisante fut celle de Lord Rayleigh, puis la loi de Rayleigh-Jeans. Mais ces lois ne fonctionnaient que pour une partie du spectre du rayonnement, et non sur l'ensemble.

C'est alors que le célèbre Max Planck eut l'intuition que, si l'on admettait que les oscillateurs ne pouvaient pas occuper tous les niveaux d'énergie, mais seulement des niveaux très proches les uns des autres, séparés par des « marches » appelées « quanta », alors les équations devenaient cohérentes. Voilà, Planck avait résolu le problème du rayonnement du corps noir et, ce faisant, mis au jour la théorie quantique.

L'idée révolutionnaire selon laquelle la nature n'évoluait pas de manière continue, mais par étapes, enflamma la physique. Niels Bohr s'empara aussitôt de l'idée et proposa son modèle de l'atome, tandis qu'Albert Einstein suggérait que le rayonnement électromagnétique n'était pas une onde pure, mais des paquets d'énergie. Ces paquets eux-mêmes, plus tard appelés photons, furent bientôt détectés, et la physique était en train d'être réécrite.

C'est à ce moment que le physicien indien, le professeur Satyendra Nath Bose, rédigea cette lettre inspirée au célèbre Albert Einstein.

Satyendra Nath Bose naquit en 1894 à Kolkata, aîné des sept enfants de Surendranath Bose, ingénieur aux chemins de fer de l'Inde orientale. Le jeune Satyendra Nath fut un élève brillant et assidu, impressionnant ses professeurs par son intelligence et son application. Il poursuivit ses études au Presidency College de Kolkata, où il eut pour enseignant le talentueux Jagadish Chandra Bose, et comme camarades un groupe dynamique comprenant Meghnad Saha. Après avoir obtenu sa maîtrise en 1915, lui-même et quelques autres, animés à la fois par un esprit civique et par le nationalisme, militèrent pour l'ouverture d'un centre d'études avancées en physique et en mathématiques à l'Université de Kolkata. En 1916, cet effort aboutit, et S. N. Bose y travailla comme maître de conférences en physique pendant les cinq années suivantes.

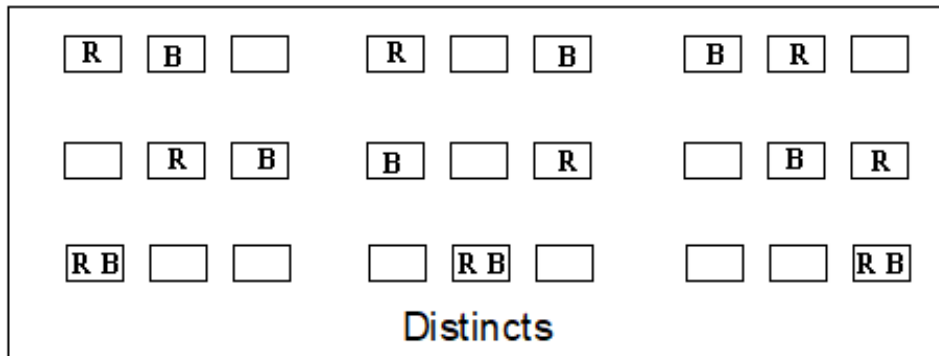
En 1921, il fut nommé lecteur en physique à l'Université de Dacca, qui faisait alors partie de la province du Bengale, en Inde. À Dacca, Bose poursuivit ses travaux en physique tout en entreprenant de nombreuses initiatives pour faciliter l'étude de la physique par les étudiants indiens. L'une d'elles consistait à traduire en anglais les ouvrages et articles de recherche les plus récents, qui paraissaient autrement en français ou en allemand. C'est dans ce cadre que Bose traduisit les articles d'Einstein sur la théorie générale de la relativité. Les droits de traduction avaient en réalité été accordés à Methuen, qui protesta. Mais Einstein lui-même donna son accord, et la traduction fut autorisée à paraître.

En physique, Bose se tenait au courant des avancées mondiales, en particulier dans le domaine passionnant du « rayonnement du corps noir ». Comme nous l'avons vu, Planck avait étudié les objets chauds comme une collection d'« oscillateurs » et était parvenu à une expression exacte du spectre du rayonnement en proposant que les niveaux d'énergie de ces oscillateurs fussent « quantifiés ». Einstein n'était pas tout à fait satisfait de cette approche et introduisit un raffinement en affirmant que le rayonnement lui-même consistait en « quanta » d'énergie : les photons. Einstein considérait le rayonnement à l'intérieur d'une cavité comme un « gaz de photons à basse pression » et, à l'aide de la loi de Wien, parvenait à retrouver la même expression du spectre énergétique.

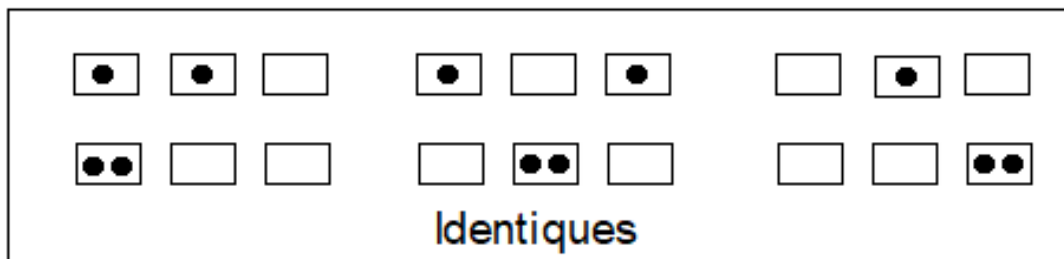
Bose avait étudié tout cela et estimait pourtant que même ce qu'Einstein avait accompli demeurait un peu artificiel, car cela dépendait de la loi de Wien et ne découlait pas naturellement d'un simple gaz de photons. Il imagina donc une nouvelle manière d'obtenir la formule de Planck, sans autre hypothèse que celle de photons de différentes énergies se distribuant dans une cavité à une température donnée.

Einstein, en réalité, avait utilisé des méthodes statistiques similaires à celles employées pour établir les lois des gaz, traitant les photons dans la cavité de la même

manière que les molécules d'un gaz dans un récipient. Une hypothèse implicite était que chaque molécule pouvait, en principe, être identifiée. Un peu comme Anne, Marie, Henri et Luc dans l'exemple évoqué plus tôt. Bose, lui, considérait les photons de son gaz comme « identiques » ou « indiscernables ». C'est-à-dire que les photons ne peuvent être identifiés par des noms ou des marqueurs ; on ne peut tout simplement pas les distinguer. Cela changeait immédiatement et profondément la manière dont les distributions se calculaient. Prenons l'exemple d'une balle rouge et d'une balle bleue réparties dans trois compartiments. Cela est possible de neuf façons, comme suit.



Mais si les deux balles étaient de la même couleur, alors l'ensemble des première et troisième distributions ci-dessus, ainsi que les quatrième et sixième, deviendraient identiques. Dès lors, seules six distributions seraient possibles, comme suit :



Ce que faisait Bose consistait à déterminer le nombre de tous les états d'énergie possibles dans le récipient contenant le gaz de photons, un peu comme les compartiments de l'exemple, puis à examiner de combien de façons les photons, comme les balles de l'exemple, pouvaient se répartir entre ces états d'énergie. Nous voyons ainsi que le fait de reconnaître que les photons étaient identiques était crucial.

Un autre point pris en compte par Bose était que le nombre de photons, contrairement au nombre de balles, n'était pas fixe. Les photons pouvaient apparaître librement, à la seule condition que l'énergie totale de l'ensemble des photons demeure constante. Ainsi, avec ces deux conditions, et un autre détail selon lequel chaque photon pouvait exister sous une forme « gauchère » ou « droitère », tous ces éléments étant fondés sur des faits et non sur des hypothèses, Bose calcula la distribution d'énergie la plus probable et retrouva la même loi de Planck.

Ce résultat était capital : outre le fait qu'il existait des paquets ou particules d'énergie — les photons, ces photons se comportaient comme des entités identiques et indiscernables.

Il ne semble pas que Bose ait anticipé les conséquences considérables de l'éclair d'intuition contenu dans cet article qu'il avait transmis à Einstein, ce 4 juin 1924. Le *Philosophical Magazine* l'avait déjà refusé pour publication, et Bose espérait désormais qu'Einstein reconnaîtrait la valeur de ce travail et accepterait de le faire publier dans une revue allemande, ne serait-ce qu'en considération du fait que l'auteur avait traduit certains travaux du maître en anglais.

C'est tout à l'honneur du grand Albert Einstein d'avoir lu attentivement cet article venu d'un scientifique alors peu connu en Inde, et d'avoir immédiatement perçu l'importance majeure de ce que Bose avançait. Il traduisit lui-même l'article en allemand et le fit publier dans *Zeitschrift für Physik*, en y ajoutant son propre commentaire sur l'importance du texte. Quelques semaines plus tard, Einstein rédigea un prolongement de l'article de Bose et poursuivit avec des travaux majeurs directement inspirés par celui-ci.

Cet article déclencha une vague de recherches à travers le monde. L'idée du quantum avait à peine commencé à s'enraciner dans l'univers de la physique. Il s'agissait d'un raffinement de notre manière de penser, qui ne devenait significatif qu'à des dimensions extrêmement petites. Mais cette différence à très petite échelle est essentielle pour une compréhension correcte à plus grande échelle, et une grande partie du monde moderne — les transistors, les lasers, l'énergie nucléaire, pour ne citer que quelques exemples — découle de cette compréhension des effets quantiques.

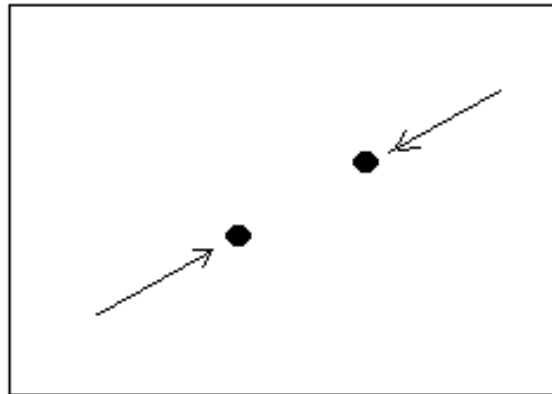
Dans la vie quotidienne, nous ne constatons pas, par exemple, d'augmentation « par paliers » de la vitesse d'une automobile. La raison en est que les « marches » sont beaucoup trop rapprochées pour être perçues. Mais lorsque nous traitons des phénomènes à l'échelle atomique, les masses sont si faibles que les quanta représentent une part importante de l'énergie totale. Le comportement de la nature à la limite du très petit est donc très différent de l'expérience ordinaire. À mesure que les dimensions augmentent, ces effets quantiques deviennent moins significatifs et les règles tendent à rejoindre les lois de la physique classique.

L'une des caractéristiques du monde à l'échelle atomique est qu'il n'est pas possible de déterminer exactement la position d'un objet : plus l'objet est petit, plus l'incertitude sur sa position est grande. Lorsque nous avons affaire à de grandes entités, comme des billes de billard qui se heurtent, nous pouvons clairement distinguer une bille d'une autre. Ce modèle « bille de billard » des gaz, avec les anciennes statistiques où les molécules d'un gaz étaient considérées comme distinguables, s'est révélé efficace

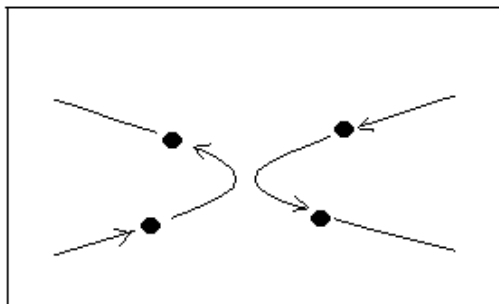
pour établir les lois des gaz, parce que les molécules restent encore suffisamment grandes pour être distinguées, en principe.

Mais lorsque nous pénétrons dans le monde des particules subatomiques, ou des photons, le flou entourant la position des particules empêche de savoir quelle particule est laquelle après une collision. En voici un exemple :

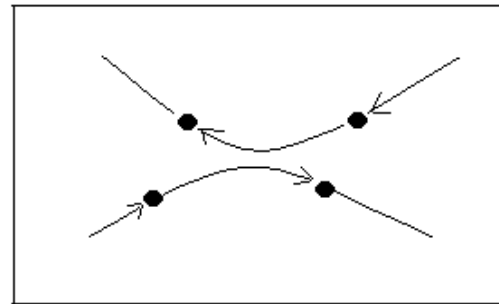
Supposons que deux billes s'approchent l'une de l'autre de façon à entrer en collision et à rebondir.



Elles peuvent rebondir de l'une ou l'autre des deux façons suivantes

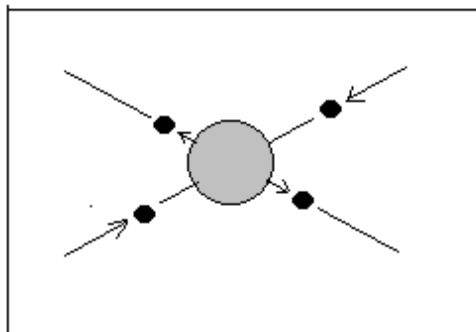


OU



Et, en principe, nous pourrions déterminer quelle bille est laquelle après la collision.

Mais si nous avons affaire à des particules subatomiques, leurs positions seraient floues au moment de l'impact.



Et l'identité des particules, après l'impact, serait perdue.

Cette incertitude de position était un aspect du comportement quantique qu'il fallut encore plusieurs années aux scientifiques pour comprendre pleinement. Nous voyons qu'une fois cette propriété reconnue pour les très petites particules, il en découle qu'elles doivent être traitées comme indiscernables. La grande portée de la découverte de Bose réside dans le fait qu'il avait anticipé le développement de la mécanique quantique en comprenant que les particules à très petite échelle obéiraient à la statistique des particules indiscernables. En établissant ainsi cette propriété fondamentale de la nature, il ouvrit la voie à des découvertes majeures et en accéléra le développement.

Le développement des idées de Bose, d'abord par Albert Einstein lui-même, puis par bien d'autres, posa les fondements de tout un domaine appelé la statistique quantique, pierre angulaire de la physique moderne. Bose, puis Einstein, avaient travaillé sur une catégorie des particules fondamentales, et les règles qui les gouvernent sont aujourd'hui connues sous le nom de statistique de Bose-Einstein. Et en l'honneur de l'homme qui a identifié cette catégorie, les particules fondamentales qui s'y rattachent sont appelées bosons.

Certaines propriétés remarquables purent être prédites pour ces particules ; l'une d'elles étant qu'à basse énergie, elles tendent toutes à occuper le même état énergétique. De la même manière que les molécules de vapeur, lorsqu'elles se refroidissent, se condensent pour former de l'eau, Einstein affirma que les bosons, lorsqu'ils sont amenés à de faibles énergies, se condensent eux aussi dans cet état où ils cherchent tous à partager le même niveau d'énergie. Une conséquence en est la possibilité de la superfluidité, c'est-à-dire l'écoulement d'une substance sans frottement, car les particules voisines tendent à suivre, plutôt qu'à contrarier, une particule en mouvement.

Cela fut observé quelques années plus tard, lorsque l'hélium, dont l'atome est un boson, put être refroidi à une température suffisamment basse.

Ainsi, S. N. Bose entra parmi les grandes figures incontestées de la physique et fut honoré par plusieurs universités de doctorats et de distinctions académiques. Il fut chef du département de physique à Dacca à partir de 1926, pendant près de vingt-cinq ans. La partition de l'Inde fut pour lui un choc, car l'ensemble du Bengale constituait sa patrie. En 1945, il fut nommé professeur Khaira de physique à l'Université de Kolkata, poste qu'il occupa jusqu'en 1956. En 1958, il fut élu membre de la Royal Society.

Comme beaucoup d'esprits exceptionnellement doués, S. N. Bose avait des intérêts variés. Ses travaux scientifiques couvraient des domaines aussi éloignés que la géologie et la biochimie. Il était un enseignant remarquable et profondément dévoué à ses étudiants. Les langues lui venaient naturellement, et il nourrissait de solides intérêts littéraires. Il œuvra même à l'introduction de l'enseignement de la physique aux

étudiants de troisième cycle en bengali. Il siégea comme membre de la Rajya Sabha et joua un rôle dans l'élaboration de la politique scientifique du pays.

Il mourut à Kolkata, en 1974, à l'âge de quatre-vingts ans. Son nom demeure aujourd'hui au cœur de la physique moderne, dans ces bosons et ces statistiques quantiques qui continuent d'éclairer notre compréhension de l'univers.
