

LOUIS DE BROGLIE, L'ONDE ET LE CORPUSCULE



ETUDES ET DÉBUT DE CARRIÈRE

- Licence d'histoire politique en 1911 (19 ans)
- Lecteur des procès-verbaux du 1^{er} conseil Solvay en 1911
- Licence de physique en 1913
- Mobilisé pour le service militaire en 1913
- Travaille dans le service radiotélégraphique pendant la guerre.
- 1919 : intègre le laboratoire de son frère Maurice de Broglie ((phénomènes d'ionisation, rayons X, effet photo-électrique) et suit les cours de Langevin.

ETUDES ET DÉBUT DE CARRIÈRE

- Début des années 20 : une dizaine d'articles publiés seul ou en compagnie de Dauvillier, essentiellement sur l'interprétation théorique des spectres d'absorption des rayons X, la structure électronique des atomes ou encore le spectre d'émission des électrons atomiques lors d'une ionisation.
- 1922 : deux articles sur les gaz **« d'atomes de lumière »** :
 - 1^{er} article : photons considérés comme des particules relativistes → loi de Wien
 - 2^{ème} article : photons considérés comme des particules relativistes regroupés en « molécules » → loi de Planck.

LA COEXISTENCE DES ONDES ET DES CORPUSCULES

- **1923 : 3 articles fondateurs :**

1^{er} article : « Ondes et quanta » (N. C.R. de l'Académie des sciences, séance du 10 Septembre 1923. T.177. pp 507-510)

A toute particule de masse au repos m_0 est attribué un phénomène périodique de fréquence ν_0 tel que :

$$m_0 c^2 = h\nu_0$$

Pour un observateur se déplaçant à une vitesse $v=\beta c$ par rapport au mobile, la fréquence liée à l'énergie sera :

$$\nu = \frac{m_0 c^2}{h\sqrt{1 - \beta^2}}$$

LA COEXISTENCE DES ONDES ET DES CORPUSCULES

- En revanche, le phénomène périodique dont le corpuscule est le siège verra sa fréquence ralentir (ralentissement relativiste des horloges) :

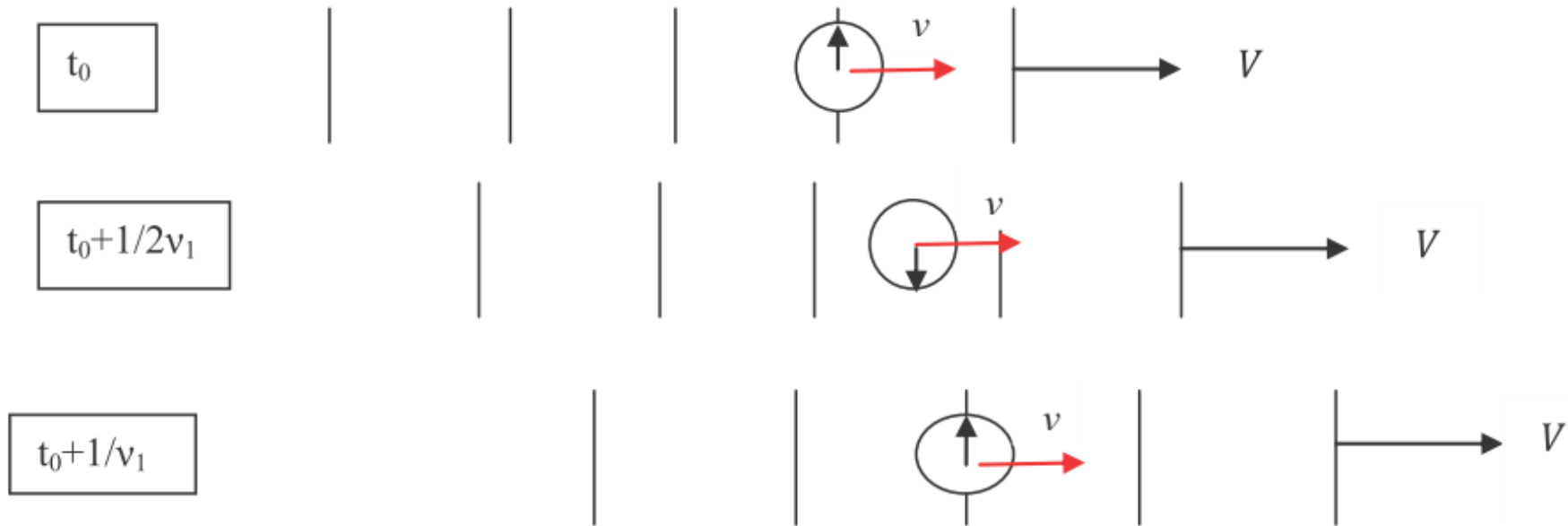
$$\nu_1 = \sqrt{1 - \beta^2} \frac{m_0 c^2}{h}$$

- Que faire de ces deux fréquences ?

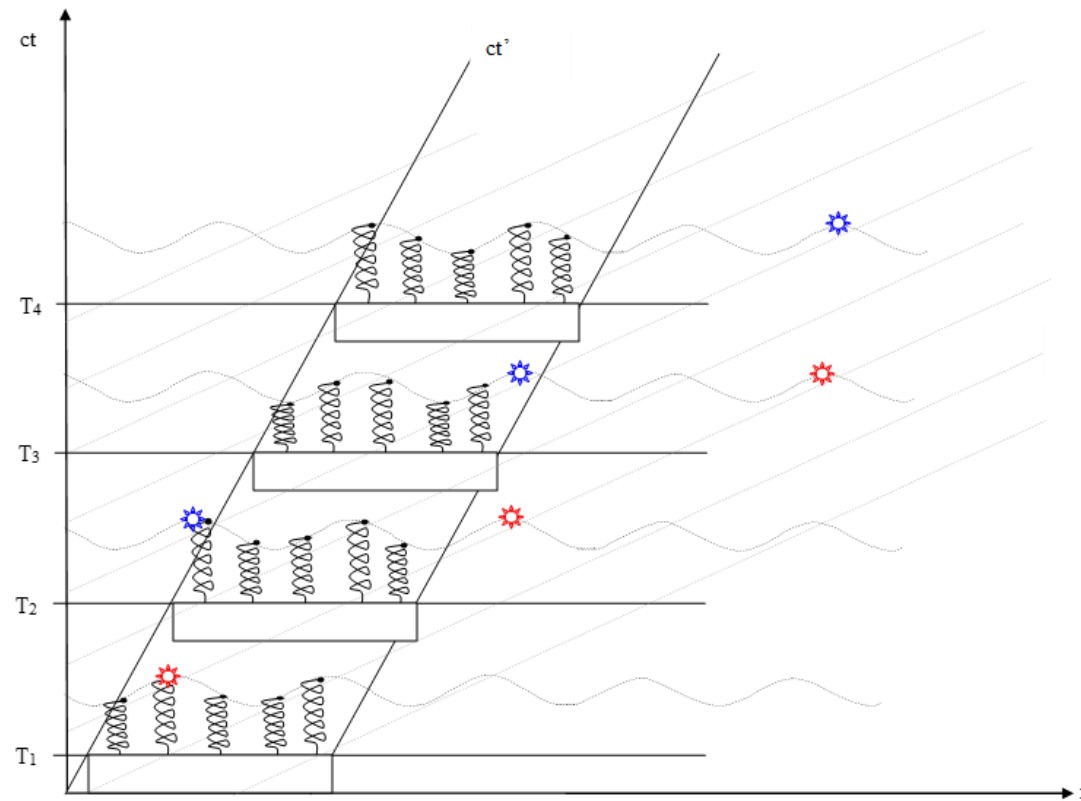
→ Hypothèse de « l'accord des phases » :

ν est la fréquence d'une onde « fictive » se déplaçant à la vitesse $V = \frac{c}{\beta}$ de telle sorte que le phénomène périodique associée au corpuscule soit toujours en phase celle-ci :

LA COEXISTENCE DES ONDES ET DES CORPUSCULES



LA COEXISTENCE DES ONDES ET DES CORPUSCULES



LA COEXISTENCE DES ONDES ET DES CORPUSCULES

- Condition de résonance de l'onde associée à l'électron dans un atome :
→ Condition de stabilité des orbites de Bohr-Sommerfeld.

$$\oint \vec{p} \cdot d\vec{r} = nh$$

LA COEXISTENCE DES ONDES ET DES CORPUSCULES

2^{ème} article : « Quanta de lumière, diffraction et interférences », N. C. R. de l'Académie des sciences.
1923. T.177, pp 548-560.

- Principe de moindre action = principe de Fermat : les rayons de l'onde à l'approximation de l'optique géométrique correspondent aux trajectoires des corpuscules

« Nous concevons donc l'onde de phase comme guidant les déplacements de l'énergie, et c'est ce qui peut permettre la synthèse des ondulations et des quanta. La théorie des ondes allait trop loin en niant la structure discontinue de l'énergie radiante et pas assez loin en renonçant à intervenir dans la dynamique. La nouvelle dynamique du point matériel libre est à l'ancienne dynamique (y compris celle d'Einstein) ce que l'optique ondulatoire est à l'optique géométrique¹¹⁸ ».

LA COEXISTENCE DES ONDES ET DES CORPUSCULES

- **1924 : thèse de Doctorat : « Recherche sur la théorie des quanta »**

Jury composé de Jean Perrin, Langevin, Elie Cartan et Charles Mauguin le 25 novembre 1924

- Justifie et étend les idées développées dans les notes aux Comptes rendus de 1923.
- La nature de « l'onde de phase » reste énigmatique. La question de son amplitude, et celle de l'équation qui la gouverne n'est pas abordée.
- Le corpuscule est conçu comme une région de l'espace dans laquelle l'énergie est condensée.

DIFFUSION DES IDÉES DE LOUIS DE BROGLIE

- De Broglie discute de ses idées régulièrement avec Léon Brillouin et Paul Langevin, qui le prennent au sérieux mais restent sceptique.
- Langevin envoie la thèse à Einstein qui lui répondra : « il a levé un coin du grand voile ».
- L'intérêt d'Einstein est aussi lié au fait qu'il travaille alors à ce moment sur la statistique de Bose, et qu'il trouve des résultats concordants dans la thèse de Louis de Broglie. Einstein en parle à Schrodinger qui s'intéresse également à la statistique des gaz.
- En Angleterre, Dirac s'intéresse brièvement à sa thèse avant de passer à autre chose.
- En Allemagne, Max Born s'intéresse à la théorie après avoir pris connaissance de résultats expérimentaux intrigants. Born parle de la théorie à Davisson d'une part et à Thomson d'autre part, qui fourniront les premières vérifications expérimentales solides de celle-ci en 1927.

VERS LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

Sur la fréquence propre de l'électron, C.R. T. 179 (1925) pp. 1039-1041

Equation d'onde :
$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \Delta A$$

Solution :
$$A = \vec{r} \cdot \vec{e} e^{i2\pi(\vec{r} \cdot \vec{v} / \lambda)}$$

Injection de la solution dans l'équation, et séparation de la partie réelle et imaginaire : équation pour l'amplitude :

$$\Delta \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{4\pi\nu_0^2}{c^2} \varphi$$

VERS LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

- Solution particulière dans le référentiel de la particule :

$$\varphi(r) = \frac{K}{r} \cos\left(\frac{2\pi\nu_0 r}{c} + \alpha\right)$$

La localisation de la particule est à $r = 0$ où l'amplitude de l'onde est infinie : il s'agit d'une singularité au sein de l'onde.

VERS LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

- 1926-1927 : prise en compte des travaux de Schrodinger (équation d'onde) et de Born (interprétation probabiliste) :

1927: « La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière », *Journal de Physique et le Radium*, Vol 8, n°5, pp. 225-241.

Solution à singularité de l'équation d'onde de Klein-Gordon pour une particule :

$$\psi = \frac{C}{r} e^{i(kr - Et)}$$

Solution à singularités de l'équation d'onde de Klein-Gordon pour un « nuage » de particules :

$$\psi = \frac{C}{r} e^{i(kr - Et)} + \frac{C}{r} e^{-i(kr - Et)}$$

VERS LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

- Solution de Schrodinger :

$$\Psi(x, y, z, t) = a \cos\left(2\pi\nu\left(t - \frac{vz}{c^2}\right)\right)$$

- $\rho(x,y,z) = a(x,y,z)^2$ représente la densité de probabilité de trouver la singularité à un endroit donné.

VERS LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

- Cas d'une particule soumise à un potentiel :

Solution singulière :

$$\psi(x) = A e^{iS(x)/\hbar}$$

Séparation de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'équation :

→ Une équation pour la phase (qui tend vers l'équation d'Hamilton-Jacobi à l'approximation « géométrique ») et une équation pour l'amplitude.

VERS LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

- **Hypothèse** : comme dans l'équation d'Hamilton-Jacobi, la vitesse de la particule est dirigée dans la direction du gradient de la fonction φ (c'est-à-dire de la phase).
- Alors, grâce à l'équation de l'amplitude, et à l'approximation non-relativiste, la singularité se déplace selon la formule :

$$\vec{v} = \frac{\vec{\nabla} \varphi}{m}$$

VERS LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

- Solution régulière de Schrodinger :



- Séparation de la partie réelle et de la partie imaginaire de l'équation :

→ φ et φ' obéissent aux mêmes équations à l'approximation classique.

→ hypothèse de de Broglie (hypothèse de la « double solution ») : elles continuent à obéir à la même équation et continuent à être identiques dans tous les cas.

VERS LA THÉORIE DE LA DOUBLE SOLUTION

Il y a donc **deux solutions** :

→ la solution singulière représente la réalité. Elle décrit une onde dont l'amplitude tend vers l'infini. La singularité représente la particule. Les trajectoires de la particule obéissent aux équations de la mécanique classique d'une particule soumise à un potentiel $V = V_{cl} + V_{qu}$ où V_{qu} est le potentiel quantique qui dépend de la fonction d'onde.

→ la solution « régulière » représente la connaissance que nous avons de l'état de la particule.

LA THÉORIE DE L'ONDE PILOTE

- Présentée en 1927 comme une version simplifiée de la théorie de la double solution :

→ on oublie la solution singulière. La particule est un simple point dont la trajectoire obéit à la « loi de guidage » :

$$\vec{v} = \frac{\vec{\nabla}\varphi}{m}$$

→ L'amplitude de l'onde représente la probabilité de trouver la particule à un endroit donné.

L'OBJECTION DE PAULI AU CONSEIL SOLVAY (1927)

- **Diffusion d'une particule par un « rotateur plan » :**

→ Les différentes composantes de la fonction d'onde (qui représentent les différents états possibles correspondants aux différentes valeurs d'énergie échangée entre le rotateur et la particule) se chevauchent dans l'espace de configuration. $\Psi = \sum_i c_i \psi_{\Delta E_i}$

→ Interprétation de Born : l'amplitude c_i de chacune des composantes représente la probabilité pour que telle ou telle valeur d'énergie ait été échangée entre le rotateur et la particule. Après une mesure de l'énergie, la particule et le rotateur se retrouvent dans un état d'énergie bien déterminée, les autres composantes de la fonction d'onde disparaissent. $\Psi \rightarrow \psi_{\Delta E_f}$

→ Interprétation de de Broglie : chaque $\psi_{\Delta E_i}$ continue à guider la particule, qui n'est donc pas dans un état d'énergie bien déterminée.

ABANDON D'UNE IDÉE ET ASCENSION INSTITUTIONNELLE

- Création de l'Institut Henri Poincaré (1928) :
 - Louis de Broglie devient maître de conférence (1928) puis professeur titulaire de la chaire de théories physiques (1932).
 - Prix Nobel de Physique (1929)
 - Membre de l'Académie des Sciences en 1933, il en devient secrétaire perpétuel en 1942.
 - Il accède en outre à un nombre très important de commissions et de conseils : citons notamment ses nominations en tant que membre titulaire du Bureau des Longitudes en 1943, en tant que membre du Comité consultatif des universités, du Conseil de l'Enseignement ou encore, en 1946, du Conseil Supérieur de l'Éducation nationale.

LA PÉRIODE « ORTHODOXE » DE LOUIS DE BROGLIE (1928-1952)

- **Programmes de recherche :**

→ La « mécanique ondulatoire du photon » : le photon est la « fusion » de deux particules de spin $\frac{1}{2}$ obéissant chacune à l'équation de Dirac.

→ La théorie des « particules à spin » (une généralisation des principes de la mécanique ondulatoire du photon à toutes les particules)

→ La théorie des « champs soustractifs » pour régler le problème des infinis dans les interactions fondamentales.

LA PÉRIODE « ORTHODOXE » DE LOUIS DE BROGLIE (1928-1952)

- Une production importante de vulgarisation scientifique.
- De Broglie apparaît de plus en plus convaincu que ses anciennes idées mènent à une impasse :

« Peut-être cette « confession » aura-t-elle aussi l'avantage d'empêcher certains chercheurs, comme il s'en rencontre encore assez souvent aujourd'hui, de s'efforcer à revenir en arrière, à remettre en question les conceptions nouvelles de la Physique des incertitudes [...] Ces tentatives m'ont causé beaucoup de tourments et m'ont fait perdre bien du temps. Néanmoins, je ne les regrette pas : elles ont eu l'avantage de bien me faire voir les raisons profondes pour lesquelles l'adoption des idées, au premier abord si surprenantes, de Bohr et Heisenberg était devenue une nécessité imposée par l'existence même des faits expérimentaux dont la Physique microscopique a le devoir de rendre compte » ,

« Souvenirs personnels sur les débuts de la mécanique ondulatoire », *Physique et Microphysique*, Paris : Albin Michel, 1947.p 165

LA PÉRIODE « ORTHODOXE » DE LOUIS DE BROGLIE (1928-1952)

- **1932 : preuve de Von Neumann sur l'impossibilité des variables cachées** (Von-Neumann, John (1932), Les fondements mathématiques de la mécanique quantique, Traduit en Français par Alexandre Proca, (1946), Paris, Alcan. :

Dans le cadre du formalisme de la MQ :

→ Il existe des « ensembles purs », c'est-à-dire des ensembles qui ne sont pas décomposables en sous-ensemble ayant des propriétés statistiques différentes : ce sont les ensembles décrits par une fonction d'onde.

→ Parmi ces ensembles purs, il n'en existe pas qui n'aboutissent à aucune dispersion quelque soit l'observable R considérée.

De Broglie (1945) :

« Mais et nous touchons un point capital, il semble bien qu'il soit impossible de ramener de cette façon, par l'introduction de variables cachées, l'indéterminisme quantique à un déterminisme sous-jacent [...] La voie qui paraissait rester ouverte dans cette direction pour restaurer le déterminisme à l'échelle atomique semble donc se fermer devant nous. »

Louis de Broglie, « Hasard et contingence en physique quantique », *Revue de Métaphysique et de Morale* 50e Année, No. 4 (Octobre 1945), pp. 241-252 (12 pages)

LA PÉRIODE « ORTHODOXE » DE LOUIS DE BROGLIE (1928-1952)

- **Séminaire à partir de 1930-1931**
- **Un groupe se constitue autour de Louis de Broglie :**

Jean-Louis Destouches, Claude Magnan, André Georges, Jacques Winter, Gérard Petiau, Marie-Antoinette Baudet (puis Tonnelat), Jules Géhéniau, Paulette Destouches-Fevrier et Costa de Beauregard

→ Intérêts et profils divers, mais assez peu connectés avec les principaux programmes de recherche internationaux et souvent loin des applications concrètes de la MQ.

- **Un autre groupe plus ouvert sur la physique internationale se constitue autour de Brillouin et Langevin**

Francis Perrin, Jacques Solomon, Alexandre Proca, Louis Goldstein

LE REVIREMENT (1951-1952)

- 1950-1951 : sujet des cours de Louis de Broglie à l'a Sorbonne : réexamen de l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique.

→ De Broglie conclue en faveur des thèses de Bohr et Heisenberg

« mais il semble que l'on puisse répondre avec raison à Einstein que son point de vue constitue une hypothèse métaphysique a priori et qu'il est plus justifié de constituer la physique théorique comme devant établir un lien entre les phénomènes effectivement constatables à l'aide de procédés d'observation bien définis » (Louis de Broglie, Les incertitudes d'Heisenberg et l'interprétation probabiliste de la mécanique ondulatoire, Paris : Gauthier-Villars. 1982 p154)

- Été 1951 : de Broglie reçoit, avant sa publication, un article d'un certain David Bohm sur la théorie de l'onde pilote. Le travail de Bohm permet deux choses

→ une (double) réponse explicite est donnée à l'objection de Pauli :

- l'exemple donnée par Pauli est beaucoup trop idéalisé : dans des cas réalistes, les différentes composantes de la fonction d'onde ne se chevaucheraient pas longtemps et la particule se situerait rapidement au sein d'un train d'ondes à l'énergie assez bien déterminée.
- Il faut prendre également en compte le processus de mesure : même dans le cas où les différentes composantes se chevauchent, la fonction d'onde du système s'enchevêtre avec celle de l'appareil de mesure, les différentes composantes dans l'espace de configuration (système + appareil de mesure) sont alors automatiquement séparées.

→ De Broglie remarque que le raisonnement de Von Neumann ne s'applique pas à la théorie de l'onde pilote pour la raison que le processus de mesure modifie la valeur des variables cachées.

LE REVIREMENT (1951-1952)

- Mais de Broglie n'aime toujours pas la théorie de l'onde pilote :

→ l'onde envisagée est de nature complexe et se propage dans un espace de configuration : elle ne peut donc pas représenter un phénomène physique.

→ une fonction dont la signification probabiliste la fait dépendre de l'état de notre connaissance ne peut pas jouer un rôle physique comme celle qui consiste à guider un corpuscule.

- Octobre 1951 : Jean-Pierre Vigier ressuscite la théorie de la double solution :

« M. Vigier, guidé par ses travaux récents sur la Relativité Généralisée et les théories unitaires reprend aujourd'hui la théorie de l'onde-pilote sous sa forme de la double solution et pense que, sous cette forme, elle peut échapper aux objections que j'ai rappelées. Il me paraît certain que, si l'on parvenait à justifier la théorie de l'onde pilote, ce ne pourrait être que sous sa forme primitive de la double solution de la manière indiquée par M. Vigier à la fin de sa Note. Mais la tentative de M. Vigier se heurtera certainement à beaucoup de difficultés et d'objections »

Louis de Broglie, *Remarque sur la note précédente de M. Vigier*, C.R.T.233.PP1012-1013

LA MAUVAISE RÉPUTATION DE LOUIS DE BROGLIE

- Anatole Abragam (1989) De la physique avant toute chose, Paris, Odile Jccob

« Le cas de Louis de Broglie pose douloureusement le problème du génie qui fait une très grande découverte, une seule, et qui doit ensuite vivre avec cette découverte. [...]

Cette découverte peut se formuler en quelques mots : « on sait que le photon qui est une onde, l'onde lumineuse, est aussi une particule. Pourquoi l'électron qui est une particule ne serait-il pas aussi une onde ? » Et voilà, tout est dit, le reste est quelques équations, et cela vaut un prix Nobel, celui de 1929, à trente-sept ans.

Après il faut vivre, découvrir à nouveau, briller, face aux autres génies, les Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Pauli, et puis les poetae minores, les Born, Jordan, Kramers, et puis les autres.

Mais la seconde grande idée ne vient pas, ne viendra jamais, et le physicien qui a eu une idée de génie et n'accepte pas de ne plus avoir que du talent s'enferme dans une quête impossible, se laisse peu à peu circonvenir et chambrer par des flatteurs, des incapables, des illuminés sinon des escrocs ; et voilà la physique théorique française dans les trente-sixième dessous ! »

LA MAUVAISE RÉPUTATION DE LOUIS DE BROGLIE

- **Maurice Lévy (entretien):**

« Louis de Broglie - Einstein aussi dans une certaine mesure – considérait que les théories physiques devaient être librement inventées, ensuite comparées éventuellement à l'expérience. [...] Il a eu cette idée géniale qu'un électron pouvait être associé à une onde [...] et il s'est imaginé que la physique, c'était comme ça que ça se passait. Un jour, je me rappelle qu'un physicien américain qui s'appelait Félix Bloch [...] m'a dit : « ben voilà comment cela s'est passé. Il s'est assis un jour à sa table de travail, et il s'est dit : « ça serait drôlement bien si le monde était comme ça ». Et, le monde était comme ça ! » Et ça, ça a été une influence terrible pour lui parce qu'il a toujours pensé que la physique théorique, ça se passait comme ça »

LA MAUVAISE RÉPUTATION DE LOUIS DE BROGLIE

- **Maurice Lévy :**

« Nous, on nous avait appris à partir de l'expérience. C'est-à-dire : il y avait tels et tels résultats expérimentaux qui collaient pas ou qui collaient mais on ne comprenait pas pourquoi, et nous, nous devons expliquer, si possible à partir de principes fondamentaux, pourquoi l'expérience donnait tel résultat. C'était notre approche. [...] Eux [Louis de Broglie et ses élèves] étaient des gens qui bâtissaient des théories qui étaient ou n'étaient pas [en accord avec l'expérience]...En général, ils s'arrangeaient pour qu'on ne puisse pas les comparer avec l'expérience, comme ça, ils étaient tranquilles ».

LOUIS DE BROGLIE, UN CHERCHEUR INTROVERTI ET SOLITAIRE OCCUPANT UNE POSITION INSTITUTIONNELLE CENTRALE

Léon Rosenfeld (1963), Interview of L. Rosenfeld by T.S. Kuhn and J.L. Heilbron on July 1, 1963, Niels Bohr Library & Archives, American Institute of Physics, College Park, MD USA. :

*« En fait, lorsque j'ai demandé le nom "de Broglie", j'ai dû le répéter plusieurs fois et finalement l'écrire pour que les gens comprennent de qui je voulais parler et puissent me diriger vers son bureau. [...] de Broglie était très singulier. Son cours était très intéressant parce qu'il décrivait simplement son travail, toute son idée, mais à cette époque, il cherchait absolument à tâtons. Il ignorait Schrödinger - eh bien, pas tout à fait, mais il ignorait en tout cas l'école de Copenhague - alors il tâtonnait ; il m'a demandé de -
. Je me souviens, juste comme un exemple, que J.J. Thomson, qui devait être assez sénile à cette époque, avait publié une note dans Nature à propos d'un modèle de l'électron, l'électron en rotation. De Broglie m'a demandé d'étudier cela pour voir si ce n'était pas une manière de contourner le problème. À cette époque, on se préoccupait du problème du spin, mais de Broglie n'avait même pas d'idée de comment le problème devait être formulé [...] J'étais le seul à parler avec de Broglie. Il donnait un cours suivi par une douzaine de personnes qui y allaient, s'asseyaient, prenaient des notes, puis partaient. J'étais le seul à l'aborder. Il était tellement timide - et moi aussi j'étais timide -
que le premier contact fut plutôt difficile, mais ensuite, comme cela arrive avec les personnes timides après que le premier contact a été établi, [nous sommes devenus] très intimes. Par exemple, quand il avait terminé ses cours, je le suivais et nous marchions ensemble dans la rue et discussions. »*

LOUIS DE BROGLIE, UN CHERCHEUR INTROVERTI ET SOLITAIRE OCCUPANT UNE POSITION INSTITUTIONNELLE CENTRALE

- De Broglie n'a pas su fédérer une école de physique théorique française s'insérant dans des programmes de recherche internationaux.
- Ses travaux restèrent essentiellement sur des questions de fondements conceptuels, assez éloignées d'applications concrètes.
- Son retour à une recherche de théorie causale l'éloigne encore davantage de la nouvelle génération de physiciens théoriciens français emmenée par Maurice Lévy, Albert Messiah et d'autres.
- De Broglie et son groupe se marginalise des principales recherches théoriques effectuées en France et à l'international.
- Ses derniers grands programmes de recherche sont la recherche **d'une équation non-linéaire pour la théorie de la double solution** et la **thermodynamique de la particule isolée**.