

La vie de Wolfgang Ernst Pauli (1900-1958)

Jean-Claude Boudenot, Thalès, 91767 Palaiseau

Un des plus grands physiciens du XX^e siècle, découvreur du principe d'exclusion et du neutrino, prix Nobel de physique en 1945, Wolfgang Pauli était un personnage original et complexe, objet d'anecdotes innombrables.

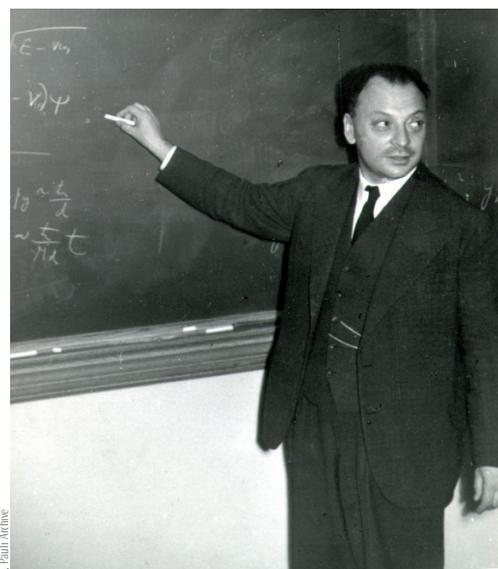
À l'occasion du 50^e anniversaire de la mort de Pauli, notre regretté collègue Jean-Claude Boudenot retrace la vie et la carrière de ce physicien exceptionnel.

Nous dédions cet article à la mémoire de Jean-Claude.

Naissance et enfance à Vienne, études à Munich

Wolfgang Ernst Friedrich Pauli naît à Vienne, le 25 avril 1900. Son second prénom lui vient de son parrain, le physicien Ernst Mach. Son père, Wolfgang Josef Pascheles, était professeur de médecine à l'université de Vienne, tandis que sa mère, Camilla Pauli-Schütz, était une spécialiste de littérature dramatique et auteure d'un livre sur la Révolution française. Le jeune Wolfgang entre au *Döbling Gymnasium* à l'âge de dix ans. Très jeune, il « dévore » les livres de mathématiques et de physique, en particulier ceux que lui conseille son parrain¹. Ce n'est cependant pas un élève modèle ; certes, il se révèle excellent en mathématiques, physique et philosophie, mais médiocre en latin et grec. Lors de sa dernière année au *Döbling Gymnasium*, il sera dans une classe surnommée depuis « la classe des génies ». En effet, parmi ses 26 camarades se trouvent Richard Kuhn, qui recevra le prix Nobel de chimie en 1938, Herbert Winkler qui sera un grand chef d'orchestre, Hans Thiming et Gustav Diessl qui deviendront des acteurs célèbres. Wolfgang reçoit son diplôme le 2 juillet 1918. Cette année-là, alors qu'il n'a que dix-huit ans, il publie deux travaux originaux sur la relativité générale qui le font remarquer de la communauté scientifique en général et de Hermann Weyl en particulier.

Sa réputation est déjà grande lorsqu'il rejoint l'université de Munich, le 4 octobre 1918. Son professeur n'est autre qu'Arnold Sommerfeld, dont il suivra le cursus de physique de trois ans. Ce dernier l'encourage à écrire un article sur la relativité générale dans l'*Encyclopédie des Mathématiques*. Einstein est impressionné par l'article et ahuri par l'âge de l'auteur ; il écrit : « Aucun de ceux qui liront ce travail remarquable, qui est d'une maturité impressionnante, ne pourra croire que son auteur n'a que 21 ans. Car on ne sait ce qu'il faut le plus admirer : la compréhension du développement des idées, la sûreté des déductions mathématiques, la profondeur des intuitions physiques, l'aptitude à présenter les choses avec clarté, la connaissance de la littérature spécialisée, l'exhaustivité du propos, ou bien la finesse de la critique. » Pauli a une méthode bien



Wolfgang Pauli devant un tableau noir à Princeton.

à lui pour étudier : il passe ses soirées dans les cafés et, au cœur de la nuit, se met à potasser les livres de physique. Cela ne l'empêche pas d'obtenir son doctorat, sur la description quantique de l'ion moléculaire H_2^+ , avec la mention *Summa cum laude* à 21 ans.

Assistant à Göttingen, puis à Hambourg ; le principe d'exclusion

Il rejoint alors Göttingen, où il devient, en octobre 1921, l'assistant de Max Born. Ce dernier confiera plus tard à Einstein « que de toute sa vie il n'aura plus jamais un aussi bon collaborateur ». À Göttingen, Pauli poursuit les travaux initiés dans sa thèse et développe, avec Max Born, une formulation générale de la théorie des perturbations pour l'appliquer à l'atome d'hélium et aux atomes plongés dans des champs magnétiques ou électriques. À Göttingen il rencontre Niels Bohr, ainsi que Werner Heisenberg, Paul Ehrenfest et Oskar Klein.

En avril 1922, il part pour Hambourg pour devenir l'assistant de Wilhelm Lenz, le titulaire de la chaire de physique théorique. L'Allemagne est alors en pleine crise économique. À la suite d'une conférence donnée par Bohr et après quelques minutes de conversation, ce dernier l'invite à le rejoindre à Copenhague pour un

séjour d'un an. Pauli revient ensuite à Hambourg, où il passe sa thèse d'habilitation en 1924.

C'est à 24 ans, le 16 janvier 1925, que Pauli énonce le fameux principe d'exclusion qui ne tardera pas à porter son nom. La même année, il calcule avec le nouveau formalisme d'Heisenberg (la mécanique des matrices) les niveaux de l'atome d'hydrogène, ce qui exige une « habileté de magicien ». Pauli, qui était redevenu sobre, se remet à goûter à l'alcool ; il écrit lui-même : « Quand je suis venu à Hambourg je suis passé, sous l'influence de Stern, directement de l'eau minérale au champagne. »

Première période à Zurich ; le neutrino

Fin 1927, suite au départ de Peter Debye, le poste de professeur de physique au Polytechnicum de Zurich (ETH) se libère ; Pauli est choisi pour succéder au grand physico-chimiste, et notre physicien arrive en Suisse en avril 1928. Cette période est toutefois difficile pour lui. Sa mère, lassée des infidélités de son mari, se suicide le 15 novembre 1927. Son père se remarie très vite avec une femme que Wolfgang ne supporte pas. Pauli fréquente alors les bars et se met à boire. Il y rencontre une jeune danseuse de 22 ans, Luise Margarete Käthe (Kate) Deppener et l'épouse le 23 décembre 1929, sans même bien la connaître. Le mariage est un fiasco, la jeune femme quitte Wolfgang pour un chimiste, Paul Goldfinger, qu'elle connaissait avant son mariage et que finalement elle épousera en seconde noce. Pauli réagit ainsi : « Si elle avait choisi un matador, j'aurais pu me battre, mais contre un chimiste médiocre, quoi faire ? » Wolfgang et Kate divorcent le 26 novembre 1930, le mariage aura duré moins d'un an. Notre physicien sombre encore un peu plus et va jusqu'à participer à des rixes d'ivrognes dans les tavernes de la ville. Son père lui conseille de voir le psychanalyste Carl Jung. Il entamera une analyse, d'abord avec Erna Rosenbaum, puis avec Jung lui-même. L'analyse se termine en 1934, mais les deux hommes correspondront jusqu'à la mort de Pauli.

Les problèmes personnels de Pauli n'entament pas sa créativité scientifique. Une réunion importante doit se tenir à Tübingen où les meilleurs physiciens



Automne 1925. Max Born (à gauche) et Wolfgang Pauli à Hambourg.



Octobre 1934 à Genève. Wolfgang Pauli (à droite) et Arnold Sommerfeld.

nucléaires vont se réunir pour discuter en particulier de la crise ouverte par la découverte, par Chadwick, du spectre continu β . Pauli préfère rester à Zurich pour aller au bal. Il écrit à « Mesdames et Messieurs radioactifs » (voir encadré p. 22) pour leur faire part de son hypothèse suivant laquelle la continuité du spectre β est compatible avec la conservation de l'énergie à condition de supposer l'existence d'une nouvelle particule, qu'il appelle *neutron* (et qui sera rebaptisée *neutrino* par Fermi en 1932). Ce n'est toutefois pas avant le 7^e conseil Solvay, en octobre 1933, que Pauli exposera en public son hypothèse. Ce n'est que le 15 juin 1956 que l'existence du neutrino sera confirmée expérimentalement !

En 1931 une très grande marque de reconnaissance est faite à notre physicien : il reçoit la seconde médaille d'or de Lorentz (la première a été attribuée à Planck en 1927). Pauli travaille alors sur les fondements de la mécanique quantique et sur l'interprétation de Copenhague. Il écrit, en 1933, un article de synthèse, « Les principes généraux de la mécanique ondulatoire », dans le *Handbuch der Physik*^{2, 3}, d'une grande profondeur et aussi apprécié que son article sur la relativité générale de 1921. Cet article sera rapidement baptisé par les physiciens le « Nouveau Testament » !

Du point de vue personnel, la vie de Pauli s'éclaircit. Il rencontre Franziska (Franca) Bertram, la secrétaire d'un homme politique suisse. Pauli, qui va avoir 34 ans, épouse Franca, qui en a 32, à Londres le 4 avril 1934. C'est un mariage d'amour tendre et le couple sera épanoui.

Du point de vue scientifique, Pauli est toujours aussi productif : dans une lettre adressée à Heisenberg le 7 novembre 1934, il lui fait part d'une connexion entre le *spin* et les statistiques quantiques, qui sera connue sous le nom de « théorème *spin*-statistique »⁴.

Entre Zurich et Princeton ; la guerre et le prix Nobel

Quatre ans plus tard, peu après leur aménagement dans une maison agréable située à Zollikon, petite cité au bord du lac à quelques kilomètres de Zurich, l'Allemagne nazie annexe l'Autriche (Anschluss du 13 mars 1938). Pauli, qui a demandé en avril 1938 sa naturalisation suisse sans succès, est obligé d'accepter un passeport allemand en novembre. Ses différentes démarches pour obtenir la nationalité suisse échouent les unes après les autres⁵. Finalement, durant l'été 1940 il demande à l'ETH un congé de six mois et part avec Franca aux États-Unis, où ils arrivent le 24 août. Il est reçu à Princeton par von Neumann et retrouve Einstein à l'*Institute for Advanced Studies*. Compte tenu de son passeport allemand, pays en guerre avec les États-Unis depuis la fin 1941, Pauli, malgré les appels de l'ETH, ne peut pas se rendre en Suisse où il est toujours titulaire de la chaire de physique. Ce n'est qu'à la fin de la guerre que la situation évoluera.

En novembre 1945, il apprend que le comité Nobel a choisi de lui attribuer le prix Nobel de physique « pour sa découverte du principe d'exclusion, aussi appelé principe de Pauli ». Compte tenu des difficultés de voyage, il préfère ne pas se rendre à Stockholm pour la cérémonie de remise

>>>

Pour en savoir plus

No time to be brief, a scientific biography of Wolfgang Pauli, Charles Enz, Oxford University Press (2002).

The genius of science, a portrait gallery of twentieth-century physicists, Abraham Pais, Oxford University Press (2000).

du 10 décembre, et c'est à Princeton que ses collègues vont célébrer dignement cette prestigieuse récompense. Parmi ses collègues de l'*Institute for Advanced Studies*, on compte Hermann Weyl, John von Neumann, Kurt Gödel et Albert Einstein. Ce dernier fait un discours improvisé qui touchera profondément Pauli, au cours duquel il en fait en quelque sorte son fils spirituel, son digne successeur. Après l'attribution du prix Nobel, plusieurs postes sont offerts à Pauli à Princeton et à l'université Columbia (New-York) ; de plus, il reçoit la nationalité américaine.

Mais finalement, en avril 1946, après avoir passé six ans aux États-Unis, il décide de retourner à Zurich. Le 2 octobre, le couple retrouve leur maison de Zollikon. Pauli reprend son poste de professeur à l'ETH. Il participe, en juin 1958, au onzième conseil Solvay dont le thème porte sur « l'astrophysique, la gravitation et la structure de l'univers ». Malgré un mal d'estomac persistant depuis l'été 1957, Pauli reste toujours aussi actif et participe à plusieurs autres conférences. Le 5 décembre 1958, à la fin d'un cours, ses douleurs à l'estomac deviennent intenses. Il est hospitalisé le lendemain (dans la chambre 137 !⁶) et opéré le 13. Le chirurgien découvre une énorme tumeur, non opérable, au pancréas. Wolfgang Pauli s'éteint deux jours plus

tard, le lundi matin 15 décembre 1958. La médaille Planck, qui devait lui être remise en octobre, est apportée à sa veuve, par le professeur Trendelenburg. Ce dernier honneur récompense une vie consacrée à la physique fondamentale.

Quelques anecdotes sur Pauli

Les contributions de Pauli à la physique ne se limitent pas à ses grandes découvertes ; elles s'étendent à d'autres domaines comme le magnétisme des métaux, le *spin* nucléaire, le moment magnétique des noyaux. George Gamov indique « qu'il est aussi difficile de trouver une branche de la physique moderne où le principe de Pauli n'est pas utilisé, que de trouver un homme aussi doué, aussi aimable et aussi amusant ».

Les anecdotes sur Wolfgang Pauli sont innombrables. On l'a dit « inathlétique, hédoniste, indifférent à la nature, noctambule, sarcastique, cynique, critique acerbe ». Pauli est professeur dès l'âge de 23 ans, mais ce qu'il écrit au tableau est à peine lisible et il lui arrive de s'interrompre en plein cours pour méditer ce qu'il vient d'enseigner. Un jour un étudiant se risque : « Vous nous dites que la conclusion à laquelle vous êtes arrivé est triviale, mais je ne la comprends pas. » Énervé, Pauli quitte

la salle quelques minutes pour trouver une présentation plus simple. Il réapparaît et se contente de dire : « Mais c'est trivial ! » Quand Weisskopf se présente en 1934 à Pauli pour être son assistant à Zurich, ce dernier lui dit : « Qui êtes-vous ? », « Je suis Weisskopf. Vous m'avez appelé pour être votre assistant. » « Ah, oui, j'aurais vraiment voulu que ce soit Bethe, mais il travaille sur la physique du solide, que je n'aime pas, même si j'ai commencé à m'y mettre. » Weisskopf rapporte ses débuts difficiles : « Pauli me donne quelques problèmes à étudier... et après une semaine il me demande ce que j'ai fait. Je lui montre ma solution et il dit : "Finalement j'aurai vraiment dû prendre Bethe." » La même année, Weisskopf, effectuant le calcul de l'énergie propre de l'électron, réalise qu'il a fait une erreur. Il va voir Pauli pour lui demander si une telle erreur le condamne à abandonner la physique : « Non, réplique Pauli catégorique, tout le monde fait des erreurs sauf moi. » À Emilio Segré, qui venait de présenter une conférence, il dit : « je n'ai jamais entendu un discours pire que le vôtre » ; puis il se retourne vers un collègue et ajoute : « excepté quand j'écoutais votre leçon inaugurale à Zurich. »

Pauli était d'une maladresse légendaire, ce fait est connu sous le nom « d'effet Pauli ». George Gamov rapporte l'anecdote suivante : James Franck réalise sa célèbre expérience (de « Franck et Hertz ») à Göttingen, quand son dispositif s'effondre sans cause apparente. Il rapporte le fait à Pauli dans une lettre humoristique. Pauli lui apprend alors qu'au moment de l'incident, il était précisément à Göttingen lors d'un voyage qui le menait de Zurich à Copenhague ! ■

1 - C'est ainsi qu'il lira, à treize ans, *La mécanique*, que Mach lui dédicace.

2 - "Die allgemeinen Prinzipien der Wellenmechanik", *Handbuch der Physik*, 1933.

3 - Pauli donne une interprétation de la mécanique quantique qui est semblable à celle de Bohr, Born ou Heisenberg ; pour lui « le résultat d'une seule observation n'est déterminé par aucune loi et par conséquent il est sans cause ».

4 - Le théorème *spin*-statistique indique que les particules de *spin* demi entier répondent à la statistique de Fermi Dirac (et donc obéissent au principe d'exclusion de Pauli), tandis que les particules de *spin* entier répondent à la statistique de Bose Einstein (et peuvent donc subir la condensation de Bose).

5 - Il écrira en 1942 à Uhlenbeck : « ... Je suis de plus en plus conscient que je n'appartiens à aucune nation existante. Je sens que mon point de vue doit être supranational, fondé sur des valeurs d'idéaux généraux valant pour toute la civilisation... » Une telle attitude est très proche de celle d'Einstein.

6 - Valeur de l'inverse de la constante de structure fine.

Lettre de Pauli du 4 décembre 1930 à « Mesdames et Messieurs les radioactifs »

Chers Mesdames et Messieurs radioactifs,

Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la continuité du spectre, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver la loi de conservation de l'énergie. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin 1/2, que je souhaite appeler neutrons, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons en ce qu'elles ne se déplacent pas à la vitesse de la lumière. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que la masse des électrons et, quoi qu'il arrive, pas plus grande que 0,01 fois la masse du proton. Le spectre continu deviendrait alors compréhensible en supposant que lors de la désintégration un neutron est émis en plus de l'électron, de telle sorte que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constante...

Je conviens que mon remède peut sembler incroyable car, s'ils existent vraiment, l'on devrait avoir vu ces neutrons beaucoup plus tôt. Mais c'est seulement celui qui ose qui peut gagner et la situation difficile, due à la structure continue du spectre, est éclairée par une remarque de mon honorable prédécesseur, M. Debye, qui m'a récemment dit à Bruxelles : « Oh, comme pour les nouveaux impôts, il vaut bien mieux ne pas penser à cela du tout ». Dorénavant, chaque solution à ce problème doit être discutée. Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement, je ne pourrai pas être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre.

*Votre serviteur, le plus dévoué,
W. Pauli*