

## Traduction d'un extrait de *Physics and Beyond* de Werner Heisenberg, concernant l'année 1925, dans le chapitre "Quantum mechanics and a talk with Einstein"

De même, en physique atomique, l'hiver 1924-1925 nous avait évidemment amenés dans un royaume où le brouillard était épais mais où une certaine lumière avait commencé à filtrer et offrait la promesse de nouvelles perspectives passionnantes.

Au cours du semestre d'été 1925, lorsque je repris mes travaux de recherche à l'Université de Göttingen – j'y étais Privatdozent depuis juillet 1924 –, je tentai une première tentative pour deviner quelles formules permettraient d'exprimer les intensités des raies du spectre de l'hydrogène, en utilisant plus ou moins les mêmes méthodes qui s'étaient révélées si fructueuses lors de mon travail avec Kramers à Copenhague. Cette tentative aboutit à une impasse : je me retrouvai dans un bourbier impénétrable d'équations mathématiques complexes, sans issue. Mais ces travaux me convainquirent d'une chose : il fallait ignorer le problème des orbites électroniques à l'intérieur de l'atome et considérer les fréquences et amplitudes associées aux intensités des raies comme des substituts parfaitement valables. Quoi qu'il en soit, ces grandeurs étaient directement observables, et comme mon ami Otto l'avait souligné en exposant la théorie d'Einstein lors de notre tour à vélo autour du lac Walchensee, les physiciens ne doivent considérer que les grandeurs observables lorsqu'ils tentent de résoudre l'énigme atomique. Ma tentative d'appliquer ce schéma à l'atome d'hydrogène avait échoué en raison des complications de ce problème particulier. J'ai donc cherché un système mathématique plus simple et je l'ai trouvé dans le pendule, dont les oscillations pouvaient servir de modèle aux vibrations moléculaires étudiées par la physique atomique. Mes travaux dans ce sens ont progressé plutôt que d'être retardés par un malheureux contretemps personnel.

Vers la fin du mois de mai 1925, je tombai si malade du rhume des foins que je dus demander à Born un congé de quatorze jours. Je partis directement pour Heligoland, où j'espérais me rétablir rapidement dans l'air marin vivifiant, loin des fleurs et des prairies. À mon arrivée, je devais avoir une allure impressionnante avec mon visage tuméfié ; en tout cas, ma logeuse me jeta un coup d'œil, conclut que je m'étais battu et promit de me soigner. Ma chambre était au deuxième étage, et comme la maison était construite en hauteur, à l'extrémité sud de l'îlot rocheux, j'avais une vue magnifique sur le village, les dunes et la mer au delà. Assis sur mon balcon, j'eus amplement l'occasion de réfléchir à la remarque de Bohr selon laquelle une partie de l'infini semble être à la portée de ceux qui regardent par delà la mer.

Hormis mes promenades quotidiennes et mes longues baignades, rien à Heligoland ne pouvait me distraire de mon problème, et je progressai donc beaucoup plus rapidement qu'à Göttingen. Quelques jours suffirent pour me débarrasser de tout le poids mathématique qui encombre invariablement le début de telles tentatives, et pour parvenir à une formulation simple de mon problème. En quelques jours, je compris précisément ce qui devait remplacer les conditions quantiques de Bohr-Sommerfeld dans une physique atomique fonctionnant uniquement avec des grandeurs observables. Il devint également évident qu'avec cette hypothèse supplémentaire, j'avais introduit une restriction cruciale à la théorie. Je remarquai alors qu'il n'y avait aucune garantie que le nouveau schéma mathématique puisse être appliqué sans contradictions. En particulier, il était totalement incertain que le principe de conservation de l'énergie soit toujours applicable, et je savais pertinemment que mon schéma tiendrait ou non en fonction de ce principe.

---

Transcription en Latex : Denise Vella, mars 2025, assistée de Google traduction, ou l'inverse.

En dehors de cela, plusieurs calculs ont montré que le projet semblait tout à fait cohérent. Je me suis donc concentré sur la démonstration que la loi de conservation était valable, et un soir, j'ai atteint le point où j'étais prêt à déterminer les termes individuels dans le tableau énergétique, ou, comme nous le disons aujourd'hui, dans la matrice énergétique, par ce qui serait aujourd'hui considéré comme une série de calculs extrêmement maladroits. Lorsque les premiers termes semblèrent concorder avec le principe énergétique, je fus assez excité et commençai à commettre d'innombrables erreurs arithmétiques. De ce fait, il était presque trois heures du matin avant que le résultat final de mes calculs ne m'apparaisse. Le principe énergétique était vérifié pour tous les termes, et je ne pouvais plus douter de la cohérence mathématique de la mécanique quantique vers laquelle mes calculs pointaient. Au début, je fus profondément alarmé. J'avais le sentiment d'observer, à travers la surface des phénomènes atomiques, un intérieur d'une étrange beauté, et j'étais presque étourdi à l'idée de devoir maintenant sonder cette richesse de structures mathématiques que la nature avait si généreusement déployée devant moi. J'étais bien trop excité pour dormir, et donc, à l'aube, je me dirigeai vers la pointe sud de l'île, où j'avais tant rêvé d'escalader un rocher s'avancant dans la mer. Je le fis sans trop de difficulté et attendis le lever du soleil.

Ce que j'ai vu cette nuit là à Heligoland n'était certes guère plus que le bord rocheux ensoleillé que j'avais aperçu à l'automne 1924, mais lorsque j'ai rapporté mes résultats à Wolfgang Pauli, généralement mon critique le plus sévère, il m'a chaleureusement encouragé à poursuivre dans la voie que j'avais empruntée. À Göttingen, Max Born et Pascual Jordan ont fait le point sur les nouvelles possibilités, et à Cambridge, le jeune mathématicien anglais Paul Dirac a développé ses propres méthodes pour résoudre les problèmes posés. Après seulement quelques mois, les efforts concentrés de ces hommes ont conduit à l'émergence d'un cadre mathématique cohérent, qui promettait d'embrasser tous les aspects multiples de la physique atomique. Je ne dirai rien ici de ce travail extrêmement intensif qui nous a tenus en haleine pendant quelques mois ; je rapporterai plutôt mon entretien avec Albert Einstein après une conférence sur la nouvelle mécanique quantique à Berlin.

À l'époque, l'Université de Berlin était considérée comme le bastion de la physique en Allemagne, avec des personnalités aussi célèbres que Planck, Einstein, von Laue et Nernst. C'est là que Planck avait découvert la théorie quantique et que Rubens l'avait confirmée par des mesures spéciales du rayonnement thermique ; c'est là qu'Einstein avait formulé sa théorie de la relativité générale et sa théorie de la gravitation en 1916. Au cœur de la vie scientifique se trouvait ce qu'on appelait le colloque de physique, qui remontait probablement à l'époque de Helmholtz et auquel participait généralement l'ensemble du personnel du département de physique. Au printemps 1926, je fus invité à m'adresser à cette éminente assemblée sur la nouvelle mécanique quantique. Comme c'était la première fois que je rencontrais autant d'hommes célèbres, je pris soin d'exposer clairement les concepts et les fondements mathématiques de ce qui était alors une théorie des plus atypiques. J'ai apparemment réussi à éveiller l'intérêt d'Einstein, car il m'invita à le raccompagner chez lui afin que nous puissions discuter plus longuement des nouvelles idées.

En chemin, il m'a interrogé sur mes études et mes recherches antérieures. Dès que nous fûmes à l'intérieur, il entama la conversation par une question portant sur le contexte philosophique de mes travaux récents. "Ce que vous nous avez dit paraît extrêmement étrange. Vous supposez l'existence d'électrons à l'intérieur de l'atome, et vous avez probablement raison. Mais vous refusez de considérer leurs orbites, alors même que l'on peut observer les traces d'électrons dans une chambre à brouillard.

J'aimerais beaucoup en savoir plus sur les raisons qui vous poussent à formuler des hypothèses aussi étranges.”

“Nous ne pouvons pas observer les orbites des électrons à l'intérieur de l'atome”, ai-je dû répondre, “mais le rayonnement émis par un atome lors des décharges nous permet de déduire les fréquences et les amplitudes correspondantes de ses électrons. Après tout, même dans la physique ancienne, les nombres d'ondes et les amplitudes pouvaient être considérés comme des substituts aux orbites électroniques. Or, puisqu'une bonne théorie doit être fondée sur des grandeurs directement observables, j'ai jugé plus judicieux de me limiter à celles ci, les considérant, pour ainsi dire, comme des représentants des orbites électroniques”.

“Mais vous ne croyez pas sérieusement”, protesta Einstein, “que seules les grandeurs observables doivent entrer dans une théorie physique ?” “N'est-ce pas précisément ce que vous avez fait avec la relativité ?” demandai je, quelque peu surpris. “Après tout, vous avez bien souligné qu'il est inadmissible de parler de temps absolu, simplement parce que le temps absolu est inobservable ; que seules les indications d'horloge, que ce soit dans le système de référence mobile ou dans le système au repos, sont pertinentes pour la détermination du temps.”

“J'ai peut-être utilisé ce type de raisonnement”, admit Einstein, “mais c'est tout de même absurde. Je pourrais peut-être le dire plus diplomatiquement en disant qu'il peut être heuristiquement utile de garder à l'esprit ce que l'on a réellement observé. Mais par principe, il est tout à fait erroné de vouloir fonder une théorie sur les seules grandeurs observables. En réalité, c'est tout le contraire qui se produit. C'est la théorie qui décide de ce que nous pouvons observer. Il faut comprendre que l'observation est un processus très complexe. Le phénomène observé produit certains événements dans notre appareil de mesure. En conséquence, d'autres processus se produisent dans l'appareil, qui, finalement et par des chemins complexes, produisent des impressions sensorielles et nous aident à en fixer les effets dans notre conscience. Tout au long de ce cheminement – du phénomène à sa fixation dans notre conscience – nous devons être capables de comprendre le fonctionnement de la nature, de connaître les lois naturelles, au moins en termes pratiques, avant de pouvoir prétendre avoir observé quoi que ce soit. Seule la théorie, c'est à dire la connaissance des lois naturelles, nous permet de déduire les phénomènes sous-jacents de nos impressions sensorielles. Lorsque nous prétendons pouvoir observer quelque chose de nouveau, nous devrions en réalité dire que, même si nous sommes sur le point de formuler de nouvelles lois naturelles qui ne concordent pas avec les anciennes, nous supposons néanmoins que les lois existantes – couvrant tout le chemin depuis le phénomène jusqu'à notre conscience – fonctionnent de telle manière que nous pouvons nous y fier et donc parler d'“observations”.”

“Dans la théorie de la relativité, par exemple, nous présupposons que, même dans le système de référence mobile, les rayons lumineux voyageant de l'horloge à l'œil de l'observateur se comportent plus ou moins comme nous l'avons toujours attendu. Et dans votre théorie, vous supposez de toute évidence que tout le mécanisme de transmission de la lumière de l'atome vibrant au spectroscopie ou à l'œil fonctionne exactement comme on l'a toujours supposé, c'est à dire essentiellement selon les lois de Maxwell. Si ce n'était plus le cas, vous ne pourriez observer aucune des grandeurs que vous qualifiez d'observables. Votre affirmation selon laquelle vous n'introduisez que des grandeurs observables est donc une hypothèse sur une propriété de la théorie que vous tentez de formuler. En fait, vous supposez que votre théorie n'entre pas en conflit avec l'ancienne description des phénomènes de rayonnement sur les points essentiels. Vous avez peut être raison, bien sûr, mais vous ne pouvez en être certain.”

J'ai été complètement déconcerté par l'attitude d'Einstein, même si ses arguments m'ont convaincu. C'est pourquoi j'ai déclaré : "L'idée qu'une bonne théorie ne soit rien d'autre qu'une condensation d'observations selon le principe d'économie de la pensée remonte certainement à Mach, et il a d'ailleurs été dit que votre théorie de la relativité fait un usage décisif des concepts machiens. Mais ce que vous venez de me dire semble indiquer exactement le contraire. Que dois-je penser de tout cela, ou plutôt qu'en pensez-vous vous-même ?"

"C'est une très longue histoire, mais nous pouvons l'approfondir si vous le souhaitez. Le concept d'économie de la pensée de Mach contient probablement une part de vérité, mais me paraît un peu trop trivial. Permettez-moi tout d'abord de vous présenter quelques arguments plaidant en sa faveur. Nous appréhendons évidemment le monde par nos sens. Même lorsque les jeunes enfants apprennent à parler et à penser, ils le font en reconnaissant la possibilité de décrire des impressions sensorielles très complexes, mais pourtant liées, avec un seul mot, par exemple le mot "balle". Ils l'apprennent des adultes et tirent la satisfaction de pouvoir se faire comprendre. Autrement dit, on peut soutenir que la formation du mot "balle", et donc du concept, est une forme d'économie de pensée permettant à l'enfant de combiner simplement des impressions sensorielles très complexes. Ici, Mach n'aborde même pas la question des prédispositions mentales ou physiques qui doivent être satisfaites chez le jeune enfant avant que le processus de communication puisse être initié. Chez les animaux, ce processus est bien moins efficace, comme chacun sait, mais nous n'en parlerons pas ici. Mach pense également que la formation des théories scientifiques, aussi complexes soient-elles, se déroule de manière similaire. Nous essayons d'ordonner les phénomènes, de les réduire à une forme simple, jusqu'à pouvoir en décrire un nombre potentiellement important à l'aide de quelques concepts simples."

"Tout cela paraît très raisonnable, mais il faut néanmoins se demander dans quel sens le principe d'économie mentale est appliqué ici. S'agit-il d'économie psychologique ou logique, ou encore, s'agit-il du côté subjectif ou objectif des phénomènes ? Lorsque l'enfant forme le concept de "balle", introduit-il une simplification purement psychologique en combinant des impressions sensorielles complexes au moyen de ce concept, ou cette balle existe-t-elle réellement ? Mach répondrait probablement que les deux affirmations expriment un seul et même fait. Mais il aurait tout à fait tort. Tout d'abord, l'affirmation "La balle existe réellement." contient également un certain nombre d'affirmations sur d'éventuelles impressions sensorielles qui pourraient se produire dans le futur. Or, les possibilités et les attentes futures constituent une part très importante de notre réalité et ne doivent pas être simplement oubliées. De plus, nous devons nous rappeler que déduire des concepts et des choses à partir d'impressions sensorielles est l'un des présupposés fondamentaux de toute notre pensée. Par conséquent, si nous ne voulions parler que d'impressions sensorielles, nous devrions nous débarrasser de notre langage et de notre pensée. En d'autres termes, Mach néglige plutôt le fait que le monde existe réellement, que nos impressions sensorielles sont basées sur quelque chose d'objectif."

"Je ne souhaite pas apparaître comme le défenseur d'un réalisme naïf ; je sais que ces questions sont très difficiles, mais je considère également le concept d'observation de Mach comme beaucoup trop naïf. Il prétend que nous savons parfaitement ce que signifie le mot "observer", et pense que cela le dispense de faire la distinction entre phénomènes "objectifs" et "subjectifs". Il n'est pas étonnant que son principe porte un nom si suspect et commercial : "économie de la pensée". Son idée de simplicité est beaucoup trop subjective à mon avis. En réalité, la simplicité des lois naturelles est également un fait objectif, et le schéma conceptuel correct doit équilibrer le côté subjectif de cette simplicité avec

le côté objectif. Mais c'est une tâche très difficile. Revenons plutôt à votre cours.”

“J'ai le fort pressentiment que, précisément à cause des problèmes que nous venons d'aborder, votre théorie vous attirera un jour des ennuis. J'aimerais vous expliquer cela plus en détail. En matière d'observation, vous agissez comme si tout pouvait rester tel quel, c'est à dire comme si vous pouviez utiliser le vieux langage descriptif. Dans ce cas, cependant, vous devrez aussi dire : dans une chambre à brouillard, nous pouvons observer la trajectoire des électrons. En même temps, vous affirmez qu'il n'existe pas de trajectoire électronique à l'intérieur de l'atome. C'est une absurdité flagrante, car il est impossible de supprimer la trajectoire simplement en restreignant l'espace dans lequel l'électron se déplace.”

J'ai essayé de prendre la défense de la nouvelle mécanique quantique. “Pour l'instant, nous ignorons le langage à utiliser pour parler des processus atomiques. Certes, nous disposons d'un langage mathématique, c'est à dire d'un schéma permettant de déterminer les états stationnaires de l'atome ou les probabilités de transition d'un état à un autre, mais nous ignorons, du moins en général, comment ce langage est lié à celui de la physique classique. Et, bien sûr, ce lien est indispensable pour appliquer cette théorie à l'expérience. Car, lorsqu'il s'agit d'expériences, nous parlons invariablement le langage traditionnel. Je ne peux donc pas vraiment prétendre avoir “compris” la mécanique quantique. Je suppose que le schéma mathématique fonctionne, mais aucun lien avec le langage traditionnel n'a été établi jusqu'à présent. Et tant que cela ne sera pas fait, nous ne pourrons espérer décrire la trajectoire de l'électron dans la chambre à brouillard sans contradictions internes. Il est donc probablement beaucoup trop tôt pour résoudre les difficultés que vous avez mentionnées.”

“Très bien, je l'accepte”, dit Einstein. “Nous en reparlerons dans quelques années. Mais je pourrais peut-être vous poser une autre question. La théorie quantique, telle que vous l'avez exposée dans votre cours, présente deux aspects distincts. D'une part, comme Bohr lui même l'a justement souligné, elle explique la stabilité de l'atome ; elle fait réapparaître sans cesse les mêmes formes. D'autre part, elle explique cette étrange discontinuité ou instabilité de la nature que nous observons très clairement lorsque nous observons des éclairs lumineux sur un écran à scintillation. Ces deux aspects sont évidemment liés. Dans votre mécanique quantique, vous devrez les prendre en compte tous les deux, par exemple lorsque vous parlerez de l'émission de lumière par les atomes. Vous pouvez calculer les valeurs d'énergie discrètes des états stationnaires. Votre théorie peut ainsi rendre compte de la stabilité de certaines formes qui ne peuvent fusionner continuellement les unes avec les autres, mais doivent différer de manière finie et semblent capables de reformation permanente. Mais que se passe-t-il lors de l'émission de lumière ? Comme vous le savez, j'ai suggéré que, lorsqu'un atome passe brusquement d'une valeur d'énergie stationnaire à la suivante, il émet la différence d'énergie sous forme d'un paquet d'énergie, appelé quantum de lumière. Dans ce cas, nous avons un exemple particulièrement clair de discontinuité. Pensez-vous que ma conception soit correcte ? Ou pouvez-vous décrire la transition d'un état stationnaire à un autre de manière plus précise ?”

Dans ma réponse, j'ai dû dire quelque chose comme ceci : “Bohr m'a appris qu'on ne peut décrire ce processus au moyen des concepts traditionnels, c'est-à-dire comme un processus spatio-temporel. Cela étant dit, nous n'avons bien sûr pas dit grand-chose, rien de plus, en fait, que nous ne savons rien. Je ne peux pas dire à ce stade si je dois croire ou non aux quanta de lumière. Le rayonnement implique de toute évidence les éléments discontinus que vous appelez quanta de lumière. En revanche, il existe un élément continu, qui apparaît, par exemple, dans les phénomènes d'interférence, et qui est

décrit beaucoup plus simplement par la théorie ondulatoire de la lumière. Mais vous avez bien sûr raison de demander si la mécanique quantique a quelque chose de nouveau à apporter à ces problèmes terriblement complexes. Je crois que nous pouvons au moins espérer que ce sera le cas un jour.”

“Je pourrais, par exemple, imaginer que nous obtiendrions une réponse intéressante en considérant les fluctuations d’énergie d’un atome lors de réactions avec d’autres atomes ou avec le champ de rayonnement. Si l’énergie changeait de manière discontinue, comme le laisse présager votre théorie des quanta de lumière, alors la fluctuation, ou, plus précisément, la moyenne quadratique des fluctuations, serait plus importante que si l’énergie changeait continûment. Je suis enclin à croire que la mécanique quantique conduirait à la valeur la plus élevée, établissant ainsi la discontinuité. D’autre part, l’élément continu, qui apparaît dans les expériences d’interférence, doit également être pris en compte. Peut-être faut-il imaginer les transitions d’un état stationnaire à l’autre comme autant de fondus enchaînés dans un film. Le changement n’est pas soudain : une image s’estompe progressivement tandis que la suivante devient nette, de sorte que, pendant un certain temps, les deux images se confondent et que l’on ne sait plus laquelle est laquelle. De même, il pourrait bien exister un état intermédiaire dans lequel on ne peut pas distinguer si un atome est dans l’état supérieur ou inférieur.”

“Vous avancez sur une corde raide”, m’avertit Einstein. “Car vous parlez soudain de ce que nous savons de la nature et non plus de ce qu’elle fait réellement. En science, nous devrions nous préoccuper uniquement de ce que fait la nature. Il se pourrait fort bien que vous et moi connaissions des choses très différentes sur la nature. Mais qui s’y intéresserait ? Peut être seulement vous et moi. Pour tous les autres, c’est une question totalement indifférente. Autrement dit, si votre théorie est juste, vous devrez me dire tôt ou tard ce que fait l’atome lorsqu’il passe d’un état stationnaire à un autre.”

“Peut-être”, aurais-je répondu. “Mais il me semble que vous employez un langage un peu trop strict. J’admets néanmoins que tout ce que je vais dire maintenant peut sembler une excuse facile. Attendons donc de voir comment la théorie atomique évolue.”

Einstein me lança un regard sceptique. “Comment pouvez-vous avoir autant confiance en votre théorie alors que tant de problèmes cruciaux restent totalement irrésolus ?”

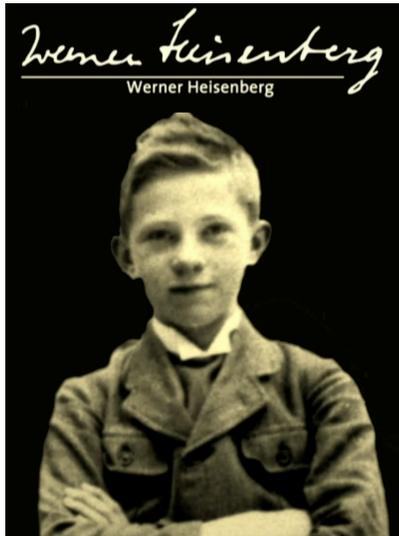
J’ai certainement dû réfléchir longuement avant de formuler ma réponse. “Je crois, tout comme vous, que la simplicité des lois naturelles a un caractère objectif, qu’elle n’est pas seulement le résultat d’une économie de pensée. Si la nature nous conduit à des formes mathématiques d’une grande simplicité et d’une grande beauté – par formes, j’entends des systèmes cohérents d’hypothèses, d’axiomes, etc. –, à des formes que personne n’a jamais rencontrées auparavant, nous ne pouvons nous empêcher de penser qu’elles sont “vraies”, qu’elles révèlent une caractéristique authentique de la nature. Il se peut que ces formes recouvrent également notre relation subjective à la nature, qu’elles reflètent des éléments de notre propre économie de pensée. Mais le simple fait que nous n’aurions jamais pu parvenir à ces formes par nous-mêmes, qu’elles nous aient été révélées par la nature, suggère fortement qu’elles doivent faire partie de la réalité elle-même, et pas seulement de nos pensées sur la réalité.”

“Vous pourriez objecter qu’en parlant de simplicité et de beauté, j’introduis des critères esthétiques de vérité, et j’avoue franchement être profondément attiré par la simplicité et la beauté des schémas mathématiques que la nature nous présente. Vous avez dû ressentir cela aussi : la simplicité et la plénitude presque effrayantes des relations que la nature déploie soudainement devant nous et

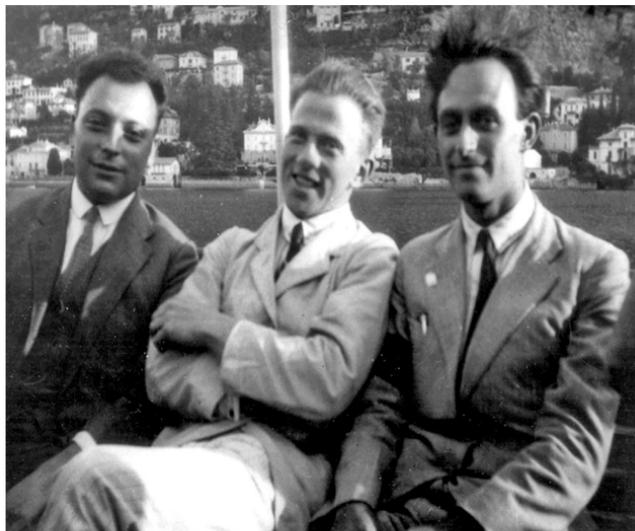
auxquelles aucun de nous n'était le moins du monde préparé. Et ce sentiment est tout autre chose que la joie que nous ressentons lorsque nous avons particulièrement bien accompli une tâche donnée. C'est l'une des raisons pour lesquelles j'espère que les problèmes que nous avons abordés seront résolus d'une manière ou d'une autre. Dans le cas présent, la simplicité du schéma mathématique a également pour conséquence qu'il devrait être possible d'imaginer de nombreuses expériences dont les résultats peuvent être prédits à partir de la théorie. Et si les expériences réelles confirment les prédictions, il ne fait aucun doute que la théorie reflète fidèlement la nature dans ce domaine particulier."

"Le contrôle par l'expérience", a convenu Einstein, "est, bien sûr, une condition préalable essentielle à la validité de toute théorie. Mais on ne peut pas tout tester. C'est pourquoi vos remarques sur la simplicité m'intéressent tant. Pourtant, je ne prétendrais jamais avoir vraiment compris ce que signifie la simplicité des lois naturelles."

Après avoir longuement discuté du rôle des critères de vérité en physique, je pris congé. J'ai rencontré Einstein un an et demi plus tard, au congrès Solvay à Bruxelles, où les fondements épistémologiques et philosophiques de la théorie quantique ont une fois de plus fait l'objet de discussions passionnantes.



Albert Einstein with his sister Maria (Maja), 1885



Pauli, Heisenberg and Fermi at the Como-Conference, 1927, © CERN, Geneva