

Kouznetsov, Boris

Einstein et Bohr

Organon 2, 105-121

1965

Artykuł umieszczony jest w kolekcji cyfrowej Bazhum, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych tworzonej przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego.

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie ze środków specjalnych MNiSW dzięki Wydziałowi Historycznemu Uniwersytetu Warszawskiego.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach dozwolonego użytku.



Boris Kouznetsov (U.R.S.S.)

EINSTEIN ET BOHR

EINSTEIN

Niels Bohr a énoncé une remarque qui caractérise la science de notre siècle plus nettement et plus profondément que des traités historiques. La remarque en question concerne la théorie spinorielle unifiée de Heisenberg. "La conception de Heisenberg — dit Bohr — est, pour sûr, une conception folle. Or, a-t-elle assez de folie pour être juste?..."

Cette observation pénètre l'essentiel de l'état actuel de la théorie du champ, ainsi que le fond de la science du XX^e siècle où le caractère paradoxal est devenu un critère substantiel de l'authenticité. La remarque de Bohr, bien paradoxale et en même temps très précise et probante, prêche elle-même d'exemple caractéristique de cette authenticité paradoxale jamais connue au passé.

Le XX^e siècle a commencé par transformer les représentations les plus paradoxales de la géométrie multidimensionnelle d'abord, non-euclidienne ensuite, en théories physiques univoques et immuables, corroborées par l'expérience. C'était un concept absolument nouveau sur l'authenticité du paradoxe géométrique. L'idée d'authenticité physique de la "folie" mathématique est liée au nom d'Einstein. L'idée d'authenticité physique de la "folie" logique est liée au nom de Bohr.

La mécanique quantique tient à l'authenticité absolue du paradoxe logique aussi bien que la théorie de relativité tient à l'authenticité et au contenu physique des relations géométriques paradoxales. Et c'était par l'admission du caractère paradoxal de l'être même et de la ration objective d'univers qu'ont frappé l'attention du grand public et gagné la reconnaissance des physiciens et du monde scientifique entier, les idées d'Einstein et de Bohr; parfois, cette attention ne devinait qu'intuitivement la révolution de la pensée scientifique dissimulée dans ces idées qui devrait se manifester un jour ou l'autre.

La théorie des fonctions, on le sait, en outre de valeurs numériques de la fonction qui correspondent aux valeurs de l'argument, manipule

des opérateurs qui ne transforment plus une valeur de la fonction en une autre, mais une espèce de la fonction en une autre espèce. Les grandes découvertes physiques jouent toujours le rôle analogue. Elles augmentent non pas seulement la quantité de lois de la nature à la portée de l'homme, mais changent de même les méthodes scientifiques, le modèle de la pensée scientifique, le caractère interne des processus menant des découvertes particulières aux lois générales.

L'effet "opérateur" des généralisations d'Einstein et de Bohr est beaucoup plus fort qu'en pouvaient connaître les théories du passé. En conséquence de l'intervention d'Einstein et de Bohr la physique n'a changé que le contenu des résultats de la pensée scientifique. Alors, elle transforme radicalement sa structure logique et l'appareil mathématique. Même plus que ça, le rapport de la physique aux mathématiques connaît une transformation de principe. La physique doit inévitablement comprendre les axiomes géométriques et les principes logiques en tant que constatations physiques. La physique peut, de surcroît, représenter les relations et les rapports des phénomènes physiques à l'échelle de l'univers entier, tout en devenant un concept général du monde.

A côté d'une pénétration sans précédent de notions et de méthodes proprement physiques dans tous les domaines de la science, l'action transformatrice de la physique du XX^e siècle dans la science et la culture est déterminée par de nouveaux principes mathématiques et logiques qui ont revêtu en physique un sens ontologique. Et c'est pourquoi le nom d'Einstein restera pour toujours un symbole de l'accroissement gigantesque de la connaissance d'univers. Ce nom reste bien plus un symbole de la mutation gigantesque de la qualité des correlations en reliant les résultats de généralisations scientifiques avec leurs données de l'attribution à elles le contenu physique. Le nom de Bohr, lui aussi, est un symbole d'une transformation de la qualité des correlations en reliant des conclusions scientifiques avec des observations, mais c'est la question d'une transformation de la logique de déductions scientifiques.

La relativité einsteinienne est le résultat de la construction systématique d'un tel concept universel de l'espace et du temps d'où jaillit naturellement, sans quelles que soient admissions *ad hoc*, l'absence de vent d'éther.

Le fait initial, la constance de la vitesse de la lumière, paraît un "miracle", c'est-à-dire quelque chose de paradoxal, de "fou". Mais — comme l'écrivait Einstein — "...le but de toute activité mentale est de transformer le «miracle» en quelque chose de concevable"¹. Dans le cadre d'une théorie paradoxale le résultat de l'expérience de Michelson

¹ A. Einstein, *Conceptions scientifiques, morales et sociales*. Paris 1952, p. 209.

perd son caractère paradoxal. Le paradoxe cinématique — l'objet physique se meut avec la même vitesse par rapport aux systèmes se déplaçant l'un devant l'autre — n'a plus son caractère paradoxal et devient la conclusion naturelle d'une constatation métrique paradoxale: les distances tridimensionnelles, purement spatiales, et les intervalles temporels changent lors des transformations de coordonnées; et ce sont les intervalles quadridimensionnels qui deviennent les invariants des transformations.

La relativité généralisée représente une nouvelle généralisation et "paradoxalisation" de la géométrie: les caractéristiques métriques de l'espace-temps s'écartent des relations euclidiennes, les champs de gravitation introduisent dans l'image du monde une métrique variable, donc, une axiomatic géométrique variable.

Le fait que les notions préliminaires de relativité sont liées à la métrique et au mesurage ne doit pas étonner. La notion de relativité est inséparable de relations métriques des valeurs physiques mesurables que sont des invariants de divers groupes des transformations. Selon telles valeurs physiques servant des invariants de transformations ainsi que suivant telle ou telle mesure géométrique et structure de variétés homogènes conformes, nous distinguons l'un de l'autre le principe classique de relativité (invariant — distance tridimensionnelle), le principe spécial de relativité (invariant — intervalle quadridimensionnel à la métrique pseudo-euclidienne), le principe général de relativité (invariant — intervalle dans l'espace riemannien quadridimensionnel).

Mais dans tous les cas lorsque la notion de relativité maintient un sens, il s'agit de fonctions invariantes des coordonnées d'un espace à telle ou telle dimension et courbure. Dans un espace formé de points discrets, c'est-à-dire dans l'espace zérodimensionnel, la métrique devient absolue, elle n'est plus déterminée par le mesurage, mais par le compte. Cependant, la métrique serait absolue dans l'espace discret d'une dimension différente de zéro².

Au contraire, dans tous les cas lorsqu'un ensemble infini de points intermédiaires se trouve entre deux points de l'espace, le nombre de points ne peut plus servir de mesure de la distance entre les points, et c'est la fonction des coordonnées des points dont l'espèce caractérise la métrique de l'espace donné qui devient une mesure pareille. Cette particularité des ensembles infinis renferme justement la source du lien historique et logique entre les notions d'infini et de relativité³.

² B. Riemann, *Gesammelte Mathematische Werke*. New York 1953, pp. 285—286.

³ Б. Кузнецов, *Бесконечность и относительность*. В сборнике: *Эйнштейн и успехи физико-математической мысли*. Москва 1962, сс. 137—200 (B. Kouznetsov, *L'infini et la relativité*. Dans: *Einstein et le progrès de la pensée physico-mathématique*. Moscou 1962, pp. 137—200).

Si nous avions la ligne d'univers d'une particule mobile, l'ensemble infini de points d'univers dans chaque intervalle quadridimensionnel aurait un sens physique au cas lorsque la particule pourrait être décelée avec une authenticité parfaite et dans chaque point spacial au moment nécessaire déterminé par l'espèce de la ligne d'univers. Ainsi la relativité n'ébranle-t-elle point la logique bivalente aux constatations "vrais" et "faux" et basée sur le principe du tiers exclu; au contraire, elle présuppose l'appréciation bivalente des jugements concernant l'appartenance des coordonnées définies à la particule. Mais le nombre de tels jugements est infini. Les prédicats attribués au sujet forment un ensemble infini, une variété prédicative ininterrompue.

La trajectoire véritable de la particule correspond à un ensemble infini de réponses "oui" à la question sur la présence de la particule dans chaque point de la trajectoire. Une autre trajectoire reçue lors d'une variation de la trajectoire donnée correspond à un ensemble infini de réponses "non". Si nous ne pouvions pas constater, si la particule passait par un point quelconque, il nous resterait une issue: la question sur la présence serait substituée par celle d'une certaine probabilité de la présence. Nous reparlerons encore de changement pareil de la constatation "incertaine" à la constatation d'"une certaine probabilité". En tout cas les relations métriques exigent une variété ininterrompue de prédicats attribués d'une façon certaine à une particule identique à elle-même.

Afin de distinguer la structure logique du principe de relativité d'Einstein et la structure logique de la mécanique classique, il est à noter que selon cette dernière une particule pourrait être identique à elle-même, si son mouvement était caractérisé par un ensemble infini de diverses coordonnées spatiales tandis que le temps de sa présence dans des points différents restait toujours le même: la mécanique classique admet une vitesse infinie du mouvement. Dans la théorie de relativité une particule serait identique à elle-même si à toute variété ininterrompue de ses coordonnées spatiales correspondait une variété ininterrompue non dégénérée des moments du temps. La logique de relativité einsteinienne touche à une variété prédicative infiniment bivalente à quatre dimensions.

BOHR

Bohr de même qu'Einstein tenait à une construction systématique de la théorie physique, c'est-à-dire à sa déduction des principes les plus généraux possibles. Les faits observables d'une stabilité des atomes et de la discontinuité dans le spectre, paradoxaux au point de vue de l'électrodynamique classique, étaient expliqués d'abord par deux postulats: l'électron dans le mouvement sur son orbite "permise" n'irradie pas;

l'irradiation est due au passage de l'électron sur une autre orbite. Ces postulats enlevaient alors l'empreinte de caractère paradoxal d'une stabilité des atomes et d'une discontinuité dans le spectre. Au contraire, c'étaient les postulats de Bohr qui ont été marqués de ces phénomènes d'empreinte de paradoxe, ne constituant que le début de la "fuite du miracle" dans la physique atomique. Ces postulats paradoxaux sont sous peu devenus conséquence naturelle de la mécanique quantique.

Dans la seconde moitié des années vingt, les fondements de la physique classique étaient ébranlés et une tentative d'explication phénoménologique de l'incertitude ne pouvait plus avoir de succès. On tentait de "sauver" les fondements classiques en bornant l'incertitude des variables conjuguées par les limites phénoménologiques. Il s'agit d'une idée des paramètres dissimulés: nous ne pouvons pas définir exactement la valeur des coordonnées et des composantes de l'impulsion, du temps et de l'énergie parce que nous ignorons les paramètres complémentaires définissant d'une manière certaine les grandeurs physiques indiquées.

On peut suivre une analogie entre l'idée des paramètres dissimulés et le concept de la contraction absolue proposé par Lorentz. Le concept de Lorentz bornait par les limites phénoménologiques la constance de la vitesse de la lumière dans de divers systèmes inertiels: la lumière dans l'expérience de Michelson change de vitesse, mais nous ne pouvons pas enregistrer ce changement vu qu'il est compensé par une contraction du bras longitudinal de l'interféromètre et, en somme, par une contraction longitudinale des échelles en comparaison aux échelles absolues. Ils existent, de manière analogue, les valeurs exactes des coordonnées et des composantes d'impulsions, mais de telles ou telles causes empêchent de les déceler.

On cherchait à éluder le caractère objectif des affirmations paradoxales de la mécanique quantique par d'autres voies. Il y avait des physiciens qui s'inclinaient à la négation plus ou moins rigoureuse de substratum objectif des processus observés et mesurés. Aujourd'hui une récurrence quelque peu sérieuse de critique de la mécanique quantique à partir des positions classiques est à peine possible, tout comme une récurrence de son explication phénoménologique. Le principe de complémentarité se présente comme une constatation objective et, ainsi que la théorie de relativité, indique le caractère paradoxal objectif du monde. À cette différence près la théorie de relativité attribue un contenu physique à la géométrie paradoxale, multidimensionnelle et ensuite non-euclidienne, tandis que la mécanique quantique — à la logique paradoxale.

C'est un problème à éclaircir. Car la mécanique quantique n'exige pas une logique nouvelle, paradoxale. Elle n'exige pas le renoncement au principe d'identité ni aux appréciations bivalentes. Niels Bohr dit que la mécanique quantique n'est pas contradictoire dans le cadre de la

logique ancienne. Ce qui est juste. Aucun passage manifeste à un nouvel algorithme logique n'a lieu lors de l'établissement des principes initiaux de la mécanique quantique, et par conséquent les tentatives de tel passage ne jouent aucun rôle considérable lors de l'axiomatisation de la mécanique quantique. Ce qui ne veut point dire que l'on n'aurait pas besoin d'un nouvel algorithme logique pour généraliser la mécanique quantique créée dans la seconde moitié des années vingt et pour passer à une théorie quantique relativiste logiquement fermée.

On voit ici de nouveau s'imposer une analogie avec la théorie de relativité. Elle est formulée en 1905 sans recourir à une notion d'espace pseudo-euclidien à quatre dimensions. Or, une telle notion se révèle très importante au passage à la relativité généralisée, même inconcevable sans une représentation de l'espace non-euclidien. La mécanique quantique non-relativiste exclut l'appréciation trivalente, et, justement, dans cette exclusion, dans le retour aux notions classiques consiste l'aspect positif du principe d'incertitude.

Mais si ce retour ainsi qu'une possibilité de l'application à la variable dynamique des notions classiques de l'impulsion et de la position (indiquées sous certaines conditions par la relation de l'incertitude) se révélait problématique, un nouvel algorithme logique deviendrait substantiel. Apparemment, ici serait inévitable le passage de l'application du nouvel algorithme logique à la manière de Jourdain (ignorant qu'il parlait la prose toute sa vie) à son application évidente.

La mécanique quantique non-relativiste assure effectivement la possibilité d'appréciations bivalentes et dans ce sens elle évince des appréciations trivalentes à l'arrière-plan où elles n'exigent pas de constatation patente. La mécanique quantique exclut l'incertitude d'une variable dynamique en augmentant l'incertitude d'une variable dynamique conjuguée et en substituant aux valeurs indéterminées de la variable des valeurs déterminées de probabilités calculées d'une façon univoque par une équation d'onde. Ainsi, justement, la mécanique quantique (non-relativiste!) dans ses calculs positifs, dans ses conclusions et dans ses problèmes concrets peut-elle être exposée dans le cadre de la logique classique et n'exige-t-elle aucun spécifique algorithme logique. Étant donné que les résultats positifs de la mécanique quantique sont formulés à l'aide de notions classiques, la physique reste fidèle à l'analyse classique.

En ce qui concerne l'appareil mathématique, Bohr ne s'intéresse pas trop à sa "paradoxalisation". Les méthodes des matrices, des opérateurs, des fonctions propres, l'espace hilbertien, etc. ne changent pas le sens des postulats initiaux de la mécanique quantique étant, au fond, inutiles pour comprendre le contenu physique de ces postulats. La relativité généralisée reste incompréhensible sans catégories métriques, mais les bases de la mécanique quantique seraient compréhensibles en opposition

purement logique des processus de mesurage de variables conjuguées. C'est pourquoi les travaux de Bohr sur la mécanique quantique sont exempts de constructions mathématiques quelque peu compliquées.

Mais cherchons-nous l'essentiel. En opposant, dans une mesure certaine, la tendance physico-géométrique d'Einstein et la tendance physico-logique de Bohr, nous pourrions caractériser d'un côté nouveau le passage de la notion de l'incertitude à la notion de la complémentarité important pour la conception du monde de Bohr.

Le principe de complémentarité n'a pas d'application immédiate en physique. Il suffit pour des calculs mécaniques-quantiques le principe d'incertitude sous forme des relations établies par Heisenberg. Ces relations présentent un sens métrique, il s'agit des mesurages des coordonnées, des impulsions, du temps et de l'énergie. Les mesurages se rapportent à des grandeurs continues: chaque variable isolée change continuellement, et nous pouvons enregistrer un accroissement quel que soit minime de chaque variable au prix d'une impossibilité d'enregistrer un accroissement quel que soit minime de la variable conjuguée. Le caractère discret est intrinsèque au produit de variables conjuguées, à l'action. La relation de l'incertitude indique les conditions qui rendent possible une détermination de l'exactitude illimitée des valeurs de la variable ainsi qu'une réception de la variété continue des telles valeurs et des toutes notions métriques liées à la variété pareille.

Au contraire, le principe de complémentarité accentue la situation non métrique — l'existence de deux systèmes non identiques des interactions d'un objet quantique, l'existence de deux objets classiques non identiques en principe. Chacun de ces objets permet, grâce à l'interaction contrôlée, de définir à une précision voulue l'une de variables conjuguées, empêchant en même temps par son interaction non contrôlée de définir la variable conjuguée. S'il était possible de tracer une ligne de démarcation entre le principe d'incertitude et le principe de complémentarité, on verrait d'un côté le mesurage des valeurs, d'autre côté — l'opposition logique de schéma mesurant. Le principe de relativité dans son axiomatisation s'approche des schémas géométriques d'invariance par rapport à tel ou tel groupe de transformations et aux notions métriques. Le principe d'incertitude dans son axiomatisation (qui représente, justement, la portée de la complémentarité bohrienne) s'approche de l'opposition logique. Telle est, au fond, l'opposition des objets quantique et classique.

Nous divisons une série de processus physiques liés l'un à l'autre en deux parties: l'une soit observée sur le plan microscopique et nous nous rendrions compte de l'influence d'interactions sur les valeurs des variables; quant à l'autre partie nous en renonçons. À nouveau nous rencontrons ainsi un dilemme logique: le fait de prendre en considération

l'influence indiquée ou de ne pas le faire ne signifie pas une utilisation de tel ou tel système de notions métriques, mais témoigne de l'utilisation de tel ou tel système d'appréciations logiques.

CONFLIT

1927 a vu commencer une dispute entre Einstein et Bohr, sur les principes de la mécanique quantique, et qui devait durer presque trois décennies. Vers la fin des années quarante les positions de l'un et de l'autre ont été esquissées dans des articles qui dressaient le bilan de leur oeuvre; les articles étaient recueillis en un volume sur le concept du monde d'Einstein⁴. Il existe une riche littérature consacrée à la discussion d'Einstein avec Bohr et les autres représentants d'orientation dominante dans la mécanique quantique. Nous nous bornerons de quelques remarques.

En 1938, dans une lettre à Solovine, Einstein caractérisait ainsi les partisans du concept statistique qui dominait dans la mécanique quantique: "...ils font de la nécessité une vertu"⁵. "La nécessité" s'ensuit de l'existence d'une multitude de preuves expérimentales pour la nature ondulatoire des particules et pour la nature corpusculaire des champs d'ondes, c'est-à-dire la nécessité résulte d'une contradiction résoluble par des relations mécaniques-quantiques. La mécanique quantique est étayée par toute la somme de preuves pareilles et, dans ce sens, on ne peut s'en passer. La nécessité indique une "justification extérieure" de la mécanique quantique. Mais la "vertu" s'ensuit-elle? Peut-on se contenter de la mécanique quantique au point de vue d'une "perfection intérieure"?

Ça touche au problème de causalité. Si la mécanique quantique dans la forme épousée en 1925—1927 non seulement répond aux faits, mais encore possède une "perfection intérieure" suffisante, une "vertu" suffisante, la représentation des régularités statistiques du micromonde peut se prétendre le rôle du principe le plus général d'où jaillissent naturellement les formules de la mécanique quantique. Autrement dit, "Dieu joue aux dés". De cette manière Einstein formule la thèse: "Les lois principales du monde sont des lois statistiques". Cette idée, Einstein l'attribuait à ses opposants.

Lui-même, il tenait à un autre concept: "Dieu ne joue pas aux dés". Einstein cherchait des régularités principales non-statistiques de l'être.

⁴ *The Library of Living Philosophers. Albert Einstein: Philosopher-Scientist.* Ed. by P. A. Schilp, Evanston 1949; cf. *ibidem*: N. Bohr, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*, pp. 199—241, A. Einstein, *Remarks to the Essays Appearing in this Collective Volume*, pp. 663—688.

⁵ A. Einstein, *Lettres à Maurice Solovine*. Paris 1956, p. 71.

Et ce problème-ci justement attirait des efforts extrêmement intenses du cerveau génial pendant 30 ans à peu près.

Il faut souligner, qu'Einstein n'étudiait pas le problème de la théorie du champ unifiée sur un plan quantique-corpusculaire, c'est-à-dire en tant que théorie de transmutation des particules d'un type en particules d'un autre type, de formation des valeurs différentes des masses, etc. Il suivait la théorie unifiée sur un plan géométrique continu en tant que doctrine sur les propriétés du continuum d'espace-temps et ses propriétés métriques. Autrement dit, Einstein analysait le changement des propriétés géométriques du continuum, le passage d'une métrique à une autre, d'un système axiomatisé des notions métriques à un autre; il créait des constructions géométriques paradoxales toujours nouvelles et n'attendait pas à la base logique commune de toutes ces constructions.

Aujourd'hui nous savons bien qu'un tel chemin ne pouvait pas amener à une théorie du champ unifiée. Nous savons aussi que ce problème d'une théorie unifiée croissait quand même dans le sillage principal de la physique, et on en reparlera. Nous aurons l'occasion de nous assurer que l'insuffisance du chemin purement macroscopique résulte de la complémentarité fondamentale de la forme de la ligne d'univers et des processus ultramicroscopiques remplissant cette ligne, et permettant d'attribuer lui une existence physique.

Dans l'essai autobiographique d'Einstein de 1949 nous rencontrons les lignes suivantes: "Faisons maintenant une remarque critique concernant la théorie... On peut noter que la théorie introduit (sauf l'espace quadridimensionnel) deux genres d'objets physiques et notamment: 1) échelles et montres, 2) tout le reste, par exemple champ électromagnétique, point matériel, etc. Ce qui n'est pas logique à un titre quelconque: proprement dit, la théorie d'échelles et de montres aurait dû être déduite des solutions des équations principales (prenant en considération que ces objets ont une structure atomique et sont en mouvement) et c'est à tort que l'on en croit indépendante"⁶.

C'est une remarque assez importante. Le génie d'un penseur se révèle non seulement dans le contenu de sa théorie, mais aussi dans la compréhension des limites de cette théorie, des limites qui montrent le caractère fermé de la théorie ainsi que ses écoulements dans une théorie plus générale.

Les tentatives de construire une théorie du champ unifiée ne savaient pas faire déduire la théorie de relativité des postulats plus généraux ou même déceler des régularités non-statistiques du monde, plus générales que les régularités statistiques-probabilistiques indiquées par la

⁶ A. Einstein, *Notes for an Autobiography*. Dans: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Ed. by P. A. Schilp, Evanston 1949, p. 59.

mécanique quantique. Or, après la critique d'Einstein la mécanique quantique connaissait pourtant une évolution. En 1961 à Moscou, à l'Institut des problèmes physiques, Bohr disait:

“Les réponses à maintes questions qui à leur temps ont été la cause de discussions acharnées, de nos jours sont à la portée de chaque débutant. Et aujourd'hui, quand Einstein n'est plus avec nous, je voudrais évoquer le grand apport qu'a fait à la physique quantique cet homme avec son éternelle aspiration indomptable à la perfection, à l'élégance architecturale, au fini classique des théories, à un système unifié qui pourrait servir de base au développement de tout le tableau physique. A chaque pas nouveau de la physique qui paraissait s'ensuivre d'une façon univoque de son précédent, il savait trouver des contradictions, ces contradictions devenant impulsion poussant la physique en avant. A chaque étape nouvelle Einstein lançait un défi à la science, et sans ces défis l'évolution de la physique quantique aurait toujours traîné en longueur”.

Bohr mentionnait l'“aspiration indomptable à la perfection”. Il s'agit de la même “perfection intérieure” qu'Einstein avançait à titre de critère pour choisir la théorie physique. Les recherches d'“un système unifié qui pourrait servir de base au développement de tout le tableau physique” n'étaient pas en état d'ébranler la mécanique quantique. Bohr trouvait infatigablement des contre-arguments nouveaux, parait les critiques d'Einstein, éclaircissait toujours plus profondément et plus précisément le sens des principes d'incertitude et de complémentarité, et montrait que dans les limites de son application la mécanique quantique donnera une description complète de la conduite des objets physiques.

En ce qui concerne les limites d'application de la mécanique quantique, elles paraissaient plus tard, quand on voyait s'ébaucher les contours d'un concept qui s'écartait d'une manière encore plus radicale d'une image classique du monde. Ce concept porte atteinte à: 1) la définition quelle que soit précise d'une variable dynamique isolée pour le compte de l'incertitude de la variable conjuguée, 2) une image de l'“objet classique” aux variables dynamiques notoirement précises. Le concept évoqué de même porte atteinte aux relations relativistes. En occurrence le mot “atteinte” est vide de son sens agressif.

Il y a longtemps, Hertz disait que tout en restant dans le cadre limité d'une image du monde donnée nous ne puissions pas lui donner une explication rationnelle; et se renvoyer de Caïphe à Pilate ne sert à rien. Le concept relativiste n'est pas capable de donner des preuves à l'appui des postulats initiales de relativité. La mécanique de quanta ne donne pas des preuves à l'appui de ses postulats du départ. Peut-être, une théorie plus générale fournira-t-elle ces preuves, et qui s'appellera la théorie quantique-relativiste, parce qu'elle joindra les

critères relativistes aux critères quantiques, et parce qu'en découleront les premiers et les derniers. En conséquence une théorie pareille doit déduire d'un certain principe général une logique à la valence variable (principe de complémentarité) aussi bien qu'une géométrie à l'axiomatique variable (relativité).

Pour en finir avec nos brèves remarques sur la dispute entre Einstein et Bohr et passer au problème de la synthèse de leurs idées, il nous faut encore analyser de près les sources de la loyauté étonnante qui accompagnait toute la dispute. Même plus qu'une loyauté. Einstein et Bohr souffraient âprement de chaque menace à leurs idées principales dissimulée dans les arguments de l'adversaire, et ils se réjouissaient de chaque contre-argument trouvé. Mais chacun d'eux, Einstein et Bohr réciproquement, voyaient dans leurs arguments contradictoires des facteurs affilant l'intelligence et donnant un impulse à préciser leurs positions. Ce qui, bien sûr, a rapport aux traits individuels d'Einstein et de Bohr, mais révèle encore un contenu important. Et notamment chacun d'eux se distinguait par une compréhension très profonde du caractère insuffisant, borné et inachevé de toute conception physique.

Par surcroît, Einstein aussi bien que Bohr avait une anticipation intuitive d'une synthèse possible des idées contradictoires. Dans une lettre à Solovine parlant de l'influence des corps servant à mesurer des grandeurs physiques sur ces grandeurs mêmes, Einstein a ajouté: "Impossible, sans pêcher contre la raison, d'aboutir à quelque chose de valable". Une phrase assez significative chez un rationaliste. Rappelons qu'Einstein se trouvait plus près du rationalisme vif et mobile du XVII^e siècle que du rationalisme figé dans ses définitions du XVIII^e siècle.

Il ne s'agit pas seulement de l'affinité des positions d'Einstein et de Bohr, mais aussi d'un rayonnement incessant et réciproque des images et des idées de chaque des concepts opposés qui devenaient les uns pour les autres les facteurs de la précision et de la généralisation. Ce n'est qu'aujourd'hui, et non unanimement, que nous sommes capables de dire où donc menait la physique l'interaction pareille des concepts d'Einstein et de Bohr.

On voit maintenant que le conflit entre Einstein et Bohr reflétait moins les différences psychologiques ou biographiques qu'un isolement durable des postulats préliminaires de relativité d'une part et de mécanique quantique de l'autre. Car ce n'est que la science qui a le pouvoir d'anéantir des conflits pareils lorsqu'elle atteint un tel degré de son développement que des postulats isolés se révèlent comme déductions d'un postulat plus général.

Dans la seconde moitié du siècle quand la physique théorique s'efforce toujours plus résolument de passer des corrections apportées par les relations mécaniques-quantiques à une synthèse systématique (au

sens évoqué par Einstein, c'est-à-dire possédant une "perfection intérieure") des idées relativistes et celles quantiques, nous voyons plus clairement la nature du conflit aussi bien que la congénialité effective et les voies de la synthèse des idées d'Einstein et de Bohr.

SYNTHÈSE

Les répliques d'Einstein, au fond, concernaient non seulement la borne qui séparait la mécanique quantique de représentations classiques (relativistes au cas général). Elles concernaient de même la borne qui séparait la mécanique quantique créée en 1924—1927 de positions non classiques plus radicales. Ainsi les répliques citées ne poussaient-elles pas la mécanique des quanta en arrière, mais en avant, vers de nouvelles généralisations et précisions.

La mécanique quantique se fonde sur les admissions certaines sans lesquelles elle deviendrait une théorie plus générale. Pourtant, moins que quiconque Bohr était enclin à une absolutisation des admissions servant de base pour la mécanique quantique. C'est pourquoi sa pensée résonnait d'une façon pareille aux répliques einsteiniennes. Les discussions accusaient toujours plus nettement l'admission primordiale de la mécanique quantique. Einstein indiquait ces aspects de la mécanique quantique qui étaient, à son avis, dépourvus de la "perfection intérieure". Les objections de Bohr formulaient toujours plus précisément les relations mécaniques-quantiques en tant que déduction du postulat le plus général pour la mécanique quantique.

En quoi donc consiste ce postulat? Actuellement on le peut concrétiser et préciser mieux qu'au début de la discussion entre Einstein et Bohr. De même, mieux peut-on aujourd'hui concrétiser et préciser le postulat primordial de relativité. Et c'est avant tout le développement de la mécanique quantique qui rende ce postulat initial plus perceptible.

À titre du postulat initial de relativité nous trouvons l'existence d'objets spatiaux-temporels macroscopiques à une conduite assurée indépendante de leur microstructure.

Ce qui nous permet de considérer le mouvement d'une particule comme un ensemble de distances parfaitement déterminées (cette notion a un sens physique en présence d'une échelle graduée indépendante de sa microstructure) d'une autre particule et, de plus, comme un ensemble d'intervalles temporels entre le moment où la particule se trouve dans le point donné et le moment accepté pour initial (cette notion a un sens physique en présence d'une montre indépendante de sa microstructure). Ce postulat sert de base à tout le reste: la marche des montres et la graduation des échelles peuvent, oui ou non, dépendre du mouvement du système, peuvent être variables ou constantes.

Les corps du repérage spatial et temporel indépendants de leur microstructure se trouvent logiquement près des "objets classiques" de la mécanique quantique, c'est-à-dire près des corps d'interaction. La physique relativiste se suffit d'un postulat des corps du repérage indépendants, la physique quantique a besoin d'un postulat des corps d'interaction qui subissent des influences d'une particule et enregistrent son impulsion ou sa position (énergie ou temps), mais qui réagissent à cette influence d'une façon purement classique. L'existence de tels corps permet d'appliquer des notions classiques au micromonde.

L'admission initiale de relativité — objet de repérage quadridimensionnel indépendant de la structure discrète — et l'admission initiale de mécanique quantique — objet classique d'interaction — se sont révélées insuffisamment générales à l'approche d'un jalon, le même pour les deux cas.

Tout le front de la physique s'est approché de cet jalon au milieu de notre siècle. La première moitié du siècle est caractérisée par un développement séparé de la théorie de relativité et de la mécanique quantique. Ce fait n'est aucunement contraire au développement de la physique quantique relativiste — elle ne cherche que des solutions pour les problèmes particuliers.

Dans les années cinquante et soixante la relativité et la mécanique quantique ne se réunissent pas encore en un concept rigide et unifié, mais nous voyons se dessiner quelques contours d'un tel concept; la limite qui sépare ce concept de concepts connus est encore versatile et plutôt pointillée. Nous ne pouvons, pour le moment, insister que sur un seul point: l'idée nouvelle se distinguerait à tels ou tels points de concepts existants par tels ou tels caractéristiques. Probablement, elle ne prêterait pas l'attention à des champs isolés, mais à l'interaction des champs différents. Probablement, elle s'écarterait plus résolument de notions classiques que le faisaient les théories physiques de la première moitié du siècle. Probablement, elle renoncerait, dans une certaine mesure au moins, au formalisme hamiltonien, ce qui veut dire qu'elle cesserait de suivre le mouvement d'une particule d'un point à un autre et d'un moment à un autre.

Le passage à un contrôle plus précis de l'interaction exclut l'essai de détailler le mouvement dans l'espace et dans le temps. Soit permis pourtant de formuler une telle question: peut-on traiter comme principe l'impossibilité de détailler l'espace-temps? Les interactions des champs restreignent-elles une représentation d'un mouvement ininterrompu de la particule? Interrompent-elles le mouvement de la particule?

On avance à plusieurs reprises une représentation d'effets ultrarelativistes de transmutation des particules, leurs annihilations et régénérations qui empêchent de suivre le mouvement d'une particule d'un

point à un autre et d'un moment à un autre. Cette représentation permet de remplir d'un sens physique le concept de l'espace et du temps discrets. Ce concept d'une géométrie discrète, pris à part, était-il dépouillé de tout sens physique comme l'avait été la géométrie non-euclidienne avant qu'Einstein a identifié les champs de gravitation avec le changement des propriétés métriques de l'espace-temps (bien que l'idée même d'une possibilité de prototypes physiques de la géométrie discrète ainsi que non-euclidienne était énoncée plus tôt).

L'impossibilité de suivre le mouvement d'une particule d'un point à un autre et d'un moment à un autre (indépendamment de la complémentarité des variables conjuguées) a, paraît-il, le même caractère de principe que l'impossibilité d'enregistrer un mouvement par rapport à l'éther et l'impossibilité de définir exactement des coordonnées en déterminant exactement l'impulsion. Lorsqu'on déduit une telle impossibilité des postulats les plus généraux, des postulats physiques, la théorie du champ se débarrasse des valeurs infinies de l'énergie propre de la particule: un quantum virtuel qu'on ne peut observer à une distance quelle que soit petite et qui effectivement ne peut s'éloigner à une distance moins de minima ainsi que pour le temps moins de minimum; un tel quantum apporte une contribution limitée à l'énergie propre de la particule.

Il nous manque encore une théorie d'espace-temps discret au contenu physique et qui, tout en éliminant les valeurs infinies de l'énergie et tout en s'accordant avec les relations de relativité, permettrait de déduire ces relations des relations plus générales. Mais nous pouvons parler quand même de la solubilité d'un tel problème en principe, de ses fondements logiques.

Le schéma conventionnel suivant permet de voir les postulats logiques qui recevront peut-être une interprétation physique dans la théorie physique de l'espace-temps discret. Soit, par exemple, le mouvement d'une particule à la masse non-zéro composé de régénérations discrètes: la particule disparaît dans une cellule spatiale-temporelle donnée et régénère dans une cellule voisine. Si nous supposons que ces cellules spatiales-temporelles ont l'étendue spatiale de $\varrho \sim 10^{-13}$ cm et l'étendue temporelle de $\tau = \varrho/c \sim 10^{-24}$ sec.⁷, nous recevons l'espace-temps discret au cône de lumière: on peut envisager les régénérations en tant que mouvement d'une particule identique à elle-même à la vitesse de $\varrho/\tau = c$. La ligne d'univers macroscopique d'une telle particule, si cette dernière possède une masse non-zéro au repos, passera à l'intérieur du

⁷ Ordinairement, en parlant de l'espace-temps discret, on admet l'ordre suivant de valeurs: $\varrho \sim 10^{-13}$ cm et $\tau \sim 10^{-24}$ sec. Actuellement il y a tout lieu de supposer que les échelles minima peuvent être encore moins, par exemple, $\varrho \sim 10^{-17}$ cm et $\tau = \varrho/c \sim 10^{-28}$ sec.

cône de lumière car les déplacements élémentaires — les régénérations — peuvent être dirigés, somme toute, de divers côtés spatiaux et, en fonction d'asymétrie des probabilités de régénérations, la vitesse macroscopique v peut s'approcher, à un degré différent, de c tout en restant moins de cette dernière: $v < c$.

Un tel schéma tout conventionnel, bien sûr, indique une possibilité de principe d'une théorie relativiste de l'espace-temps discret. Mais elle exige, nous allons le voir, une synthèse encore plus profonde des idées de complémentarité et de relativité.

COMPLÉMENTARITÉ ET RELATIVITÉ

La transmutation et la régénération des particules élémentaires peuvent-elles devenir une idée de départ d'un tableau scientifique du monde? Peuvent-elles remplacer à ce titre une image traditionnelle des particules mouvantes identiques à elles-mêmes? Apparemment, non. La notion de transmutation en tant que notion de départ (qui précède la notion d'un mouvement de la particule identique à elle-même et qui est indépendante de cette notion classique) n'a pas le contenu physique. Une particule du type déterminé (sans une telle notion, celle de la transmutation, en général, est vide de tout sens) est caractérisée par une certaine forme déterminée de la ligne d'univers, d'après laquelle on peut rapporter la particule à tel ou tel type, lui attribuer tels ou tels: masse, charge, caractère de désintégration, etc.

La transmutation conserve un sens si elle est définie comme passage d'une ligne d'univers éventuelle à une autre ligne d'univers éventuelle. D'autre part, la forme de la ligne d'univers est vide de contenu physique si chaque point d'univers ne reçoit pas, sauf quatre coordonnées, un prédicat complémentaire — indication d'un processus substantiel quelconque. Supposons donc, à titre de ce processus, la variation de la ligne d'univers, le passage d'une ligne d'univers éventuelle à une autre. Alors la notion même du tableau initial du monde change: une image classique du mouvement d'une particule identique à elle-même ne cède pas son rôle à une autre image d'une particule transmutante, ces images perdent tout sens l'une sans l'autre, elles complètent l'une l'autre. Complétée par l'autre, chaque image reçoit un contenu physique, une vérité existentielle: la transmutation devient changement d'une ligne d'univers éventuelle, la ligne d'univers se remplit des processus physiques virtuels et cesse d'être une abstraction quadridimensionnelle purement géométrique qui n'est pas sujette à une vérification expérimentale.

Une telle complémentarité a deux aspects: local et macroscopique. À l'aspect local nous confrontons deux prédicats d'une particule: 1) sa

localisation spatiale-temporelle, c'est-à-dire indication d'un point mondial — position et temps, et 2) le reflet local de la forme de la ligne d'univers, c'est-à-dire impulsion et énergie de la particule. Le rapport entre ces deux prédicats est révélé comme relation d'incertitude.

Mais une compréhension plus générale de la complémentarité nous montre un autre aspect, aspect macroscopique. La forme de la ligne d'univers est confrontée au reflet macroscopique des processus locaux. Des tels processus locaux — interactions avec le vacuum, irradiations virtuelles, transmutations et régénération — influent sur la masse de la particule, comme quoi s'exprime justement le reflet macroscopique des processus locaux. On peut supposer la possibilité de déduire de ce reflet les relations fondamentales de relativité⁸.

Le principe de complémentarité peut être généralisé de la sorte qu'il embrasse les relations de relativité.

De telles interprétations du principe de complémentarité, avec tout leur caractère non-univoque et insuffisant pour une théorie physique, permettent de changer l'angle de vision aux concepts apparus au début du siècle, changer leur appréciation historique. Au moment d'une révision brusque et radicale de représentations physiques, l'historien se heurte toujours à l'influence d'une telle révision, exercée sur des appréciations rétrospectives. Comment peut-on apprécier de nos jours l'idée cardinale de Bohr, idée de complémentarité? Est-ce que le rapport de l'idée de complémentarité et de ses sources aux idées d'Einstein n'est pas aujourd'hui, au temps de recherches d'une théorie relativiste des champs quantifiés, significatif lors de la définition du sens historique et de la portée de l'exploit scientifique de Bohr?

Et, à son tour, à notre époque relativiste-quantique, est-ce que l'appréciation du rapport des idées d'Einstein à celles de Bohr ne sert pas de critère significatif lors de la définition de la portée historique de l'oeuvre d'Einstein?

En révisant les appréciations rétrospectives nous nous heurtons à une incertitude des critères initiaux. Actuellement, la physique vit une période quand le sens des tendances nouvelles est loin d'être éclairci. Ainsi les appréciations rétrospectives des idées d'Einstein et de Bohr restent-elles non-unanimes. Ce qui peut à peine troubler un historien de la physique du XX^e siècle, témoignant de l'immortalité des idées devenues objet d'une analyse historique. Ces idées dévoileront de nouveaux aspects, de nouveaux liens logiques et historiques, mais, quant à leur contenu le plus profond, elles restent toujours identiques à elles-mêmes, leur sens le plus profond se révélant historiquement invariant.

⁸ Cf.: В. Кузнецов, *Этюды об Эйнштейне*. Москва 1965, гл. 6 (cf.: В. Kouznetsov, *Études sur Einstein*. Moscou 1965, ch. 6).

Les recherches des invariants font de l'histoire une science. La notion du développement perd tout sens sans la notion d'un substrat invariant — identique à lui-même — des changements historiques. Ce substrat sert donc, toujours en croissance, d'objet d'une analyse de l'histoire contemporaine de la science qui devient, de plus en plus évidemment, l'histoire d'un rapprochement infini et irréversible de la vérité objective, et l'histoire d'une accumulation successive des valeurs historiques invariables.