

EINSTEIN ET « ZWEISTEIN »

John STACHEL

RÉSUMÉ : Comme le suggère le sobriquet « Zweistein », Wolfgang Pauli fut considéré par la communauté des théoriciens de la physique comme son membre le plus éminent après Albert Einstein. Durant plus de trente-cinq ans, les deux hommes entretenirent des relations intellectuelles et personnelles. Cet article analyse les relations entre quatre thèmes récurrents de leurs discussions. 1) La théorie de la relativité : à l'âge de 20 ans, Pauli préparait un manuel qui fera autorité sur la relativité, manuel qu'il révisera vers la fin de sa vie et qui demeure incomparable aux yeux des physiciens et des historiens de la physique. 2) La théorie du champ unifié : même s'il éprouvait de la sympathie, à l'origine, pour les recherches d'Einstein en vue d'une unification des théories de l'électromagnétisme et de la gravitation, à laquelle il apporta plusieurs contributions majeures, Pauli en vint à considérer une telle entreprise comme stérile. 3) Les fondements de la mécanique quantique : le jugement négatif porté par Pauli sur le programme de recherche d'Einstein s'accrut en raison de leur profond désaccord sur le rôle que la mécanique quantique était appelée à jouer dans les développements futurs de la physique théorique. 4) La gravitation quantique : Pauli reconnaissait toutefois que, tant qu'une réconciliation fructueuse de la mécanique quantique et de la relativité générale ne serait pas accomplie – réconciliation qui nous échappe toujours –, les scientifiques ne pourraient ignorer le défi qu'Einstein adressait à la mécanique quantique.

MOTS-CLÉS : Einstein, Pauli, relativité, théorie des quanta, gravité.

ABSTRACT : As the sobriquet « Zweistein » suggests, within the theoretical physics community Wolfgang Pauli came to be regarded as second in eminence only to Albert Einstein. Over a period of thirty-five years, they interacted both intellectually and personally. This paper focuses on four interrelated topics of their discussions. 1) The theory of relativity : at the age of twenty, Pauli prepared the definitive survey of relativity, a survey which he revised near the end of his life and which remains invaluable to physicists and historians of physics. 2) Unified field theories : although initially sympathetic to Einstein's search for a unified theory of electromagnetism and gravitation and having made important contributions to the subject, Pauli came to regard such efforts as fruitless. 3) Foundations of quantum mechanics : Pauli's negative evaluation of Einstein's program grew out of their sharply differing evaluations of the role that quantum mechanics would play in the future development of theoretical physics. 4) Quantum gravity : Pauli recognized that, until the achievement of a successful reconciliation of quantum mechanics and general relativity – an achievement that still eludes us – Einstein's challenge to quantum mechanics could not be laid to rest.

KEYWORDS : Einstein, Pauli, relativity, quantum theory, gravity.

ZUSAMMENFASSUNG : Wie der Spitzname « Zweistein » zeigt, galt Wolfgang Pauli in der theoretischen Physik als die zweite Eminenz direkt nach Einstein. Über fünfunddreißig Jahre hinweg pflegten sie intellektuellen und persönlichen Austausch. Dieser Aufsatz konzentriert sich auf vier miteinander verbundene Themen ihrer Diskussion. 1) Relativitätstheorie : als zwanzigjähriger stellte Pauli den definitiven Überblick zur Relativitätstheorie zusammen, den er gegen Lebensende nochmals überarbeitete und der für Physiker und Physikhistoriker unschätzbaren Wert behält. 2) Einheitliche Feldtheorien : trotz seiner anfänglichen Sympathie für Einsteins Suche nach einer einheitlichen Theorie von Elektromagnetismus und Gravitation, und trotz eigener wichtiger Beiträge zu dem Thema, sah Pauli solche Versuche zunehmend als fruchtlos an. 3) Grundlagen der Quantenmechanik : Paulis negative Bewertung von Einsteins Programm entstand aus ihrer stark unterschiedlichen Einschätzung der zukünftigen Rolle der Quantenmechanik für die theoretische Physik. 4) Quantengravitation : Pauli erkannte, dass ohne ein erfolgreiches – aber bis heute nicht erreichtes – Versöhnen von Quantenmechanik und allgemeiner Relativitätstheorie die Herausforderung Einsteins an die Quantenmechanik bestehen bleiben muss.

STICHWÖRTER : Einstein, Pauli, Quantentheorie, Gravitation.

John STACHEL, né en 1928, s'est consacré à la physique théorique, en particulier à la relativité générale et aux fondements de la mécanique quantique, et plus généralement à l'histoire et à la philosophie des sciences. Il est à l'initiative de l'édition des *Collected Papers of Albert Einstein*. Son dernier ouvrage s'intitule *Albert Einstein from "B" to "Z"* (Boston/Bâle/Berlin, Birkhäuser, « Einstein Studies, 9 », 2002).

Adresse : Physics Department & Center for Einstein Studies of Boston University, Center for philosophy and history of science, 745 Commonwealth avenue, Boston (MA) 02215.

Courrier électronique : stachel@bu.edu

Le sobriquet de Wolfgang Pauli, « Zweistein », symbolise bien son accession au rang des « augures [*Auguren*] » de la physique théorique, ainsi qu'Einstein les nommait, et sa place de second qui ne cédait la préséance que devant *Einstein* lui-même (selon un article de journal suisse, « les étudiants de l'ETH, l'appelait "Einstein II" pour faire vite »). De fait, au cours des dernières décennies de leurs vies (bien que plus jeune de vingt et un ans, Pauli ne survécut que trois ans à Einstein), les vues hétérodoxes d'Einstein sur la mécanique quantique, le champ de la physique à l'essor le plus foudroyant, tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental, le transformèrent en une icône invoquée à l'occasion des cérémonies, mais ignorée en ce qui regarde le développement de la physique. Par contraste, Pauli assumait le rôle actif de « conscience de la physique théorique » (Weisskopf) – « aucune forme d'approbation ne pouvait être plus précieuse pour les physiciens, y compris Bohr, qu'un hochement de tête bienveillant de Pauli » (Rosenfeld) – ou, sous un jour moins bienveillant (car, telle une divinité hindoue, Pauli possédait de nombreux visages), le rôle d'un « fléau de Dieu » (Ehrenfest).

Ainsi se développa une profonde divergence de vues entre les deux hommes. Toutefois, comme nous le verrons, certaines questions censées avoir divisé Einstein et Pauli ne l'ont point fait, et celles qui les ont vraiment opposés constituent encore les enjeux de la physique contemporaine.

On dit qu'ils se sont rencontrés pour la première fois à l'assemblée de Bad Nauheim (en septembre 1920), organisée par la Société allemande des scientifiques et physiciens, où les deux hommes prirent la parole, Einstein sur la relativité et Pauli sur la mécanique quantique (Pauli commentant aussi l'article d'Hermann Weyl sur la théorie du champ unifié). Même s'il n'avait alors que la moitié de l'âge d'Einstein, Pauli avait déjà travaillé depuis plusieurs années sur la théorie quantique comme sur la théorie de la relativité.

On sait qu'ils furent présentés l'un à l'autre par Lise Meitner, qui les connaissait tous deux¹. Toutefois, Rudolph Peierls rapporte une anecdote (« que je ne connais évidemment que par ouï-dire ») selon laquelle il y avait déjà eu un échange entre les deux hommes :

« [Cela] remonte à ses études sous la direction de Sommerfeld. [Pauli] était encore inconnu mais il était en train de rédiger sa thèse sur l'ion de la molécule d'hydrogène en employant la première théorie quantique tout en préparant son grand article sur la relativité [...] Einstein était en visite et, après une allocution au colloque, fit quelques commentaires qui firent se lever au fond de la salle le jeune Pauli qui déclara : "Vous savez, ce que dit Monsieur Einstein n'est pas complètement idiot !" »².

1) Passons maintenant au travail de Pauli sur la relativité. Âgé de 18 ans, il publia son premier article sur la relativité générale, bientôt suivi de deux autres sur la nouvelle théorie unifiée de l'électromagnétisme et de la gravitation de Weyl. Au début des

1. MEYENN, WEISSKOPF et HERMANN, éd., 1979, p. 536.

2. PEIERLS, 1985, p. 46.

années 1920, Pauli travaillait sur une recension de la théorie de la relativité, restreinte et générale, qui incluait la cosmologie et la théorie du champ unifié. Cette tâche lui avait été confiée par son professeur, Arnold Sommerfeld, qui était l'éditeur de la partie scientifique de la prestigieuse *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, dans laquelle elle fut publiée en 1921. Cette étude s'attira les louanges appuyées du maître lui-même. Einstein écrit :

« En examinant ce travail mature et de haute conception personne ne croirait que l'auteur est un jeune homme de 21 ans. On se demande ce qu'il faut admirer le plus, la compréhension psychologique du développement des idées, la sûreté du raisonnement mathématique, la profondeur de l'intuition physique, la clarté du style, la systématique de l'exposition, la connaissance de la littérature, l'exhaustivité de l'étude sur le sujet [ou] la sûreté des évaluations critiques³. »

Ce travail est si incomparable – et impérissable – qu'il fut reproduit tel quel dans la traduction anglaise de 1958 avec les vingt-cinq pages de notes complémentaires qu'y ajouta Pauli en 1956. Il nous suffit de dire que, lorsque nous eûmes à préparer, il y a quelques années, un article sur l'histoire de la relativité pour le recueil *Twentieth-century physics*⁴, les commentaires de Pauli nous semblèrent encore la meilleure approche possible de l'histoire de bien des concepts.

Pauli consacra des années plus tard un petit écrit à ce que l'on pourrait nommer la théorie classique de la gravitation. Au milieu des années 1920, et pendant environ trente ans, commença pour la relativité générale ce qui fut appelé « la traversée du désert⁵ », durant laquelle l'attention de la communauté des physiciens se détournait largement du sujet et s'orientait ailleurs. Il va de soi que Pauli employait la théorie de la relativité restreinte comme outil dans plusieurs de ses plus grands travaux, tels que le développement de la théorie quantique des champs, la démonstration du théorème spin-statistique, et le théorème CPT. Mais, « pour bien des raisons, l'histoire de la relativité générale (de 1920 à 1960) fut bien moins spectaculaire⁶ ». Toutefois, durant son séjour à l'Institut des études avancées (IAS) dans les années 1940, Pauli et Einstein travaillèrent ensemble à un article⁷ démontrant l'inexistence d'une solution stationnaire, non singulière, et asymptotiquement plate pour les équations du champ gravitationnel (à quatre ou cinq dimensions) à l'exception du champs décroissant plus rapidement que $1/r$ à l'infini (André Lichnerowicz montra par la suite que seul l'espace-temps de Minkowski satisfait ces conditions). Quand vint le temps d'un second épanouissement de la relativité générale, qui débuta dans les années 1960 et se poursuit de nos jours, les deux hommes étaient morts.

2) Dès le début de sa carrière, Pauli travailla sur des problèmes relevant de ce que nous désignons aujourd'hui comme la première théorie quantique, un champ auquel Einstein avait énormément contribué. Quoique Sommerfeld et Niels Bohr aient été les

3. ENZ, 1973, p. 768, publie ce passage en anglais.

4. STACHEL, 1995.

5. EISENSTAEDT, 1986 et 1989.

6. BARGMANN, 1960, p. 195.

7. EINSTEIN et PAULI, 1943.

principales références de Pauli en ce domaine, l'œuvre d'Einstein s'avéra là encore d'une valeur inestimable, comme Bohr lui-même le rappela par la suite :

« C'est inspiré par les considérations statistiques générales d'Einstein sur les échanges de l'énergie et du moment dans les processus de radiation que [Pauli] montra que les probabilités de dispersion dépendent de l'intensité des deux composantes de la radiation intervenant dans le processus. La ligne directrice de ce travail est en effet très étroitement liée à la théorie générale de la dispersion, formulée par Kramers, qui s'avéra si importante pour les développements ultérieurs⁸. »

Ainsi, il n'est pas insignifiant que Pauli ait choisi d'écrire sur « Les contributions d'Einstein à la mécanique quantique » dans le volume des *Philosophes contemporains*⁹ dédié à Einstein qui fut publié pour son soixante-dixième anniversaire. Ailleurs, Pauli souligna « l'interaction décisive de ces deux directions de recherche [*i. e.* la relativité et la théorie quantique] dans la vie d'Einstein¹⁰ ».

Cependant, avec l'avènement de la nouvelle mécanique quantique au milieu des années 1920, leurs vues commencèrent à diverger. Au moment du congrès Solvay de 1927, Pauli était devenu un ferme partisan de la complémentarité, perspective développée par Bohr, tandis qu'Einstein demeurait sceptique quant à la complétude de la description par la mécanique quantique des phénomènes physiques et s'engageait dans la recherche d'une telle description complète de la réalité physique. Trente ans plus tard, Pauli résuma leurs différences :

« Je compte parmi les physiciens qui voient dans les fondements de la mécanique quantique contemporaine, qui postulent des probabilités fondamentales, un approfondissement du mode de pensée initié par Einstein. Des configurations expérimentales spécifiées, qui sous certaines conditions sont complémentaires l'une de l'autre, jouent ici le rôle que les états de mouvement de l'observateur ont dans la théorie de la relativité d'Einstein ; la grandeur finie du quantum d'action, qui pose une limite à la divisibilité des phénomènes dans le domaine atomique, joue ici le rôle de la vitesse maximale du signal dans la théorie de la relativité restreinte d'Einstein. Le groupe des transformations unitaires en mécanique quantique, qui englobent toutes les spécifications possibles des configurations expérimentales, joue le rôle que le groupe des transformations de coordonnées, qui relie tous les états possibles de mouvement de l'observateur et leurs observations relatives en conformité avec les lois de la nature, joue dans la théorie de la relativité générale [...].

« En dépit de cela, Einstein s'accroche à la conception de la réalité plus étroite, issue de la physique classique, selon laquelle une description de la nature qui admet des événements individuels qui sont réguliers quoique non déterminés lui apparaît nécessairement comme "incomplète"¹¹. »

8. BOHR, 1960, p. 2.

9. PAULI, 1949.

10. PAULI, 1958a, ici 1961, p. 85.

11. PAULI, 1956, ici 1961, p. 79.

En revenant au congrès Solvay de 1927, on peut détecter, dans une observation faite par Einstein et la réponse de Pauli¹², les germes de la polémique ultérieure déclenchée par le fameux article EPR, « Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete ? ». Quand l'article EPR fut publié en 1935, Pauli réagit avec une acerbité caractéristique, mais (après avoir lâché un peu de vapeur) une acuité tout aussi caractéristique :

« Einstein s'est une fois de plus exprimé publiquement au sujet de la mécanique quantique [...]. Comme il est bien connu, c'est une catastrophe à chaque fois que cela se produit [...]. Tout à fait indépendamment d'Einstein, il me semble que l'on devrait, dans un développement systématique de la mécanique quantique, apporter davantage d'attention à la composition et la séparation des systèmes [...]. C'est ce que – comme Einstein l'a *justement* indiqué – un point des plus fondamentaux en mécanique quantique [...]»¹³. »

Même si ses vues sur la mécanique quantique divergeaient grandement de celles d'Einstein, Pauli comprenait le point de vue de ce dernier bien mieux que la plupart des physiciens : « Nous avons souvent discuté de ces questions l'un avec l'autre, et j'ai toujours tiré le plus grand profit de cela, même si je ne puis acquiescer aux vues d'Einstein¹⁴. »

De fait, quand Max Born entama en 1954 un échange assez polémique avec Einstein – ou plutôt un échange dans lequel Born devint polémique tandis qu'Einstein se résignait à demeurer incompris –, Pauli, qui était en visite à l'IAS, entreprit une mise au point dans deux lettres qu'il adressa à Born. Puisque la position d'Einstein est encore souvent mal comprise, citons quelques lignes de cette correspondance :

« Einstein m'a donné votre manuscrit à lire ; il n'était *pas du tout* mal disposé à votre égard, mais disait juste que vous étiez quelqu'un qui n'écouterait pas. Cela confirme l'impression que j'ai eue moi-même dans la mesure où je suis incapable de reconnaître en Einstein la personne dont vous parlez que ce soit dans votre lettre ou dans votre manuscrit. Il me semble que vous vous êtes forgé une sorte d'Einstein benêt pour votre propre usage, qui consiste à l'abattre avec grandiloquence. En particulier, Einstein ne considère pas que le concept de "déterminisme" soit aussi fondamental qu'on le prétend souvent (comme il me l'a dit avec insistance plusieurs fois) [...]. Le point de départ d'Einstein est "réaliste" plutôt que "déterministe", ce qui signifie que son préjugé philosophique est différent. [...] *Pour résumer*, je dirais ceci : [...] votre manuscrit [...] manque complètement les problèmes qui préoccupent Einstein. En particulier, il me semble inapproprié d'introduire le concept de déterminisme dans la controverse avec Einstein. [...] J'ai essayé dans ma dernière lettre de vous expliquer la position d'Einstein. C'est *exactement la même* que celle exprimée dans les travaux publiés d'Einstein et telle qu'il me l'a exposée¹⁵. »

En effet, bien que pour des raisons différentes, Einstein était tout aussi sceptique que Pauli en ce qui concerne les interprétations déterministes « à variables cachées » de la

12. SOLVAY, éd., 1928, voir dans la « Discussion générale des idées nouvelles émises. Causalité, déterminisme, probabilité » les sections consacrées à Einstein (p. 253-256) et à Pauli (p. 256-258).

13. MEYENN, éd., 1985, p. 402-404.

14. PAULI, 1958a, ici 1961, p. 89.

15. « Pauli à Max Born », 31 mars 1954, in BORN, éd., 1969, p. 285 et 288.

mécanique quantique¹⁶. Insistons sur ce point car l'attitude d'Einstein à l'égard des variables cachées est souvent mal comprise.

3) Initialement, Pauli était attiré par le programme de la théorie du champ unifié, c'est-à-dire la tentative d'unifier la gravitation et l'électromagnétisme en une théorie du champ unifié « naturelle » (*i. e.* sans « forcer » mathématiquement ou physiquement), et son second article était une contribution à l'étude de la théorie proposée par Weyl. Toutefois, il était dès le départ sceptique quant aux espoirs de Weyl et d'Einstein de résoudre le problème de la structure atomistique quantique de la matière et du rayonnement au moyen d'une telle théorie du champ unifié : « Peut-être faisons-nous fausse route dès le départ avec ces théories du continu pour le champ à l'intérieur de l'électron¹⁷. » Dans sa recension de 1920, il raffine cette analyse :

« [Un] doute conceptuel doit être relevé. Les théories du continu font un usage direct du concept ordinaire de force du champ électrique, même pour des champs à l'intérieur de l'électron. Ces forces de champ sont toutefois définies comme forces s'exerçant sur une particule test, et puisqu'il n'existe aucune particule plus petite qu'un électron ou un noyau d'hydrogène, la force du champ s'exerçant en un point donné à l'intérieur d'une telle particule est semble-t-il inobservable, par définition, et par conséquent fictive et dénuée de signification physique. [...] Ceci paraît parfaitement certain : de nouveaux éléments, qui sont étrangers au concept de champ continu, devront être adjoint à la structure de base des théories développées jusqu'à présent pour qu'on arrive un jour à résoudre de façon satisfaisante le problème de la matière¹⁸. »

Même s'il est douteux que Pauli en ait eu connaissance, des doutes encore plus radicaux avaient été exprimés en privé par Einstein dès 1917 :

« Si la conception moléculaire de la matière est correcte (adéquate) ; *i. e.* si une région de l'univers doit être représentée par un nombre fini de points, alors le continu de la théorie actuelle enferme une variété *trop grande* de possibilités. Je crois ainsi que cette "trop grande" [variété] est responsable du fait que nos moyens actuels de description échouent à rejoindre la théorie quantique. Le problème me semble [le suivant :] comment peut-on formuler des jugements sur le discontinu sans faire appel au continu (l'espace-temps) ; [le continu] devrait être banni de la théorie en tant que construction supplémentaire qui ne serait pas justifiée par l'essence même du problème, car il ne correspond à rien de "réel". Mais la structure mathématique nous fait hélas toujours défaut. Comme je me suis épuisé sur cette voie¹⁹ ! »

Bien qu'Einstein passe pour le défenseur du champ continu par excellence, il y a un autre courant de réflexion dans sa pensée, que j'ai désigné comme « L'autre Einstein : Einstein critique de la théorie du champ²⁰ », un courant qui s'amplifie même lors des

16. En ce qui concerne Pauli, voir PAULI, 1953, en ce qui concerne Einstein, voir STACHEL, 1986, p. 376-377.

17. PAULI, 1919. Ce passage est extrait d'ENZ, 1973, p. 768, et modifié ici par l'auteur.

18. PAULI, 1921, traduit à partir de PAULI, 1958b, p. 206.

19. « Einstein letter to Walter Dällenbach », traduit à partir d'EINSTEIN, 1998, p. 391.

20. STACHEL, 1993.

dernières années de sa vie. On trouve des remarques analogues, et même encore plus sceptiques, dans les écrits ultérieurs de Pauli *et* d'Einstein. Néanmoins, par faute de structures mathématiques adaptées au non-continu sur lesquelles il serait possible de fonder une théorie physique, Einstein persévéra dans sa quête d'une théorie du champ unifié jusqu'à la fin de sa vie, avec le sentiment que l'approche par le continu devait être exploré jusqu'au bout.

Les sarcasmes de Pauli pouvaient être ravageurs au sujet des tentatives d'Einstein. En 1931, Pauli écrit :

« Le don inépuisable [d'Einstein] pour l'invention allié à l'énergie obstinée qu'il déploie dans la poursuite d'une fin déterminée nous a valu ces derniers temps à peu près une théorie de ce style par an – et, à ce sujet, ce qui est psychologiquement intéressant, c'est que la dernière théorie en date est habituellement donnée pendant un moment par son auteur comme la "solution définitive". Par conséquent, selon une variante de la phrase historique bien connue, on pourrait s'exclamer à l'apparition d'une de ces nouvelles tentatives sur cette question : "L'ancienne théorie du champ d'Einstein est morte. Vive la nouvelle théorie du champ d'Einstein !" ²¹. »

Cependant, Pauli semble avoir éprouvé une inclinaison persistante pour les théories du champ unifié. Il écrivit deux articles sur l'interprétation projective de l'unification à cinq dimensions de l'électromagnétisme et de la gravitation par Kaluza-Klein, que Valentine Bargmann estime être « de loin la meilleure présentation des spineurs en relativité générale, tout à fait indépendante des problèmes de la théorie du champ unifié ²² ».

4) Pauli s'intéressa précocement aux relations entre mécanique quantique et relativité générale. Toutefois, au moment de son travail fondamental sur la théorie quantique des champs, entrepris avec Werner Heisenberg (1929), il semble avoir présumé que les méthodes propres à leur théorie ne rencontreraient aucune difficulté particulière quand on les appliquerait à la gravitation. Après avoir établi que la quantification du champ gravitationnel s'avère nécessaire pour des raisons physiques, les deux auteurs se contentent d'affirmer qu'on « pourrait la mener à bien sans autre difficulté au moyen d'un formalisme strictement analogue à celui appliqué ici [à l'électromagnétisme] ²³ ».

À une exception notable, la quasi-totalité des physiciens qui travaillèrent sur le problème de la quantification du champ gravitationnel durant la décennie suivante furent associés à Pauli d'une façon ou d'une autre : Léon Rosenfeld, Jacques Solomon et Markus Fierz. À la fin de la décennie, Pauli était en mesure de synthétiser et de prolonger son travail dans une section du rapport sur « Les propriétés générales des particules élémentaires », préparé pour le congrès Solvay prévu pour 1939 qui n'aurait jamais lieu. À la fin de cette section, consacrée aux « Ondes gravitationnelles et quanta gravitationnels (Spin 2) », il observe :

« C'est une limitation certaine de la perspective "théorie quantique" de ce raisonnement que l'on se satisfasse de l'approximation où les équations du champ relativiste généralisé

21. PAULI, 1932.

22. BARGMANN, 1960, p. 197.

23. HEISENBERG et PAULI, 1929, p. 3.

sont linéaires. Cette limitation est très étroitement liée aux problèmes bien connus de divergence en théorie [quantique] des champs²⁴. »

Pauli se réfère alors au travail de 1938 de Solomon. Même s'il ne cite pas les phrases suivantes, il paraît probable qu'il les ait lues :

« [...] dans les cas où le champ de gravitation n'est pas faible, la méthode même de quantification, basée sur le principe de superposition, fait défaut [...]. De telles considérations sont de nature à mettre sérieusement en doute la possibilité de concilier le formalisme *présent* de la quantification des champs avec la théorie *non linéaire* de la gravitation²⁵. »

Solomon fondait ses conclusions sceptiques sur les travaux du physicien soviétique Matvei Petrovitch Bronstein, qui travaillait sur la gravité quantique indépendamment de Pauli, constituant l'exception remarquable à laquelle il a été fait allusion. Malheureusement, aussi bien Bronstein que Solomon périrent (grâce à Staline et Hitler, respectivement) bien avant que la recherche sur la gravité quantique ne redémarre après la Seconde Guerre mondiale.

On trouve une fois seulement durant l'entre-deux-guerres un commentaire de Pauli indiquant qu'il pensait que quelque chose de la plus grande importance pour la théorie des particules élémentaires pouvait être caché au sein de la relativité générale :

« [...] dans les théories classiques contemporaines du champ, y compris dans la théorie relativiste de la gravitation, le caractère essentiellement *positif* de k [la constante gravitationnelle de couplage] – dont dépend le fait que la gravitation se manifeste toujours comme une attraction, et jamais comme une répulsion des masses gravitantes – ne trouve aucune explication satisfaisante. Une telle explication ne pourrait résulter que de la réduction de la constante k au carré d'une autre constante. Ceci suggère de chercher des phénomènes pour lesquels la racine carrée de k joue un rôle²⁶. »

La conjecture de Pauli selon laquelle ce fait pourrait être en relation avec l'interaction faible s'est révélée sans fondement, mais une explication de la nature essentiellement attractive de la gravitation nous échappe toujours.

À la fin de sa vie, Pauli comprit que la théorie quantique des champs n'avaient pas été capable de relever le défi proposé par la relativité générale :

« Eussions-nous été capable de présenter à Einstein une synthèse de sa relativité générale avec la théorie quantique que la discussion avec lui en aurait été considérablement facilitée. Mais la dualité entre le champ et les moyens de le mesurer, quoique présente de manière latente dans l'actuelle théorie quantique des champs, n'est pas clairement exprimé conceptuellement. La relation entre l'application du concept ordinaire d'espace-temps et les propriétés des plus petits objets physiques, les prétendues "particules élémentaires", n'est pas élucidée. La vie d'Einstein s'est achevée sur une question [posée] à la science physique et l'engagement pour nous d'opérer une synthèse²⁷. »

24. MEYENN, éd., 1993, p. 901.

25. SOLOMON, 1938, p. 484.

26. PAULI, 1934, ici 1961, p. 75.

27. PAULI, 1958a, ici 1961. ENZ, 1973, p. 791, publie ce passage en anglais.

Cette tâche nous incombe toujours, et la nature pourrait nous réserver encore bien des surprises dans la poursuite de sa réalisation. En guise d'indication sur les tournants que cette recherche est susceptible de prendre (et sans que nous abondions nécessairement en ce sens), soulignons une ou deux phrases de ce qu'écrivait l'année dernière un avocat patenté de la théorie quantique des champs, Gerard 't Hooft, lauréat du prix Nobel en 1999, dans un article intitulé « Quantum gravity as a dissipative deterministic system » :

« Dans cet article, on élabore une théorie [de la gravitation quantique] en ne postulant pas que les états quantiques en sont le point de départ central, mais plutôt des degrés de liberté déterministes et classiques. Les états quantiques, en tant qu'instruments purement mathématiques, permettant au physicien de faire des prédictions statistiques, seront considérés comme des concepts dérivés, dont la définition ne sera pas formulée de manière strictement locale²⁸. »

De manière générale, aucune voie n'a été encore découverte pour accorder les fondements conceptuels si manifestement divergents de la mécanique quantique et de la relativité générale, les deux théories architectoniques de la physique moderne les plus performantes. Ce problème est de nos jours couramment identifié au problème de la gravité quantique. Deux communautés distinctes de théoriciens de la physique ont travaillé sur ce problème, les chercheurs en théorie quantique des champs et les chercheurs engagés dans la relativité générale. Ceux qui, comme Pauli, sont arrivés à ce problème par le biais de la théorie quantique des champs, qui est fondée sur la relativité restreinte, ont traditionnellement supposé que le cadre quantique actuel est adapté à la solution du problème, et que, si les méthodes de cette théorie ne fonctionnent pas en relativité générale, c'est que celle-ci doit être amendée (par exemple, la supergravité). Einstein supposait que la mécanique quantique ne fournissait pas une description complète de la réalité physique, et que les effets quantiques pourraient s'expliquer dans le cadre d'une théorie du champ unifié, pour laquelle l'exigence de solutions non singulières serait en mesure d'offrir les conditions quantiques requises.

Ces deux espérances ont été déçues. De nos jours, ceux qui abordent le problème de la gravitation quantique par le biais de la relativité générale acceptent généralement qu'un processus de quantification est nécessaire ; mais celui-ci diffère de ceux habituellement employés en théorie quantique des champs relativiste (restreinte) dans la mesure où il doit se conformer à l'invariance fondamentale du groupe de transformation de la relativité générale, le groupe des difféomorphismes. Ceux qui abordent le problème par le biais de la théorie quantique des champs adoptent maintenant habituellement une approche qui prend sa source dans la théorie des cordes dans un espace-temps à dix dimensions ou davantage. Jusqu'ici, aucune de ces deux approches n'est pleinement satisfaisante dans ses propres termes, ni capable d'intégrer la perspective de l'autre. Il existe une minorité croissante, dont font partie Gerard 't Hooft et Roger Penrose, qui pense qu'une nouvelle perspective fondamentale est requise. Entre-temps, le problème de la gravitation quantique demeure le défi incontournable du nouveau millénaire pour la physique théorique.

28. HOOFT, 1999, p. 3264.

En résumé, nous avons vu que ce n'était pas vraiment une divergence de vue sur la signification du déterminisme, ni même sur le rôle du continu dans les évolutions futures de la physique, qui séparait Einstein et Pauli, mais un différend fondamental sur ce qui constitue une représentation objective et déterminée du monde physique. Tant que le défi de la gravitation quantique n'aura pas été relevé, nul ne peut être déclaré vainqueur de cette confrontation.

Achevons cet exposé comme ils finirent leurs vies, sur une note de réconciliation. En dépit de profondes divergences intellectuelles, les rapports personnels de respect et d'affection entre les deux hommes n'ont cessé de croître, en particulier à la suite de longues périodes de fréquentation quotidienne à l'IAS (1935-1936, 1940-1946, et lors des fréquentes visites ultérieures de Pauli). Le point culminant de cette relation advint lors d'un dîner donné à l'IAS pour célébrer la consécration de Pauli par le prix Nobel de physique en 1945, une récompense pour laquelle Einstein l'avait, parmi d'autres, nommé. Au milieu de l'allocution qui suivit ce repas, Einstein parut à l'improviste, « tel un Grec ancien » (selon les mots de Franca Pauli ²⁹). À la mort d'Einstein, Pauli évoqua ce discours :

« La mort d'Einstein m'affecte aussi personnellement. Celui qui fut pour moi un si bienveillant et paternel ami n'est plus. Je n'oublierai jamais le discours qu'il fit en 1945 à Princeton à mon intention et en mon honneur après que j'eus reçu le prix Nobel. Il était pareil à un roi abdiquant et m'adoubant, tel un "fils préféré" [*Wahl-Sohn*], comme son successeur³⁰. »

John STACHEL
(novembre 2000).

Traduction de l'anglais par Vincent Bontems.

29. Charles Enz, communication personnelle, Centre européen de la recherche nucléaire (CERN).

30. Lettre à Max Born, 24 avril 1955, CERN (Pauli Letter Collection). Pauli ajoute : « Il ne reste malheureusement aucune trace de ce discours d'Einstein, qui était improvisé et dont le manuscrit n'existe pas davantage. » Remercions le D^r Enz d'avoir porté cette lettre à notre attention, ainsi que pour ses nombreuses remarques qui nous ont été d'une aide précieuse. Sa biographie (ENZ, 2001) de Pauli fera sans aucun doute autorité dans les temps à venir. Remercions également M^{me} Anita Hollier (Section Leader, CERN Archives ETT-SI Division) pour nous avoir fourni une copie de la version allemande du texte et de l'article de journal au sujet d'Einstein II.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- BARGMANN (Valentine), 1960, « Relativity », in FIERZ (Markus) et WEISSKOPF (Victor F.), éd., *Theoretical physics in the XXth century. A memorial volume for Wolfgang Pauli*, New York/Londres, Interscience, p. 187-198.
- BOHR (Niels), 1960, « Forword », in FIERZ (Markus) et WEISSKOPF (Victor F.), éd., *Theoretical physics in the XXth century. A memorial volume for Wolfgang Pauli*, New York/Londres, Interscience, p. 1-4.
- BORN (Max), éd., 1969, *Albert Einstein, Hedwig und Max Born. Briefwechsel 1916-1955*, Munich, Nymphenburger.
- EINSTEIN (Albert), 1998, *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. VIII-A : *The Berlin Years. Correspondence 1914-1917*, Princeton, Princeton University Press.
- EINSTEIN (Albert) et PAULI (Wolfgang), 1943, « Non-existence of regular stationary solutions of relativistic field equations », *Annals of Mathematics*, 44, p. 131-137.
- EISENSTAEDT (Jean), 1986, « La relativité générale à l'étiage. 1925-1955 », *Archive for History of Exact Sciences*, 35, p. 115-185.
- EISENSTAEDT (J.), 1989, « The low water mark of general relativity, 1925-1955 », in HOWARD (Don) et STACHEL (John), éd., *Einstein and the history of general relativity*, Proceedings of the 1986 Osgood Hill conference, Boston, Birkhäuser (Einstein Studies, vol. I), p. 277-292.
- ENZ (Charles P.), 1973, « W. Pauli's scientific work », in MEHRA (Jagdish), éd., *The Physicist's concept of nature*, Dordrecht, Reidel, p. 766-799.
- ENZ (C. P.), 2001, *Everything comes to him who knows how to wait. A biography of Wolfgang Pauli*, Oxford, Oxford University Press.
- HEISENBERG (Werner) et PAULI (Wolfgang), 1929, « Zur Quantenelektrodynamik der Wellenfelder », *Zeitschrift für Physik*, 56, p. 1-61.
- HOOFT (Gerard 't), 1999, « Quantum gravity as a dissipative deterministic system », *Classical and Quantum Gravity*, 16, p. 3263-3279.
- MEYENN (Karl von), WEISSKOPF (Victor F.) et HERMANN (Armin), éd., 1979, *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.*, vol. I : 1919-1929, New York/Heidelberg/Berlin, Springer.
- MEYENN (Karl von), éd., 1985, *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.*, vol. II : 1930-1939, Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo, Springer.
- MEYENN (K. von), éd., 1993, *Wolfgang Pauli. Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a.*, vol. III : 1940-1949, New York/Heidelberg/Berlin, Springer.
- PAULI (Wolfgang), 1919, « Zur Theorie der Gravitation und der Elektrizität von Hermann Weyl », *Physikalische Zeitschrift*, 20, p. 457-467.
- PAULI (W.), 1921, « Relativitätstheorie », in SOMMERFELD (Arnold), éd., *Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften*, Leipzig, Teubner, vol. V, part. 2, p. 539-775.
- PAULI (W.), 1932, *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*, Bd X : *Die Naturwissenschaften*, 20, p. 186-187.
- PAULI (W.), 1934, « Raum, Zeit und Kausalität in der modernen Physik », in PAULI, 1961, p. 64-75.
- PAULI (W.), 1949, « Einstein's contributions to quantum theory », in SCHILPP (Paul Arthur), *Albert Einstein : philosopher-scientist*, La Salle, IL, Open Court Publishers (Library of Living Philosophers, 7), p. 147-160.

- PAULI (W.), 1953, « Remarques sur le problème des paramètres cachés dans la mécanique quantique et sur la théorie de l'onde pilote », in GEORGE (André), éd., *Louis de Broglie. Physicien et penseur*, Paris, Albin Michel, p. 33-42.
- PAULI (W.), 1956, « Relativitätstheorie und Wissenschaft », in PAULI, 1961, p. 76-80.
- PAULI (W.), 1958a, « Albert Einstein in die Entwicklung der Physik », in PAULI, 1961, p. 85-90.
- PAULI (W.), 1958b, *Theory of relativity*, trad. de PAULI, 1921, par G. FIELD (avec les notes complémentaires de l'auteur), Londres/New York/Paris/Los Angeles, Pergamon.
- PAULI (W.), 1961, *Aufsätze und Vorträge über Physik und Erkenntnistheorie*, Brunswick, Vieweg.
- PEIERLS (Rudolph), 1985, *Bird of passage. Recollections of a physicist*, Princeton, Princeton University Press.
- SOLOMON (Jacques), 1938, « Gravitation et quanta », *Revue de physique et du radium*, 9, p. 479-485.
- SOLVAY (Ernest), éd., 1928, *Électrons et photons. Rapports et discussions du cinquième conseil de physique tenu à Bruxelles du 24 au 29 octobre 1927 sous les auspices de l'Institut international de physique Solvay*, Paris, Gauthier-Villars.
- STACHEL (John), 1986, « Einstein and the quantum. Fifty years of struggle », in COLODNY (Robert), éd., *From quarks to quasars. Philosophical problems of modern physics*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, p. 349-385.
- STACHEL (J.), 1993, « The other Einstein. Einstein contra field theory », *Science in Context*, 6, p. 275-290.
- STACHEL (J.), 1995, « History of relativity », in BROWN (Laurie M.), PAIS (Abraham) et PIPPARD (Brian), éd., *Twentieth-century physics*, Bristol/Philadelphie, Institute of Physics Publications/American Institute of Physics Press, vol. I, p. 249-356.