RÉFLEXIONS SUR WOLFGANG PAULI

Jürg FRÖHLICH

J'ai la tâche difficile de vous présenter quelques réflexions sur Wolfgang Pauli, le physicien génial, l'homme, et son époque. La raison banale est qu'en avril on a célébré le 100^e anniversaire de sa naissance, et notre relation un peu superstitieuse avec le système décimal nous invite à marquer un tel événement. Une raison plus profonde est que les empreintes des activités et de la personnalité de Pauli sont encore bien perceptibles en Suisse et en Europe centrale. Ces activités et les circonstances de la vie de Pauli doivent apparemment avoir eu un caractère exceptionnel et méritent donc bien une certaine réflexion. Je parle ici en tant que professeur de physique théorique à l'ETH de Zurich, où Pauli a passé la plupart de sa vie professionnelle. Je suis trop jeune pour avoir eu la chance de faire sa connaissance, ou pour m'occuper de l'histoire de la science. Je vous parle donc de Pauli sans prétention quelconque ! Mon exposé est divisé en trois parties : I. Wolfgang Pauli, l'homme de science et le génie ; II. Un chapitre sombre de l'histoire de la Suisse et de l'ETH ; III. De la bonne et de la mauvaise influence de Pauli sur le développement de la physique.

I. – WOLFGANG PAULI, L'HOMME DE SCIENCE ET LE GÉNIE

Quand je parle de l'œuvre scientifique de Pauli, je dois commencer avec quelques remerciements. Tout ce que je sais sur Pauli et son œuvre, je l'ai appris de Res Jost, Markus Fierz, Walter Hunziker et surtout de Norbert Straumann. Je leur en suis profondément reconnaissant !

Commençons en évoquant une évidence : Pauli comptait indéniablement parmi les plus grands physiciens de la première moitié du xx^e siècle. Quoiqu'il est probable que le quotient d'intelligence de Pauli était supérieur à ceux de tous ces collègues, à l'exception de quelqu'un comme John von Neumann, ses contributions scientifiques n'ont pas le caractère révolutionnaire, le poids et l'importance de celles de Max Planck, d'Albert Einstein, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger et Paul Dirac, qui ont bouleversé les fondements de la physique.

Pauli est né quand Max Planck a découvert la théorie quantique de la lumière, c'est-à-dire du champ électromagnétique. Cette année, on célèbre donc le 100^e anniversaire de la découverte de la théorie quantique et de la naissance de Pauli ! On pourrait spéculer sur le génie de l'an 1900 qui expliquerait que parmi les contributions scientifiques les plus importantes de Pauli on trouve ses travaux sur le développement de la mécanique

quantique et la théorie quantique des champs. Parler des contributions scientifiques principales de Pauli est assez facile : il n'y a aucun doute sur les textes dont il est question.

I. 1. – Contributions aux théories de la relativité

Il s'agit ici de la critique de la théorie unifiée d'Hermann Weyl et de l'article de 1' *Encyclopédie des sciences mathématiques* (fondée par Félix Klein) sur les théories de la relativité d'Einstein. Avec ces travaux clairs et tranchants, que Pauli accomplit entre 19 et 21 ans, il fit sa réputation de jeune génie, d'un calibre tout à fait exceptionnel, dans l'opinion des plus grand théoriciens de l'époque comme Einstein, Arnold Sommerfeld, Max Born et Hermann Weyl. Ces quelques réflexions sur Pauli ne permettent pas de développer ce point. Qu'il suffise de dire que Pauli a très bien reconnu les faiblesses de la théorie de Weyl en découvrant par exemple qu'elle donne un résultat ambigu pour le mouvement du périhélie de la planète Mercure. Mais il a surtout démontré qu'il était un maître sans pareil de l'exposition limpide d'une théorie physique très complexe. Il l'a prouvé encore avec ses articles sur la théorie quantique ancienne de Planck, Bohr et Sommerfeld, et par les « Principes généraux de la mécanique ondulatoire », paru dans le *Handbuch der Physik* en 1933 – « l'ancien et le nouveau testament » de Pauli. Cet article sur la mécanique ondulatoire est peut-être le plus remarquable, du moins pour ceux qui s'intéressent non seulement à la science mais aussi à la personnalité de Pauli. Il montre bien la modestie de Pauli concernant ses propres contributions, sa générosité envers ses collègues comme Heisenberg, Jordan et Schrödinger, son intellect brillant, original et pénétrant, et l'ombre du côté irrationnel de son esprit.

I. 2. – Le principe d'exclusion de Pauli et le spin de l'électron

Au début de l'année 1925, l'année de la naissance de la mécanique quantique moderne, Pauli publie dans la *Zeitschrift für Physik* un article intitulé « Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren ». Cet article se situe encore dans le cadre de la théorie quantique ancienne. Il est le résultat d'un travail énorme, de beaucoup de peine, qui vaudra à son auteur le prix Nobel de l'année 1945. Dans ce texte et les deux articles précédents, Pauli décrit les faits expérimentaux sur les spectres des atomes, les règles d'interprétation de ces spectres et son point de départ théorique avec une clarté exemplaire. D'une sûreté de somnambule il n'utilise que des faits et des principes qui survivront au passage de la théorie quantique ancienne à la mécanique quantique moderne. Il n'est pas possible ici de décrire les arguments qui ont amené Pauli à la découverte du principe d'exclusion et du spin de l'électron. À ceux qui s'intéressent à l'histoire des idées, je recommande la lecture de l'article de Norbert Straumann « Über Paulis wichtigste Beiträge zur Physik » (version écrite de la conférence prononcée au *symposium* « Wolfgang Pauli und die Moderne Physik », tenu à Zurich, à l'ETH en 2000).

Résumons le résultat de l'analyse de Pauli. Il caractérise chaque état d'un électron dans l'enveloppe d'un atome par 4 nombres quantiques :

$$n, l, j, m_j, \text{ où } m_j = -j, -j + 1 \dots j, \text{ et } j = l \pm \frac{1}{2}.$$

On interprète n comme nombre quantique principal, l comme moment cinétique orbital, j comme moment cinétique total et m_j comme nombre quantique magnétique. Du nombre quantique

$$s = |j - l| = \frac{1}{2}$$

qui apparaît dans la structure de doublets des spectres des atomes alcalins, Pauli dit : « *Die Dublett-Struktur der Alkalispektren [...] kommt durch eine eigentümliche, klassisch nicht beschreibbare Art von Zweideutigkeit der quantentheoretischen Eigenschaften des Leuchtelektrons zustande.* » C'est ainsi que Pauli découvre le spin de l'électron.

Le principe d'exclusion est formulé par Pauli de façon à ce que chaque état quantique – caractérisé par les nombres quantiques n, l, j, m_j – reste vide ou ne soit occupé que par un seul électron. Ainsi, Pauli réussit à clarifier la théorie de l'effet Zeeman, à déduire systématiquement les valeurs du facteur g de Landé, à calculer la multiplicité des niveaux d'énergie d'atomes complexes et à caractériser les couches fermées des atomes. Après la découverte de la mécanique quantique moderne en 1925-1926, le principe d'exclusion de Pauli sera reformulé, en 1926-1927, par Dirac, Heisenberg et, sous sa forme générale, par Eugene Wigner, comme la loi selon laquelle *chaque fonction d'onde d'un système d'un nombre quelconque d'électrons doit être complètement antisymétrique sous tout échange d'électrons.*

En 1926, le grand travail de Born, Heisenberg et Jordan, la « *Drei-Männer-Arbeit* » paraît dans la *Zeitschrift für Physik*. Il contient, parmi d'autres résultats fondamentaux sur la mécanique quantique, la théorie quantique du moment cinétique et, comme cas particulier, du spin. En 1927, après la découverte par Schrödinger de son équation d'onde, Pauli trouve, en utilisant la théorie quantique du spin, la forme définitive de l'équation de Schrödinger pour un électron quantique non-relativiste dans un champs électromagnétique externe arbitraire. Cette équation porte le nom d'équation de Pauli.

L'équation de Pauli et son principe d'exclusion forment la base de toute la physique quantique des atomes, molécules, gaz, liquides, solides et même de quelques aspects de la physique des étoiles. Ils suffisent, en principe, pour comprendre la stabilité de la matière quantique non-relativiste (Dyson-Lenard, Lieb-Thirring), la théorie de phénomènes comme le magnétisme et la supraconductivité, la limite de Chandrasekhar sur la masse des étoiles et beaucoup d'autres phénomènes du monde quantique. Aux personnes qui s'intéressent à cette histoire passionnante, on ne peut que recommander le livre d'Elliott H. Lieb, *The Stability of matter. From atoms to stars* (Berlin, Springer, 1991). Une généralisation de l'équation de Pauli de l'espace physique à des variétés riemanniennes plus générales peut servir comme point de départ de la géométrie différentielle et du théorème de l'indice d'Atiyah et Singer.

I. 3. – L'hypothèse du neutrino

En 1914, James Chadwick découvre le spectre continu d'énergies dans la désintégration radioactive β . En 1925, Ralph Kronig montre que le spin du noyau d'azote est égal à 1, au lieu d'être demi-entier (comme l'avait prédit le modèle de Rutherford) ; en 1929 Heitler et Herzberg concluent que ce noyau n'obéit pas au principe d'exclusion, mais qu'il est un boson. Vers la fin de l'année 1930, Pauli fait un effort remarquable pour résoudre ces énigmes paradoxales en stipulant l'existence d'une nouvelle particule

neutre et de spin $\frac{1}{2}$. Des données expérimentales connues en 1930, Pauli conclut que la masse de cette particule doit être très petite en comparaison avec celle du proton et que son moment magnétique doit être minuscule. Il l'appelle « neutron ».

Quand la particule maintenant appelée « neutron » est découverte par Chadwick en 1932, Enrico Fermi donnait le nom de « neutrino » à la particule dont l'existence avait été prédite par Pauli. Tandis que le neutron de Chadwick apportait la solution au problème du faux spin et de la fausse statistique des noyaux, le neutrino de Pauli résolvait le problème du spectre continu dans la désintégration β et sauvait ainsi les lois de conservation d'énergie-impulsion et du moment cinétique. Le neutrino est un composant essentiel de la théorie des interactions faibles ; il détient un rôle proéminent dans l'astrophysique. Des expériences avec des rayons de neutrinos à haute énergie ont joué un rôle essentiel dans les premiers tests du modèle standard de Glashow, Salam et Weinberg. À l'heure actuelle, des expériences qui cherchent à déterminer la masse des neutrinos ont été réalisées ; d'autres sont envisagées. Elles suggèrent que les neutrinos ont des masses petites mais qui ne sont pas nulles.

I. 4. – Théories relativistes des champs

Une théorie quantique relativiste prend la forme d'une théorie de champs. Elle décrit des systèmes physiques à un nombre infini de degrés de liberté. Pauli a apporté des contributions importantes à la théorie générale des champs en collaboration avec Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Victor Weisskopf, Markus Fierz, Félix Villars, et d'autres. Il trouve une manière d'écrire les règles de commutations fondamentales de la théorie des champs qui est compatible avec la théorie spéciale de la relativité. Il commence à voir les contours d'une connexion générale entre le spin et la statistique des champs et des particules :

spin, s , demi-entier $\leftrightarrow$ principe d'exclusion valable,

spin, s , entier $\leftrightarrow$ statistique de Bose-Einstein.

Plus tard, après un travail fondamental de Fierz, Pauli trouve une démonstration élégante du théorème sur la connexion entre spin et statistique. Il formule ensuite une version assez générale du théorème selon laquelle l'opération CPT – inversion du temps, suivie d'une réflexion de l'espace, puis d'une conjugaison de charge – est une symétrie de toute théorie relativiste de champs causale, dont la forme générale sera découverte par Jost. Entre temps, nous avons appris que le théorème de la connexion entre spin et statistique et le théorème CPT sont des conséquences d'une théorie profonde concernant les algèbres d'opérateurs : la théorie de Tomita-Takesaki. Cette théorie et la causalité d'Einstein fournissent une « explication » fondamentale du principe d'exclusion.

Pauli apporta quelques contributions importantes à l'électrodynamique quantique. Mais sa découverte la plus intéressante et la plus profonde dans le domaine de la théorie des champs est peut-être celle qui concerne les théories de jauge non abéliennes. On les appelle « théories de Yang-Mills » ; elles jouent un rôle fondamental dans la théorie des particules, en particulier dans le modèle standard. Pauli a trouvé un exemple d'une théorie de jauge non abélienne en généralisant la théorie de Kaluza et Klein, qui représente un

essai d'unification de l'électromagnétisme avec la gravitation. Pauli considère une généralisation de la relativité générale qui parte d'un espace-temps de la forme :

$$(\text{espace-temps physique}) \times (\text{sphère } S^2).$$

Le groupe de symétrie de la sphère étant le groupe des rotations $SO(3)$, Pauli identifie ce groupe comme groupe de jauge de sa théorie. Il paraît que Pauli n'a jamais achevé son étude, parce qu'il a constaté que son champs de jauge décrivait des modes de masse nulle – ce qui ne paraissait pas acceptable physiquement. Il n'existe donc qu'une lettre de Pauli à Abraham Pais sur ce sujet et des notes d'une conférence de Pauli.

II. – UN CHAPITRE SOMBRE DE L'HISTOIRE DE LA SUISSE ET DE L'ETH

On connaît l'histoire des efforts restés vains de Pauli afin d'obtenir la nationalité suisse avant la Seconde Guerre mondiale et celle des relations pénibles entre l'ETH et Pauli après son départ pour les États-Unis, en 1940, grâce à l'ouvrage fort intéressant de Charles Enz, Beat Glaus et Gerhard Oberkofler. À eux d'en parler !

Quelques-uns des faits principaux sont bien connus : Pauli avait des origines juives. Depuis l'annexion de l'Autriche par le III^e Reich, il avait la nationalité allemande. Si l'Allemagne avait attaqué la Suisse, la vie de Pauli aurait été en grave danger. N'ayant pas obtenu la nationalité suisse, Pauli accepta une invitation à l'Institute for Advanced Study et partit aux États-Unis. On peut soupçonner les autorités politiques et les services de police suisses d'avoir su que Pauli ne pourrait pas revenir des États-Unis avant la fin de la guerre, parce qu'il ne recevrait ni la permission des États-Unis de partir ni celle de la Suisse de rentrer. Néanmoins, certaines instances de la faculté de l'ETH, et même le *Schulrat*, commençaient à presser Pauli de revenir à l'ETH, sous peine d'être contraint de le remplacer. Ce procédé dura même après la guerre et ne prit fin qu'au moment où Pauli reçut le prix Nobel.

Pourquoi ce comportement honteux des autorités politiques, des services de police et d'une bonne partie de l'ETH ? Il n'y a pas de réponse simple à cette question, mais les motifs suivants semblent bien avoir été impliqués : un courant antisémite assez important ; une mentalité anti-élitiste assez répandue en Suisse ; une méfiance envers les personnes hors du commun et les étrangers ; un esprit mesquin. Quand on parle de ces propriétés de beaucoup de nos compatriotes on n'a, malheureusement, aucune raison d'utiliser l'imparfait ! Il faut et il faudra tirer des leçons des exemples de sort comme celui de Pauli. Dans son cas, il y aurait eu deux solutions possibles, une bonne et une moins bonne. La bonne solution aurait été de lui accorder la nationalité suisse en 1938, au plus tard. Étant donné que la bonne solution avait échoué, l'ETH aurait pu créer une deuxième chaire de physique théorique et attendre le retour de Pauli d'une manière gracieuse et confiante.

Je crains que, jusqu'à présent, on n'ait quasiment rien appris de cette affaire. Décidé à ne pas en rester au pessimisme, j'ajoute ce qui me donne un peu d'espoir : le père de Pauli, Wolfgang Josef, recevait la permission d'immigrer en Suisse et de travailler à l'université de Zurich. Il a donc été sauvé par l'action de quelques-uns de nos concitoyens, comme le professeur Paul Karrer. Probablement est-ce toujours une petite

minorité de personnes qui comprennent les difficultés des situations et ont le courage et la sagesse d'essayer de les surmonter.

III. – DE LA BONNE ET DE LA MAUVAISE INFLUENCE DE PAULI SUR LE DÉVELOPPEMENT DE LA PHYSIQUE

Quand on essaie de se rendre compte de l'œuvre de Pauli, on s'aperçoit qu'il réalisait ses découvertes les plus fondamentales – à savoir le spin de l'électron et son principe d'exclusion, l'hypothèse du neutrino – quand il partait d'un ensemble riche de données expérimentales concrètes et précises qu'il n'interprétait pas dans le cadre d'une théorie ou de modèles déjà connus, mais qu'il tentait au contraire d'ordonner en partant de principes et d'arguments généraux et assez conservateurs, comme par exemple les « règles de somme », les lois de conservation et les principes de symétrie associés. Dans l'exemple du spin de l'électron, du principe d'exclusion et de l'hypothèse du neutrino, cette attitude, cette « stratégie » de recherche l'amena à faire des découvertes tout à fait inattendues et assez révolutionnaires ne pouvant être menées à leur terme que par quelqu'un qui – sachant bien se servir des mathématiques comme outil de travail – possédait une exceptionnelle force pénétrante de la pensée et une clarté intellectuelle hors du commun. Dans ces exemples, l'évidence tirée des données expérimentales en faveur de l'idée que des théories déjà connues n'expliquaient pas les faits expérimentaux était assez éclatante, et ces faits expérimentaux servaient de guide fiable à la spéculation théorique.

Pauli suivait ses propres spéculations et sa pensée théorique, ainsi que celle de ses collègues et confrères avec un esprit critique perçant et incisif. Son intellect, son génie, sa critique redoutée, son intégrité intellectuelle et le champ de force qui émanait de sa personnalité singulière et un peu angoissante impressionnaient et influençaient tout ceux qui le rencontraient – collègues, étudiants, disciples. La plupart de ceux qui croisaient sa voie sentaient quelque chose de la tension entre le côté lumineux et le côté sombre, le côté rationnel et le côté irrationnel de la personnalité de Pauli. Il les fascinait ! C'est peut-être la peur du côté sombre et irrationnel de son esprit et de son psychisme qui incitait Pauli à se méfier de la pure spéculation théorique, des sauts peu logiques dans l'argumentation théorique et des images et métaphores peu précises mais intuitives, comme par exemple celle de Goudsmit et Uhlenbeck (qui interprétaient le spin de l'électron comme moment cinétique d'une petite boule tournante). C'est peut-être cette peur de son côté sombre et illogique qui poussait Pauli à redouter l'inspiration géniale, mais *a priori* peu compréhensible et peu logique. Quoique Pauli avait un don tout à fait exceptionnel pour les mathématiques, il ne faisait pas confiance à l'usage d'arguments purement mathématiques formels ou de nature esthétique en physique (sauf quand ils ont des racines dans des lois naturelles déjà connues ou dans des données expérimentales). Pauli utilisait les mathématiques comme outil, non pas comme source d'inspiration et guide. Ainsi, il ne se fia pas à sa découverte, faite à l'aide d'arguments formels mathématiques, de la théorie de jauge non-abélienne malgré la nature concise et esthétique de cette théorie. Il croyait avoir des arguments montrant que cette théorie ne correspondrait pas à la nature. Il ne publia donc pas cette découverte fondamentale !

Tout ce dont Pauli se méfiait, tout ce à quoi il ne faisait pas confiance, il le critiquait d'une manière dure et incisive quand il le rencontrait chez ses collègues et ses élèves. Sa critique était redoutée et prise au sérieux par la communauté scientifique. Or, il y avait beaucoup de découvertes fondamentales en physique qui n'apparaissaient pas d'une manière forcée ou du moins mathématiquement logique, qui ne provenaient pas des données expérimentales déjà connues, qui étaient comme le fruit inattendu d'une inspiration. On pourrait citer la découverte de la loi de Planck, celle de la mécanique des matrices par Heisenberg, ou l'interprétation statistique de la fonction d'onde par Born ! Se priver des arguments heuristiques, des sauts illogiques, de l'inspiration intuitive et de la spéculation formelle de nature mathématique ferait de la physique une science assez austère et peu féconde. Et même si l'on préfère une telle approche austère de la science, qui reste proche des données expérimentales et des principes généraux fiables, il ne faudrait jamais essayer de l'imposer aux autres, ou les critiquer sévèrement, parce qu'ils adoptent une autre démarche. Il faut avoir l'esprit ouvert et tolérant et donner de l'espace à l'imagination libre ! Par sa critique incisive et presque méchante, justifiée ou non, Pauli eut une mauvaise influence sur l'imagination et le succès de certains de ses élèves, surtout sur Stückelberg qui aurait peut-être pu avoir un prix Nobel si Pauli ne l'avait pas découragé de poursuivre et de publier ses découvertes (le méson de Yukawa, la forme covariante de la théorie des perturbations...).

De bonne influence par sa générosité et son intégrité intellectuelle, son esprit lucide et sa critique perçante, de mauvaise influence par sa critique acerbe, par un certain manque d'ouverture d'esprit, de tolérance et de confiance dans la force de l'intuition et le « darwinisme » en science, Pauli se priva de quelques découvertes fondamentales et poussa la physique théorique en Suisse dans une direction un peu austère et formelle. À la jeune génération d'essayer de faire mieux !

Jürg FRÖHLICH*
(novembre 2000).

* Jürg FRÖHLICH est professeur de physique théorique à l'École polytechnique fédérale de Zurich. Spécialiste de physique mathématique, ses recherches portent sur la mécanique quantique, la théorie des champs et la mécanique statistique (Institut de physique théorique, ETH-Hönggerberg, CH-8093 Zurich, juerg@itp.phys.ethz.ch).