

## Einstein et la physique du vingtième siècle

Thibault Damour

Membre de l'Académie des sciences

Le 20 février 2005

Les travaux en physique théorique d'Albert Einstein ont eu un impact majeur sur la physique du vingtième siècle, et représentent un des plus hauts accomplissements de la pensée humaine. Einstein a joué un rôle central dans la création des trois théories physiques fondamentales qui ont vu le jour au vingtième siècle : Relativité Restreinte, Relativité Générale et Théorie Quantique. En outre, ses travaux en Physique Statistique ont apporté des contributions séminales au développement de cette discipline.

Les contributions les plus novatrices d'Einstein à la *Physique Statistique* concernent les phénomènes de *fluctuations thermodynamiques*. Alors que les fondateurs de la physique statistique (Maxwell et Boltzmann) insistaient sur le fait que le très grand nombre d'atomes constituant un système macroscopique garantissait, via la « loi des grands nombres », l'apparition de lois statistiques moyennes simples, Einstein fut le premier à comprendre tout l'intérêt physique des écarts au comportement thermodynamique moyen, c'est-à-dire des fluctuations du système autour de son état d'équilibre. Einstein découvrit ainsi les premiers exemples du théorème général appelé aujourd'hui *fluctuation-dissipation*. Ce théorème relie les fluctuations thermodynamiques d'une observable au coefficient qui mesure la réponse de cette observable à une sollicitation extérieure. Par exemple, dans un travail publié en 1904, Einstein montra que la variance (fluctuation quadratique moyenne), autour de sa moyenne, de l'énergie  $E$  d'un système était égale au produit  $kT^2C$ , où  $k$  dénote la constante de Boltzmann,  $T$  la température thermodynamique, et  $C$  la capacité calorifique du système. Notons que  $C = dE/dT$  mesure la réponse (à l'équilibre) de l'observable dont on considère les fluctuations (ici l'énergie) à une augmentation de température. Dans un travail de 1910 sur l'opalescence critique, Einstein montra que la variance de la densité  $\rho$  de particules d'un fluide présentes dans un volume  $V$  était égale au produit  $kT \rho^2 \kappa/V$  où la compressibilité  $\kappa = (d\rho/dp)/\rho$  mesure la réponse (à l'équilibre) de la densité  $\rho$  à une augmentation de pression  $p$ . Dans tous les cas, la fluctuation quadratique de l'observable considérée est proportionnelle à la constante de Boltzmann  $k = R/N$ , où  $R$  est la constante des gaz parfaits et  $N$  le nombre d'Avogadro. La mesure, directe ou indirecte, de ces fluctuations thermodynamiques permet donc de déterminer le nombre d'Avogadro, ce qui était le but principal des travaux d'Einstein en physique statistique.

Les travaux d'Einstein, ayant trait aux fluctuations thermodynamiques, qui ont eu le plus de répercussions immédiates concernaient le *mouvement brownien*, c'est-à-dire le mouvement erratique de particules légères, comme des grains de pollen, en suspension dans un liquide. En 1905, Einstein comprit que ce phénomène pouvait être étudié avec précision au moyen d'un microscope, et il en donna l'une des lois essentielles : la fluctuation quadratique de la position de la particule augmente proportionnellement au temps,  $\langle x^2 \rangle = 2Dt$ , avec un « coefficient de diffusion »  $D$  qui est relié au coefficient de frottement  $f$  de la particule dans le fluide par la relation  $D = kT/f$ . Cette relation est encore un exemple de théorème fluctuation-dissipation, le coefficient  $1/f$  mesurant la réponse (vitesse limite) du mouvement de la particule quand elle est soumise à une force extérieure constante, unité. Les travaux d'Einstein sur le mouvement brownien eurent un grand impact, notamment en France où ils furent prolongés théoriquement par Paul Langevin (1908), et expérimentalement par Jean Perrin (1907-1911). Jean Perrin reçut le prix Nobel de physique en 1926 pour « ses travaux

concernant la structure discontinue de la matière » qui réalisaient le but des recherches en physique statistique d'Einstein : « trouver des faits qui prouvent avec la plus grande certitude possible l'existence d'atomes ayant une taille finie bien déterminée ». Le mouvement brownien est aujourd'hui un des outils essentiels de la physique statistique, ayant de nombreuses applications dans des systèmes physiques très divers (allant des polymères à la théorie quantique des champs), et suscitant d'importants travaux mathématiques.

En juin 1905, Einstein a créé la théorie de la *Relativité Restreinte* en accomplissant un « pas » conceptuel majeur. Ce « pas » consistait à remettre en cause les présupposés sur les notions de *Temps* et d'*Espace* qui régnaient en maître sur la physique depuis la publication des *Principia* de Newton. Avant Einstein, le cadre cinématique fondamental posé *a priori* pour le déploiement de la réalité physique était constitué de deux catégories entièrement séparées : (i) le Temps absolu newtonien, commun à l'ensemble de la réalité, et (ii) l'Espace absolu newtonien, généralement identifié à l'*éther*, c'est-à-dire au « milieu de propagation » de la lumière et des ondes électromagnétiques. Dans son article de juin 1905, Einstein bouleverse ce cadre cinématique en prenant comme point de départ deux postulats fondamentaux : (i) le *principe de relativité* (les lois d'évolution des systèmes physiques sont les mêmes dans tous les référentiels d'inertie), et (ii) le *principe de constance de la vitesse de la lumière* (la lumière se propage, dans le vide, à la vitesse  $c$ , indépendamment de la vitesse de sa source, et de sa direction de propagation). Il montre que ces postulats deviennent compatibles si l'on abandonne les présupposés cinématiques habituels selon lesquels une horloge en mouvement mesure le même temps (« absolu ») qu'une horloge de même fabrication « au repos », et une règle en mouvement a la même longueur qu'une règle de même fabrication « au repos ». Einstein pose, à la place, une nouvelle cinématique des mesures de longueur et de durée dans laquelle une horloge en mouvement *semble*, quand on la compare à une horloge au repos, battre plus lentement (« dilatation du temps »), alors qu'une règle en mouvement longitudinal *semble*, quand on la compare à une règle au repos, être plus courte (« contraction des longueurs »). La « contraction des longueurs » avait, avant Einstein, été considérée par George Fitzgerald et Hendrik Lorentz. Cependant, ils la considéraient comme un effet « réel » de contraction dans l'« espace absolu », alors que pour Einstein il s'agit d'un *effet de perspective spatio-temporelle*. Einstein fut le premier à penser et prédire (dès juin 1905) que l'autre effet notable de perspective spatio-temporelle, usuellement appelé « dilatation du temps », impliquait une conséquence observable nouvelle : si deux horloges de même fabrication se trouvent initialement ( $t = 0$ ) au même point  $A$  d'un référentiel d'inertie, et que l'on déplace l'une d'entre elles, à vitesse finie  $v$  (constante en module), le long d'une courbe fermée jusqu'à ce qu'elle revienne au point  $A$ , l'horloge « voyageuse » marquera un temps plus court d'un facteur  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  que le temps marqué par l'horloge « sédentaire ». Ce « paradoxe des jumeaux » (qui fut vérifié, à partir de la fin des années 1930, dans de nombreuses expériences) illustre le remplacement de la notion newtonienne d'un temps unique absolu, rythmant le devenir universel, par la notion einsteinienne d'une multiplicité de temps individuels désynchronisés, chaque horloge, ou observateur, vivant son *temps propre*. Cette révolution conceptuelle est, d'un point de vue physique, la caractéristique la plus remarquable de la théorie de la Relativité Restreinte. Elle distingue l'apport d'Einstein des contributions antérieures ou simultanées de Lorentz (1904) et Henri Poincaré (1905) qui aboutissaient essentiellement aux mêmes équations qu'Einstein, mais qui les pensaient dans le cadre newtonien habituel, sans en déduire de conséquences observables pour le temps marqué par des horloges en mouvement relatif.

Notons aussi que l'approche einsteinienne consistant à postuler *a priori* un *principe cinématique de symétrie* des lois de la physique (ici le principe de relativité) pour en déduire des contraintes sur la *dynamique* (ici, par exemple, la dynamique relativiste) s'est révélée être

très fructueuse pour le développement de la physique fondamentale au 20<sup>ème</sup> siècle. L'un des premiers exemples de ce caractère fructueux fut la déduction à partir du principe de relativité, par Einstein en septembre 1905, de la relation générale entre énergie et masse :  $E = mc^2$ . Cette relation bouleversait d'autres présupposés qui régnaient en maître sur la physique pré-einsteinienne : à savoir une séparation stricte entre les catégories de *Matière* et de *Force* (ou de *Champ*). La relation  $E = mc^2$  inaugure une ère nouvelle où la matière perd sa pérennité et peut se désintégrer en rayonnement (et réciproquement). Parmi les nombreuses déductions fructueuses issues de la théorie de la Relativité Restreinte, citons : la dynamique relativiste classique des particules, l'association par Louis de Broglie (1923) d'une fréquence spatiale à une impulsion (en complétant la relation  $E = hf$  de Planck-Einstein), la théorie relativiste quantique des particules de spin 1/2 par Dirac (1928), la prédiction de l'anti-matière par le même Dirac, la relation entre spin et statistique, etc.

A partir de 1907, Einstein sentit la nécessité de généraliser le cadre cinématique de la théorie de la Relativité Restreinte pour tenir compte des effets de la gravitation. Après un long chemin de pensée, il aboutit, en novembre 1915, à la construction de la théorie de la Relativité Générale. Cette théorie bouleverse un autre présupposé séculaire de la physique : la séparation entre le cadre cinématique posé *a priori* pour penser la réalité physique (le *Contenant*), et les structures décrivant la constitution et la dynamique de cette réalité (le *Contenu* de la réalité). Avant 1905, le cadre cinématique, ou, Contenant, était constitué de deux catégories séparées, l'Espace et le Temps, alors que la réalité physique, ou Contenu, était décrite par les catégories séparées de Matière et de Champ (ou, anciennement, de Force). Le mathématicien Hermann Minkowski, reprenant des résultats de Henri Poincaré, avait montré en 1908 que la façon la plus compacte de décrire le nouveau cadre cinématique défini par la théorie de la Relativité Restreinte était d'introduire un *Espace-Temps* quadridimensionnel muni d'une *chrono-géométrie* consistant à définir la notion invariante d'*intervalle* entre deux points d'espace-temps. Rappelons qu'un point d'espace-temps est un *événement*, c'est-à-dire l'idéalisation de ce qui se passe en un point particulier de l'espace, à un moment particulier du temps. Un événement est repéré par quatre coordonnées  $x, y, z, t$ , où  $(x, y, z)$  sont les trois coordonnées spatiales du point « où se passe » l'événement en question, et où  $t$  repère l'instant « quand se passe » cet événement. Un autre événement sera repéré (dans le même référentiel d'inertie) par quatre autres coordonnées, disons  $x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z, t + \Delta t$ . L'intervalle carré  $S^2$  entre ces deux événements est alors donné par la généralisation suivante du théorème de Pythagore :  $S^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - c^2(\Delta t)^2$ , où  $c$  désigne, comme ci-dessus, la vitesse de la lumière (dans le vide). L'*espace-temps* quadridimensionnel de Poincaré-Minkowski défini par la *structure chrono-géométrique* associée à l'intervalle carré  $S^2$  entre deux points représente donc le *Contenant* de la Relativité Restreinte. Le *Contenu* de cette théorie était décrit, après la découverte par Einstein de la relation  $E = mc^2$ , d'une sorte d'union spatio-temporelle de la Matière et de la Force (ou du Champ) résumant ce qui se conserve à travers les transformations où la masse peut se transformer en rayonnement énergétique ou l'inverse. Des développements en théorie de la Relativité Restreinte montrent que la description la plus complète de « ce qui se conserve » dans les transformations dynamiques affectant le Contenu Matière-Champ de la réalité est donnée par un objet appelé tenseur d'énergie-impulsion  $T$ . Cet objet est réparti dans l'espace-temps (il est non nul partout où règne un champ ou bien où de la matière est présente) et possède dix composantes indépendantes : une de ces composantes mesure la densité volumique d'énergie, trois autres mesurent la densité d'impulsion (ou le flux d'énergie), et les six autres mesurent la présence de tensions ou de pressions. En théorie de la Relativité Restreinte le *contenu*  $T$  n'a aucune influence sur le *contenant* espace-temps, dont la chrono-géométrie est donnée *a priori*, de façon absolue, par la définition rappelée ci-dessus de l'intervalle carré  $S^2$ . La théorie de la Relativité Générale d'Einstein consiste essentiellement à dire que le contenu  $T$  de la réalité *déforme* son

contenant, c'est-à-dire la structure chrono-géométrique de l'espace-temps. En outre, Einstein montra que le champ chrono-géométrique  $\mathbf{g}$  décrivant un espace-temps déformé décrit également le champ gravitationnel relativiste. Cette théorie est résumée dans un système de dix équations, écrites par Einstein en novembre 1915, de la forme  $\mathbf{D}(\mathbf{g}) = \kappa \mathbf{T}$  où  $\mathbf{g}$  décrit la chrono-géométrie d'un espace-temps « courbe » général,  $\mathbf{D}(\mathbf{g})$  mesure (de façon partielle) la *déformation* de la chrono-géométrie  $\mathbf{g}$  par rapport à la chrono-géométrie « plate » de Poincaré-Minkowski, et où le coefficient  $\kappa$  vaut  $8\pi/c^4$  fois la constante newtonienne de la gravitation  $G$ . Indiquons brièvement le sens des objets  $\mathbf{g}$  et  $\mathbf{D}(\mathbf{g})$ . Un espace-temps « courbe » est un continuum quadridimensionnel, dont chaque point est repéré par quatre coordonnées  $x^0, x^1, x^2, x^3$ , et où l'intervalle carré infinitésimal  $ds^2$  entre deux points infiniment voisins  $x^\mu$  et  $x^\mu + dx^\mu$  (où l'indice  $\mu$  prend les quatre valeurs 0, 1, 2, 3) est donné par une combinaison générale des carrés et double-produits des différences  $dx^\mu$  de coordonnées, avec des coefficients  $g_{\mu\nu}$  (symétriques en  $\mu$  et  $\nu$ ) dépendant du point  $x^\mu$  considéré. On écrit  $ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu$  où l'on sous-entend que l'on doit sommer indépendamment sur les deux indices répétés  $\mu$  et  $\nu$  (de sorte que  $ds^2$  est une somme de dix termes indépendants du type  $ds^2 = g_{00}(dx^0)^2 + 2g_{01} dx^0 dx^1 + \dots$ ). Le cas simple de la chrono-géométrie « plate » est celui où il est possible de choisir les coordonnées  $x^\mu$  de sorte que les quatre coefficients diagonaux prennent les valeurs simples  $-g_{00} = g_{11} = g_{22} = g_{33} = 1$ , et que les six coefficients non-diagonaux soient nuls. L'objet  $\mathbf{D}(\mathbf{g})$  est, comme  $\mathbf{g} = g_{\mu\nu}$ , un objet à dix composantes indépendantes. Il est appelé *tenseur d'Einstein* et il est linéaire en les dérivées partielles secondes des  $\mathbf{g}$ , et quadratique en ses dérivées premières. A part cela il est défini de sorte à satisfaire certaines contraintes physiques ou mathématiques : (i)  $\mathbf{D}(\mathbf{g})$  mesure (de façon partielle) la *courbure* de la chrono-géométrie  $\mathbf{g}$ , c'est-à-dire que  $\mathbf{D}(\mathbf{g})$  est nul quand la chrono-géométrie  $\mathbf{g}$  est « plate », et génériquement non-nul quand  $\mathbf{g}$  prend des valeurs génériques, (ii) les équations d'Einstein  $\mathbf{D}(\mathbf{g}) = \kappa \mathbf{T}$  satisfont au « principe de relativité générale » (indifférence du choix de système de coordonnées), et (iii) les équations d'Einstein sont compatibles (dans la limite des courbures faibles) avec la loi générale de conservation de l'énergie et de l'impulsion.

D'une façon intuitive, on peut considérer que les équations d'Einstein  $\mathbf{D}(\mathbf{g}) = \kappa \mathbf{T}$  définissent la loi fondamentale de l'*élasticité de l'espace-temps*, et on peut les rapprocher de la loi générale de l'élasticité de Hooke qui s'écrit  $D = \kappa T$ , où  $D$  est la *déformation* d'une structure élastique soumise à une *tension*  $T$ , et où  $\kappa$  est le coefficient d'élasticité. Dans le cas de l'espace-temps la « tension », c'est-à-dire la source de la déformation est le tenseur d'énergie-impulsion  $T$  (densité d'énergie, d'impulsion et de tensions), et la « déformation » est la courbure d'Einstein  $\mathbf{D}(\mathbf{g})$ . La très petite valeur numérique (dans les unités habituelles) du coefficient d'élasticité de l'espace-temps  $\kappa = 8\pi G/c^4 \cong 2,077 \times 10^{-48} \text{ s}^2 \text{ cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$  explique pourquoi l'humanité a pu supposer à bon droit pendant des millénaires que l'espace était plat (c'est-à-dire euclidien) et le temps absolu (c'est-à-dire non influencé par la présence de masse-énergie). Cependant, un grand nombre de tests expérimentaux ont vérifié en détail, et avec précision, la validité des équations d'Einstein. Par exemple, en 2003 la mesure du rapport  $1 + y = f/f_0$  entre la fréquence  $f_0$  d'ondes radio envoyées depuis la Terre vers la sonde spatiale Cassini et la fréquence  $f$  d'ondes radios cohérentes renvoyées (avec la même fréquence locale) par Cassini vers la Terre et comparées (sur Terre) à la fréquence d'émission  $f_0$  a permis de vérifier la déformation einsteinienne de la chrono-géométrie de l'espace-temps au voisinage du Soleil avec une précision relative de l'ordre de  $10^{-5}$ . Dans ce cas l'effet maximal prédit pour  $y$  par la Relativité Générale était seulement de l'ordre de  $2 \times 10^{-10}$ . Cette faible valeur est due au fait que la densité d'énergie et de tensions dans le Soleil ne cause qu'une infime déformation de la chrono-géométrie de l'espace-temps  $\mathbf{g}$ . D'autres tests expérimentaux utilisant les données de chronométrage de systèmes binaires contenant des

pulsars ont pu vérifier avec une précision de l'ordre de  $10^{-3}$  la validité des équations d'Einstein dans un cas où le système contient des régions (au voisinage du pulsar et de son compagnon) où la déformation de la chrono-géométrie est importante (au sens où le tenseur  $g$  diffère d'environ 40% de la valeur qu'il prend dans l'espace-temps plat). La précision des technologies modernes est telle qu'il faut désormais tenir compte de la déformation einsteinienne de la chrono-géométrie de l'espace-temps pour décrire et/ou utiliser un grand nombre de phénomènes : poursuite laser de satellites artificiels, tirs laser sur la Lune, interférométrie à très longue base, définition du temps atomique international, systèmes de positionnement global par satellites (GPS), etc.

Au-delà des conséquences observables de la Relativité Générale, insistons encore sur la nouveauté conceptuelle majeure de cette théorie. Désormais, le contenant espace-temps de la réalité ne peut plus être donné *a priori*, ni être muni d'une structure absolue, indépendante de son contenu. Dès 1917, Einstein montra que le cadre conceptuel de la Relativité Générale permettait de fonder une cosmologie scientifique où le contenu matériel de l'univers influençait la structure globale de l'espace-temps. Il introduisit à cette occasion une modification possible des équations fondamentales de la théorie, consistant à ajouter le terme  $\Lambda g$  au « tenseur d'Einstein »  $D(g)$  apparaissant dans le membre de gauche de ces équations. Les données cosmologiques récentes sont compatibles avec une valeur non nulle (et positive) de la « constante cosmologique »  $\Lambda$  ainsi introduite. Ce travail séminal d'Einstein en 1917 a fondé une science nouvelle, la Cosmologie, qui a eu, et continue à avoir, un énorme développement tant expérimental que théorique.

Même si le nom d'Einstein est généralement associé en priorité avec la création des deux théories de la Relativité, ses contributions séminales à la *Théorie Quantique* suffiraient à en faire l'un des plus grands physiciens théoriciens de tous les temps. On peut à bon droit considérer que la physique quantique est née des deux articles d'Einstein, datant de 1905 et 1906, concernant la production, et l'absorption de lumière. En effet, Max Planck avait bien introduit en 1900 la constante quantique fondamentale  $h$  qui porte son nom, et avait découvert, puis « formellement dérivé », l'expression analytique du « rayonnement du corps noir », mais il n'avait pas suggéré, contrairement à ce que l'on pense généralement, que l'énergie d'un oscillateur matériel de fréquence  $f$  fût « quantifiée » en unités  $hf$ . Planck utilisait les « éléments d'énergie »  $hf$  comme un artifice formel permettant de discrétiser l'espace des phases et d'aboutir ainsi à un comptage des états microscopiques de la matière. Les deux sauts conceptuels majeurs consistant à postuler que l'énergie de la lumière, et l'énergie de la matière, sont *quantifiés* furent le fait de travaux d'Einstein en 1905 et 1906.

En mars 1905, Einstein introduit l'hypothèse des « quanta de lumière », c'est-à-dire l'hypothèse que la lumière est constituée de grains d'énergie, localisés dans l'espace, chaque grain ayant une énergie  $E = hf$ , où  $f$  désigne la fréquence de l'onde lumineuse, quand elle est décrite en termes de champ continu. Il motive cette hypothèse révolutionnaire par la considération de l'entropie du rayonnement noir dans la limite des hautes fréquences (limite de Wien). Il déduit ensuite de cette hypothèse certaines conséquences observables, notamment la loi fondamentale de l'effet photoélectrique : l'énergie cinétique des électrons arrachés à un métal par une lumière de fréquence  $f$  (supérieure au seuil  $W/h$ ) est égale à  $hf - W$ , où  $W$  est le travail d'extraction du métal. L'année suivante, en analysant de près la physique statistique d'oscillateurs matériels en équilibre avec le rayonnement du corps noir, il montre que le spectre de Planck pour ce rayonnement oblige à admettre que l'énergie d'un oscillateur matériel de fréquence  $f$  est *quantifiée* en multiples entiers de  $hf$ . En 1907, il applique son idée de la quantification de l'énergie de la matière à la théorie des chaleurs spécifiques des solides. Il explique ainsi pourquoi certains solides (notamment le diamant) ont, à température

ambiante, une chaleur spécifique nettement plus faible que la valeur « standard » prévue par la « loi de Dulong et Petit », c'est-à-dire par la thermodynamique classique. En 1909, il applique les résultats généraux sur les fluctuations thermodynamiques dont on a parlé ci-dessus aux fluctuations de certaines quantités liées au rayonnement du corps noir. En particulier, en utilisant son résultat de 1904 sur la variance de l'énergie d'un système (égale à  $k T^2 C$ ) il montre que la fluctuation quadratique moyenne de l'énergie de rayonnement thermique contenu dans un volume unité, et de fréquence  $f$  à  $df$  près, est la somme de deux termes : (i) un terme linéaire en la densité d'énergie, et (ii) un terme quadratique en cette densité. Il montre que le premier terme s'explique si l'on considère que la lumière est faite de quanta discontinus d'énergie  $hf$ , alors que le second s'explique si la lumière est faite d'ondes continues. Il en déduit expressément que l'on doit attribuer au rayonnement « les deux caractéristiques structurelles (structure ondulatoire et structure en quanta) » à la fois, sans les tenir pour incompatibles. En 1917, il analyse l'échange d'énergie et d'impulsion entre la lumière et un atome ayant (à la Bohr) des niveaux d'énergie quantifiés quelconques  $E_0, E_1, E_2, \dots$ . En demandant que l'atome puisse rester en équilibre thermodynamique avec le rayonnement du corps noir, il obtient deux résultats majeurs nouveaux : (i) il prouve que les quanta de lumière sont porteurs non seulement de l'énergie  $E = hf$ , mais aussi d'une impulsion vectorielle de grandeur  $p = hf/c$ , et (ii) il découvre un nouveau processus « quantique », l'émission stimulée : l'illumination d'un atome par un rayonnement incident de fréquence  $f$  peut *stimuler* l'atome à effectuer une transition d'un état d'énergie plus élevée ( $E_n$ ) vers un état d'énergie plus basse ( $E_m = E_n - hf$ ), en *émettant* un quantum de lumière d'énergie  $hf$  et de quantité de mouvement  $hf/c$  *dirigée* dans le sens du rayonnement incident. Ces deux résultats ont eu une grande importance dans le développement de la physique du vingtième siècle. Le premier parce qu'il représente la première invention, purement théorique, d'une nouvelle *particule élémentaire* : le « photon ». Quand au deuxième, le processus d'*émission stimulée* (*dirigée*), il est le concept de base mis à profit dans le *laser*, dont on connaît l'importance dans la recherche fondamentale et la technologie moderne. Plus généralement, notons que la problématique introduite par Einstein en 1917 de l'échange d'énergie et d'impulsion entre atomes et lumière est à la base de la physique atomique et de l'optique quantique moderne. On pensera en particulier aux travaux de l'école française (A. Kastler, J. Brossel, C. Cohen-Tannoudji, ...).

Les derniers résultats techniquement et conceptuellement novateurs d'Einstein en physique quantique datent de l'année 1924. Stimulé par un article d'un jeune physicien indien, Satyendra Nath Bose, Einstein introduit la théorie statistique quantique d'un gaz parfait de particules matérielles. Ce faisant il obtient deux résultats majeurs : (i) il découvre un nouveau phénomène physique d'origine purement quantique : la « condensation de Bose-Einstein », et (ii) en utilisant encore une fois son expertise sur les fluctuations thermodynamiques, il montre que la fluctuation quadratique moyenne du nombre de particules dans un volume donné est la somme de deux termes séparés. L'un de ces termes s'explique aisément en termes corpusculaires, alors que l'autre s'interprète, selon ses propres termes, « comme un terme rendant compte des fluctuations par interférence d'un processus de rayonnement adéquatement associé au gaz ». Autrement dit, Einstein propose d'attribuer à des corpuscules de matière des propriétés ondulatoires. Il semble qu'Einstein soit parvenu à cette conclusion en septembre 1924, c'est-à-dire *avant* de découvrir les idées de Louis de Broglie dans sa thèse, soutenue le 25 novembre 1924 et que Langevin lui envoya peu après. Comprenant alors l'antériorité de de Broglie (qui avait publié ses idées en 1923 dans les Comptes Rendus), il inclut dans son deuxième article (envoyé en décembre 1924) une discussion détaillée des caractéristiques du champ d'ondes associé, selon de Broglie, à une particule matérielle.

Ce bref récapitulatif des contributions d'Einstein, pendant les années 1905-1924, à la physique quantique aura suffi à en montrer l'importance exceptionnelle. Chacune de ses contributions a eu une postérité scientifique remarquable (on songera, par exemple, aux développements récents concernant la condensation de Bose-Einstein).

A partir de 1927, c'est-à-dire en particulier après la découverte (par Heisenberg, Born, Jordan, Dirac et Schrödinger) du formalisme moderne de la théorie quantique, Einstein se sentit mal à l'aise avec l'interprétation physique donnée par Bohr de ce formalisme, et prit du recul par rapport aux développements techniques et aux applications physiques nouvelles de ce formalisme. Corrélativement, Einstein se lança dans un programme de recherche ambitieux visant à généraliser la théorie de la Relativité Générale. Plus précisément, Einstein s'absorba dans un programme d'« unification » de la physique qui était sous-tendu par un triple espoir. D'abord, Einstein cherchait à unifier gravitation et électromagnétisme à travers une nouvelle structure géométrique de l'espace-temps (plus générale que la structure riemannienne utilisée en relativité générale). Son deuxième espoir était d'unifier continu et discontinu en décrivant une particule comme une région de l'espace où le champ qu'elle crée est très intense, sans cependant devenir infiniment grand (ou « singulier »). Enfin, le troisième espoir d'Einstein était de rendre compte des phénomènes quantiques dans le cadre d'une théorie *classique* (au sens de *non quantique*) d'un champ. Ce programme très ambitieux n'a pas été rempli par Einstein (voir cependant les remarques ci-dessous). Parallèlement à ce programme général, Einstein mena aussi des recherches où il développa certains aspects de la Relativité Générale : notamment la cosmologie relativiste (modèle d'Einstein-de Sitter, 1932), la théorie des lentilles gravitationnelles (Einstein 1936), l'étude de la structure topologique de l'espace déformé par la présence d'une ou plusieurs particules (« ponts d'Einstein-Rosen », 1935), et une nouvelle façon de déduire les équations du mouvement de plusieurs corps, représentés comme des singularités ponctuelles de la géométrie (Einstein, Infeld, Hoffmann, 1938). Chacun de ces travaux a initié, après la mort d'Einstein, une voie de recherche extrêmement riche qui a des répercussions importantes dans la science la plus actuelle (2005). Par exemple, l'étude des lentilles gravitationnelles est devenue importante après la découverte observationnelle, en 1979, d'un premier effet de ce type, et constitue aujourd'hui un outil privilégié d'exploration de l'univers cosmologique. Quant aux travaux d'Einstein-Infeld-Hoffmann sur le mouvement de plusieurs singularités de la géométrie, leur importance méthodologique a été appréciée à partir du milieu des années 1970, et ils constituent aujourd'hui un élément important de l'étude théorique du mouvement de deux trous noirs.

En plus de son activité de recherche, Einstein continua à réfléchir à la compatibilité entre les discontinuités quantiques, qui semblent intervenir de façon aléatoire comme Einstein fut le premier à reconnaître (en 1917), et une description mathématique complète de la réalité. La profondeur et la pertinence scientifique des critiques qu'il formula sur ce qu'il appelait « l'oreiller douillet » de « l'interprétation de Copenhague » du formalisme quantique n'ont été comprises que longtemps après sa mort. Par exemple, son article de 1935 avec Boris Podolsky et Nathan Rosen amena à la lumière un aspect profond de la physique quantique : l'« enchevêtrement » non local (ou, comme on dit souvent, l'« intrication ») de deux systèmes physiques ayant interagi (quantiquement) dans le passé avant de se séparer. Le théoricien John Bell comprit en 1964 que de telles situations d'enchevêtrement quantique se traduisaient expérimentalement par l'existence de corrélations non locales, d'origine purement quantique, entre sous-systèmes spatialement séparés. L'existence de ces corrélations Einstein-Podolsky-Rosen-Bell a été vérifiée avec précision dans plusieurs expériences, notamment celles d'Alain Aspect et de son groupe (1982). Ces corrélations EPRB jouent aujourd'hui un rôle crucial dans les domaines émergents de la cryptographie quantique et de l'informatique quantique. Plus généralement, on peut dire qu'à travers des physiciens comme Werner Heisenberg (qui

fut stimulé dans sa découverte des « relations d'incertitudes » par le souvenir d'une suggestion d'Einstein), David Bohm, John Bell, et surtout Hugh Everett (qui fut stimulé par le dernier séminaire d'Einstein, 14 avril 1954) et Bryce DeWitt, les interrogations d'Einstein sur la réalité quantique jouèrent un rôle souterrain mais important dans l'élucidation du sens physique du formalisme de la théorie quantique.

Nous avons mentionné ci-dessus le programme d'« unification » poursuivi par Einstein de 1925 à sa mort en 1955. Techniquement parlant ce programme échoua, en ce sens qu'il n'aboutit à aucun résultat concret permettant de transcender la Relativité Générale et la Théorie Quantique, et d'expliquer la nécessité des diverses interactions physiques observées (interactions gravitationnelles, électromagnétiques, faibles et fortes). Cependant, il est remarquable que certains développements actuels en *théorie des cordes* semblent réaliser, par des voies complètement nouvelles, certains des espoirs d'unification d'Einstein. Citons seulement trois faits : (i) conformément à l'intuition d'Einstein, la théorie des cordes fait jouer un rôle essentiel à la Relativité Générale qui n'apparaît plus comme un secteur séparé de la physique mais comme une conséquence obligée de la description quantique des cordes fondamentales, (ii) la théorie des cordes semble « unifier » de façon profonde les interactions électromagnétiques (et leurs généralisations non-abéliennes : « théories de jauge ») avec la gravitation einsteinienne, et (iii) dans une certaine limite, il semble (selon des suggestions d'Alexandre Polyakov, d'Igor Klebanov, et de Juan Maldacena) qu'il y ait une « équivalence » entre certains phénomènes purement quantiques se passant dans un espace-temps plat, et des phénomènes géométriques quasi-classiques se passant dans un fond espace-temps fortement courbé, ressemblant à un pont d'Einstein-Rosen.

Indiquons enfin qu'Einstein se faisait une très haute idée de la place de la science fondamentale dans la culture humaine. Homme d'une grande culture littéraire, philosophique et musicale, il n'a cessé de s'émerveiller de la possibilité pour l'homme de comprendre rationnellement l'univers. Il considérait la recherche scientifique d'une description rationnelle de la construction de l'étant comme une quête engageant l'essence métaphysique de l'homme. Comme il l'a écrit en 1930 : « La plus belle expérience que nous puissions faire est celle du mystère de la vie. C'est le sentiment originaire dans lequel tout art et toute science véritables prennent leur source. [...] Savoir que ce qui nous est impénétrable existe réellement, et se manifeste à travers la plus haute rationalité et la plus rayonnante beauté, raison et beauté qui ne sont accessibles à notre entendement que dans leurs formes les plus primitives, ce savoir et cette intuition constituent la vraie religiosité ; c'est en ce sens, et seulement en ce sens, que je puis me considérer comme un esprit profondément religieux. » Mentionnons pour finir qu'Einstein prenait au sérieux l'impact existentiel de la révolution conceptuelle apportée par la théorie de la Relativité, et notamment l'impossibilité de donner un sens objectif au « maintenant » et plus généralement au passage subjectif du temps. Il exprima cette idée de façon prégnante dans la lettre de condoléances qu'il écrivit le 21 mars 1955 (un mois avant sa propre mort) à la famille de son ami intime, Michele Besso, qui venait de mourir : « Voilà qu'il m'a de nouveau précédé de peu en quittant ce monde étrange. Cela ne signifie rien. Pour nous, physiciens dans l'âme, la séparation entre passé, présent et avenir ne garde que la valeur d'une illusion, si tenace soit-elle. »

## **Bibliographie succincte**

ALBERT EINSTEIN

*Œuvres choisies* (en français)

sous la direction de Françoise Balibar

Éditions du Seuil, Paris (6 volumes, 1989-1993)

ABRAHAM PAIS

*Albert Einstein. La vie et l'œuvre*

InterEditions (1993)

ALBRECHT FÖLSING

*Albert Einstein : Eine Biographie*

Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main (1993) (en allemand ; il en existe une traduction anglaise chez Penguin books, 1998)

ALAIN ASPECT et al.

*Einstein aujourd'hui*

Éd. EDP Sciences et CNRS Editions, collection Savoirs Actuels (2005)

Pour l'impact des travaux d'Einstein sur ceux de Jean Perrin on lira avec fruit le beau classique :

JEAN PERRIN

*Les Atomes*

Ed. NRF Gallimard, collections idées (1970)

Pour apprécier les idées de Poincaré sur les sujets qui ont été révolutionnés par Einstein on peut relire (avec intérêt) ses beaux livres de vulgarisation (qui sont régulièrement réédités) :

La Science et l'Hypothèse (Flammarion 1902 ; seul livre de Poincaré lu par Einstein)

La Valeur de la Science (Flammarion, 1905)

Science et Méthode (Flammarion, 1908)

Dernières Pensées (Flammarion, 1913).

Pour une mise au point des contributions de Poincaré à la Relativité, voir la première partie de:

Thibault Damour

*Poincaré, Relativity, Billiards and Symmetry*

hep-th/0501168, disponible sur les archives <http://xxx.lanl.gov/>