

# Mécanique Quantique

L3 - Physique 2021-2022

*Paul-Antoine Hervieux  
Unistra/IPCMS  
hervieux@unistra.fr*

## 3) Deuxième phase (suite)

# Deuxième phase

Deuxième phase dans l'élaboration de la théorie quantique  
1923-1930

# Deuxième phase

Congrès Solvay 1927

*Electrons et photons*



Picard Henriot Ehnfest Herzen de Donder Schrödinger Verschaffelt Pauli Heisenberg Fowler Brillouin  
Debye Knudsen Bragg Kramers Dirac Compton L. de Broglie Born Bohr  
Langmuir Planck Mme Curie Lorentz Einstein Langevin Guye Wilson Richardson

# Deuxième phase

## ÉLECTRONS ET PHOTONS

RAPPORTS ET DISCUSSIONS

DU

CINQUIÈME CONSEIL DE PHYSIQUE

TENU A BRUXELLES DU 24 AU 29 OCTOBRE 1927

SOUS LES AUSPICES

DE L'INSTITUT INTERNATIONAL DE PHYSIQUE SOLVAY

Publiés par la Commission administrative de l'Institut.



PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET C<sup>e</sup>, ÉDITEURS

LIBRAIRES DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

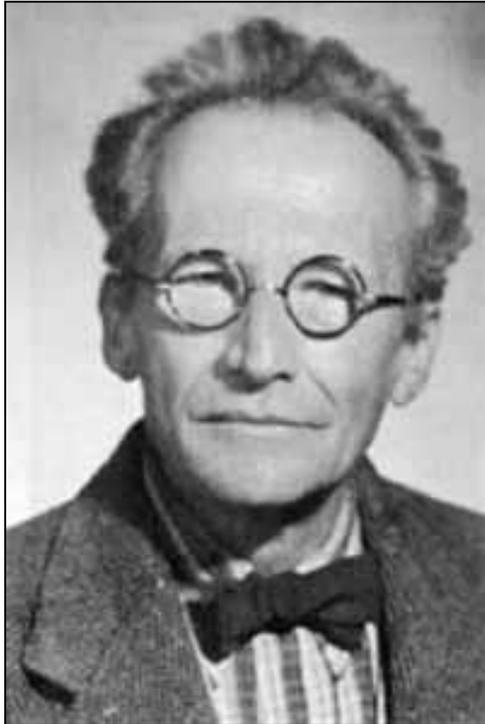
Quai des Grands-Augustins, 55.

1928

# Deuxième phase

1926

Erwin Schrödinger (1887-1961)



Équation d'onde

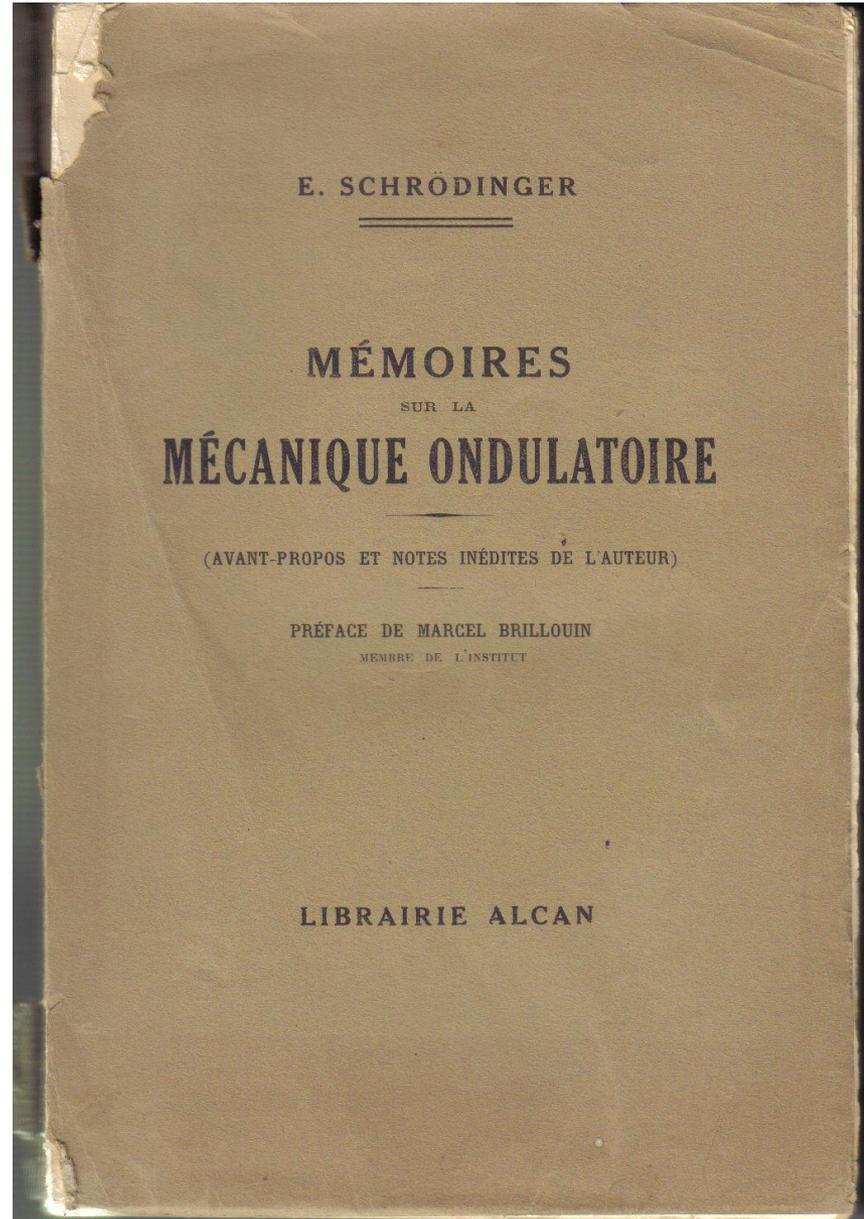
$$H\Psi = E\Psi$$

# Deuxième phase

## Annalen der Physik (1926)

est la plus ancienne revue scientifique de physique, publiée depuis 1790

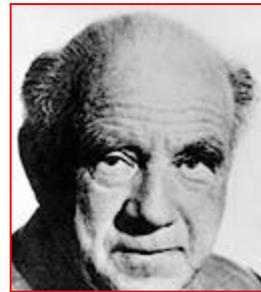
Traduction en français  
par Alexandre Proca (1933)



# Deuxième phase

Werner Heisenberg (1901-1976)

mécanique des matrices (1925)



$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar/2$$

principe d'incertitude d'Heisenberg (1927)

# Deuxième phase



Pauli

« L'idée de beauté est par ailleurs fort subjective et ne peut donc servir de critère objectif. Un exemple ? En 1926, Erwin Schrödinger publie son équation et invite à considérer que les particules ne sont que des paquets d'onde. Dans le même temps, Werner Heisenberg publie sa mécanique des matrices, très abstraite, qui interdit qu'on puisse représenter les phénomènes quantiques dans l'espace-temps. Pendant plusieurs mois, les deux hommes ont des échanges aigres-doux. Schrödinger écrit à Lorentz que la **théorie de Heisenberg est « monstrueuse »**, Heisenberg écrit à Pauli que **la mécanique ondulatoire de Schrödinger est « abominable »**. Puis, aidés par Paul Dirac, l'un et l'autre finissent par se rendre compte que leurs théories, mathématiquement si différentes, étaient physiquement équivalentes (conduisaient aux mêmes prédictions)... ! La laideur et la beauté peuvent donc avoir des masques interchangeables. »

(Etienne Klein)

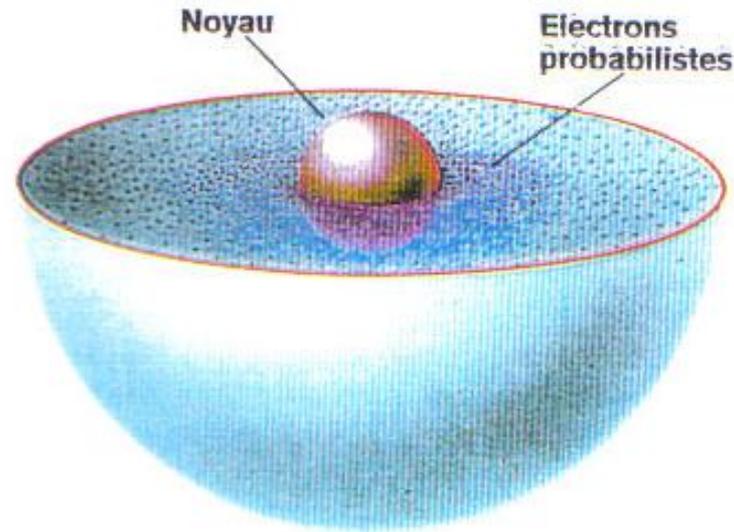


Lorentz

# Deuxième phase

Modèle de Born (1926)

*interprétation probabiliste de la fonction d'onde de Schrödinger*



Max Born (1882-1970)

$$|\Psi(x, t)|^2 dx$$

Probabilité de trouver la particule au point  $x$  à l'instant  $t$

Interprétation de l'école de Copenhague (Bohr)

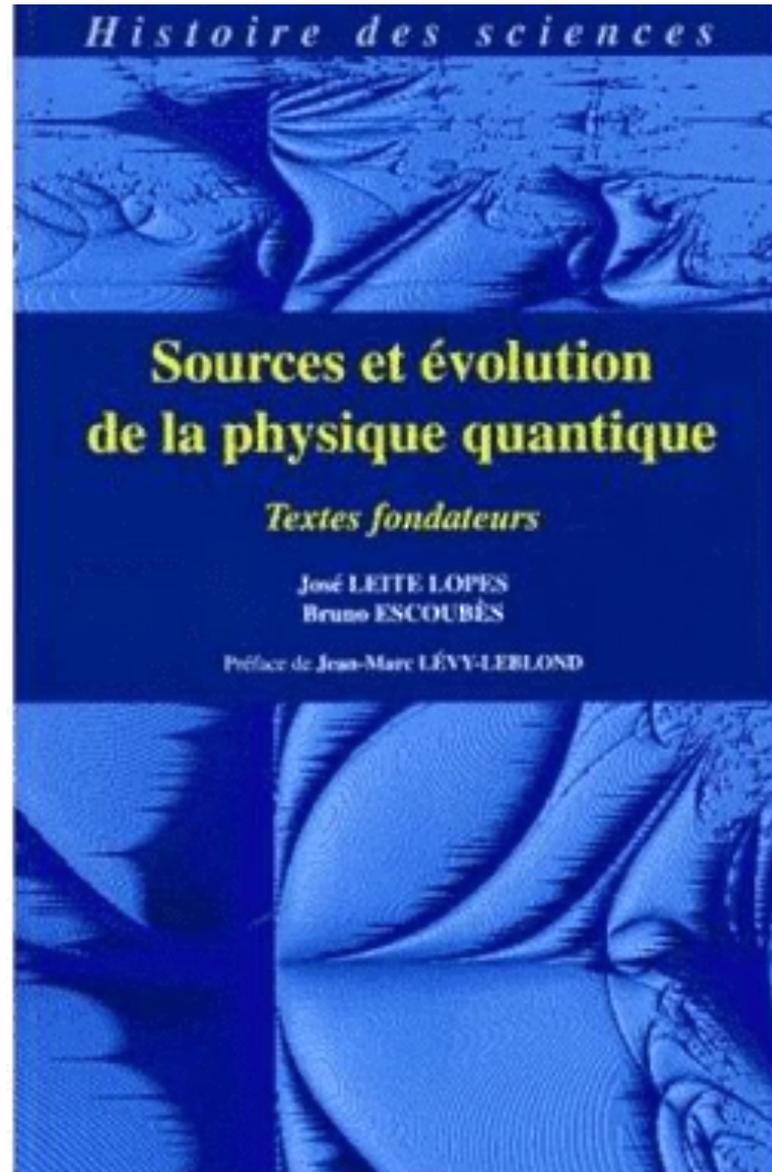
# Deuxième phase

## Interprétation probabiliste de la mécanique quantique

Jusqu'à l'année **1926**, « *la mécanique quantique, dans sa formulation ondulatoire (Schrödinger) ou matricielle (Heisenberg), était de la haute technologie mathématique de type nouveau, manifestement importante pour les réponses qu'elle donnait, mais sans principes physiques sous-jacents clairement affirmés* » (A. Pais).

Schrödinger proposa que l'on considérât les ondes comme la seule réalité; les particules seraient alors déduites des ondes. Juste après l'article de Schrödinger où il établissait l'équation de continuité, et reliait le **carré du module de la fonction d'onde à la densité de charge**, Max Born publia deux articles sur la mécanique quantique des collisions en **1926**: il y proposait que, dans le développement d'une fonction d'onde décrivant l'état d'un système suivant un ensemble d'états propres distincts non-dégénérés, *le carré du module du coefficient  $c_n$  d'un état  $\psi_n$  donne la probabilité pour que le système se trouve, lors d'une observation, dans cet état.* **C'était la clé du problème.** La solution définitive. Cette interprétation rencontra une grande résistance chez certains physiciens parmi les plus célèbres: **Einstein, Schrödinger, de Broglie**. Pour de Broglie, l'onde associée à une particule était comme une onde pilote, une conception qu'Einstein avait déjà formulée en affirmant, à propos de la dualité onde-corpuscule, que les ondes électromagnétiques n'étaient là que pour indiquer le chemin aux photons et déterminer la probabilité pour que le photon suive un certain chemin. Cette conception, néanmoins, ne fut ni reprise ni défendue par Einstein qui répugnait à donner à notre connaissance une base probabiliste: « *Le seigneur ne joue pas aux dés* ».

# Deuxième phase

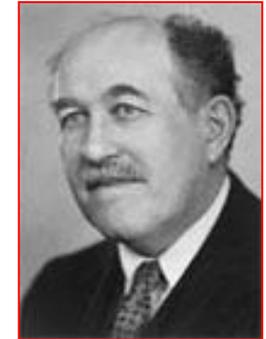
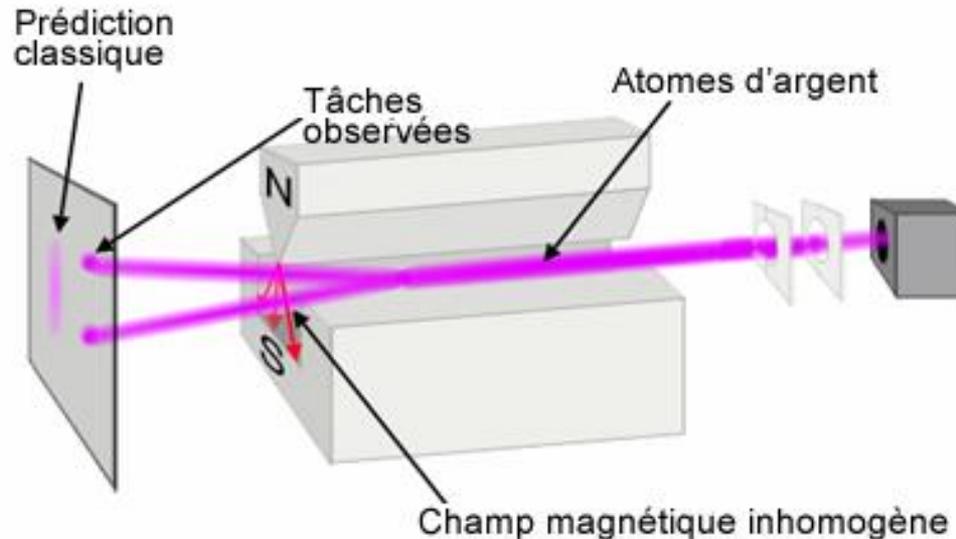


# Deuxième phase

## Expérience de Stern et Gerlach (1925)



Walter Gerlach (1889-1979)



Otto Stern (1888-1969)

Expérience Stern-Gerlach : des atomes d'argent, pourvus d'un moment magnétique (spin uniquement), traversent un champ magnétique inhomogène, ils sont déviés et laissent sur l'écran deux petites tâches symétriques. On s'attendait à ce que le moment magnétique prenne des valeurs continues et laisse donc sur l'écran une seule tâche allongée.

**Otto Stern** (1888-1969), physicien allemand, professeur à l'Université de Hambourg, à l'Institut de Technologie de Carnegie et à l'Université de Berkeley. Il utilise les faisceaux moléculaires pour mesurer les propriétés magnétiques des molécules et des protons et détermine ainsi les moments magnétiques de l'électron et du proton. Prix Nobel de physique en 1943.

**Walter Gerlach** (1889-1979), physicien allemand, professeur aux universités de Tübingen et Munich. Il effectue avec Otto Stern l'expérience qui porte leurs noms et qui montre que le moment magnétique de l'électron ne prend que des valeurs discrètes. Il apporte aussi une contribution à la physique du rayonnement, à la spectroscopie et à la physique quantique.

# Le spin de l'électron (1925)



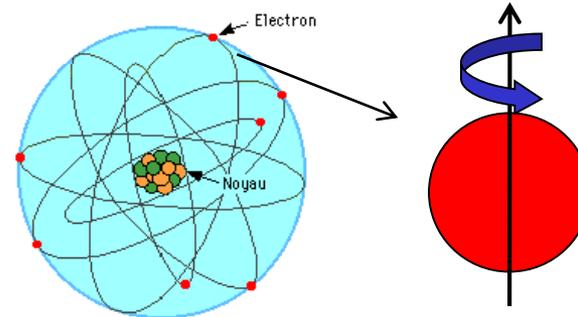
W. Pauli et N. Bohr



Georg Uhlenbeck (1900-1988)



Samuel Goudsmith (1902-1978)



Pour expliquer ce résultat, **Georg Uhlenbeck** et **Samuel Goudsmith** proposent en 1925 une nouvelle hypothèse: les électrons sont pourvus de **spin**, sorte de mouvement de rotation autour de leur axe, et disposent donc d'un moment magnétique, comme l'aiguille d'une boussole. La projection du spin sur un axe ne prend pas de valeurs continues mais seulement deux valeurs qui sont multiples de la constante de Planck :  $+\frac{1}{2}$  (spin up) et  $-\frac{1}{2}$  (spin down). L'électron est alors une particule de spin  $\frac{1}{2}$ .

$$s_z = \pm \frac{\hbar}{2}$$

# Deuxième phase

Cette équation prend en compte de manière naturelle la notion de **spin** introduite peu de temps avant par **Georg Uhlenbeck** et **Samuel Goudsmith** et permit de prédire l'existence des **antiparticules**.

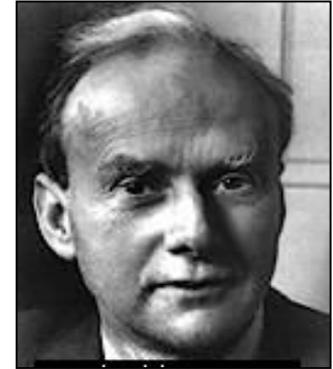


*positron*

*électron*



Symétrie



Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984)

*Pour lui la beauté des équations est un critère de validité de la théorie*

**1928**

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_0) \Psi = 0$$

*Extension relativiste de l'équation de Schrödinger*

# Deuxième phase

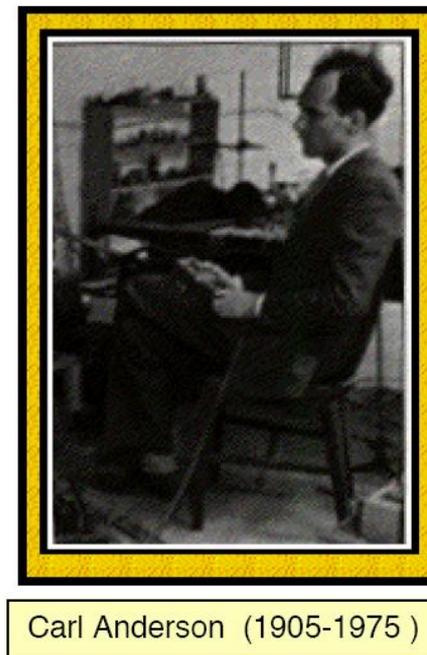
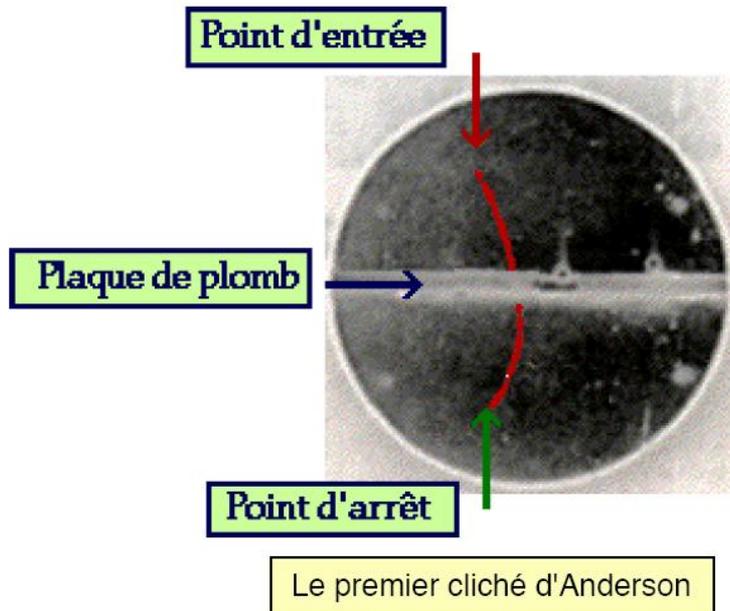
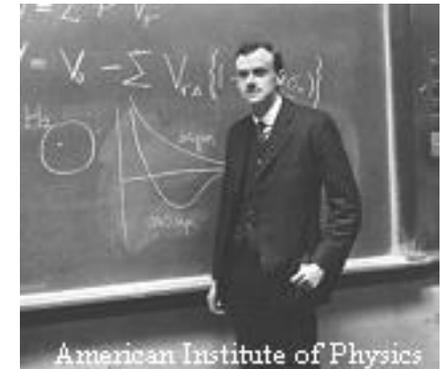


Niels Bohr

It seems reasonable to assume that not all the states of negative energy are occupied, but that there are a few vacancies or "holes" which can be described by a wave function, like an X-ray orbit. Such a hole would appear experimentally as a thing with +ve energy, since to make the hole disappear (i.e. to fill it up,) one would have to put -ve energy into it. Further, one can easily

# Deuxième phase

- 1928 - Paul Dirac prédit l'antimatière.
  - Il est aussi à l'origine d'une équation fameuse
- 1931 - Anderson découvre le positron dans une chambre de Wilson.
  - En étudiant le rayonnement cosmique, Anderson observe une particule qui pour le spécialiste a toutes les caractéristiques d'un électron, ne peut être un proton et possède une charge électrique positive.



Il découvre aussi le muon en 1936 !