

Gloire et honte du quantum (Wheeler)

Marc Lachièze-Rey

- Dieu ne joue pas aux dés
- Arrêtez de dire à Dieu ce qu'il doit faire

- Planck / Einstein / De broglie / Bohr / Heisenberg / Schrödinger / Dirac...
- Incompatible avec les concepts classiques :
interprétation ?
- Expériences [de pensée] : boites à photons, EPR, chat de Schrödinger... aujourd'hui réalisables
- Oublier l'interprétation et calculer...

Max Planck (1858– 1947),

La matière [atomes] émet (et reçoit) de la lumière par paquets [quanta] : discontinu

physicien allemand (prix Nobel de physique de 1918 pour ses travaux en théorie des quanta.)
travaux en [thermodynamique](#), en [électromagnétisme](#) et en [physique statistique](#). / se rallie à l'atomisme à partir des années 1890.
Il s'intéresse dès 1894 au [rayonnement électromagnétique](#) du [corps noir](#).

En octobre 1900, il détermine la loi de répartition spectrale du rayonnement thermique du corps noir, mais sans interprétation physique.

- (réconcilie la [loi de Rayleigh-Jeans](#) aux grandes [longueurs d'ondes](#) et la [loi de Wien](#) (petites longueurs d'ondes)

la [catastrophe ultraviolette](#) suggère que la thermodynamique est fautive. Planck essaye donc de produire une nouvelle théorie fondamentale destinée à remplacer la thermodynamique.

Planck déduit sa loi de façon empirique. en postulant que l'énergie émise ou absorbée par les oscillateurs ne se fait que par petits paquets d'[énergie](#) E . Ces paquets seraient directement reliés à la fréquence des oscillations selon la formule $E = h \nu$. Cette hypothèse limite l'excitation des oscillateurs aux courtes longueurs d'ondes, et modifie la formule. (h est la [constante de Planck](#), ν est la [fréquence](#) du [rayonnement électromagnétique](#).)

notion des [quanta](#). Mais sa relation n'est considérée que comme un artifice de calcul [mathématique](#).

L'idée de quantification est développée par d'autres, notamment [Einstein](#) qui en étudiant l'[effet photoélectrique](#) propose un modèle et une équation dans lesquels la lumière est non seulement émise mais aussi absorbée par paquets ou photons. C'est l'introduction de la nature corpusculaire de la lumière.

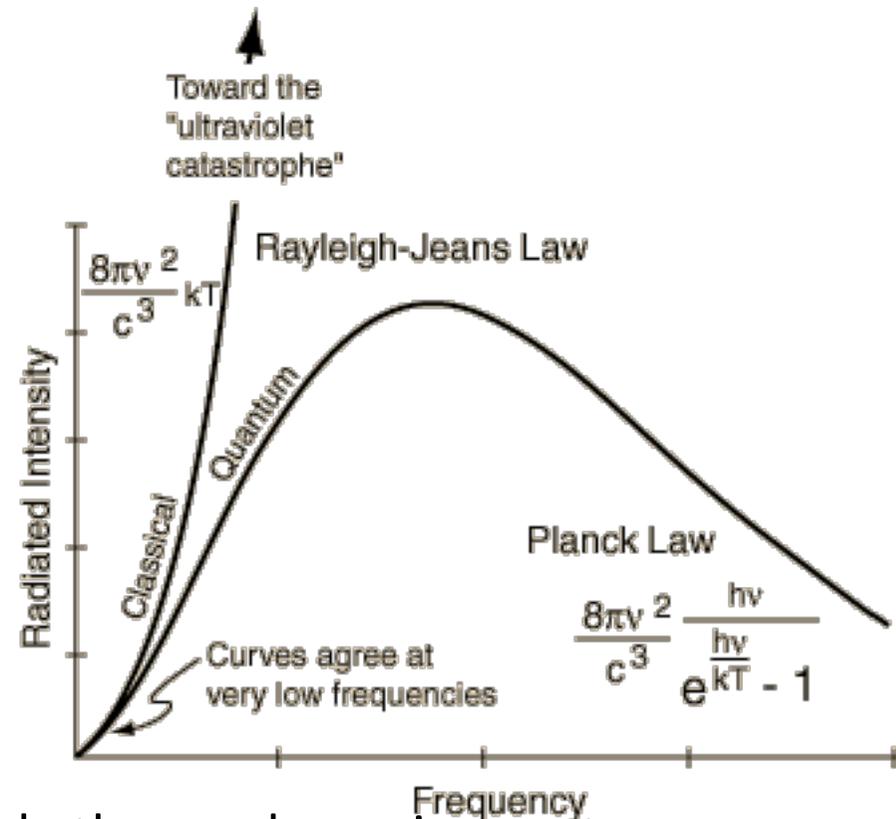
« Pour moi qui ai consacré toute ma vie à la science la plus rigoureuse, l'étude de la matière, voilà tout ce que je puis vous dire des résultats de mes recherches : il n'existe pas, à proprement parler, de matière ! Toute matière tire son origine et n'existe qu'en vertu d'une force qui fait vibrer les particules de l'atome et tient ce minuscule système solaire qu'est l'atome en un seul morceau (...) Nous devons supposer, derrière cette force, l'existence d'un Esprit conscient et intelligent. Cet Esprit est la matrice de toute matière. »²

A la fin de 1900 qu'il présente sa découverte à la société de physique de Berlin: naissance de la théorie des quanta (il a du mal à accepter sa propre hypothèse, rendant la matière « discontinue ».)

- Planck organise (Avec [Nernst](#)) le premier [congrès Solvay](#) à Bruxelles

rayonnement électromagnétique
du corps noir.

répartition spectrale



la catastrophe ultraviolette suggère que la thermodynamique est fautive. Planck essaye donc de produire une nouvelle théorie fondamentale destinée à remplacer la thermodynamique.

Planck réconcilie la loi de Rayleigh-Jeans aux grandes longueurs d'ondes et la loi de Wien (petites longueurs d'ondes)

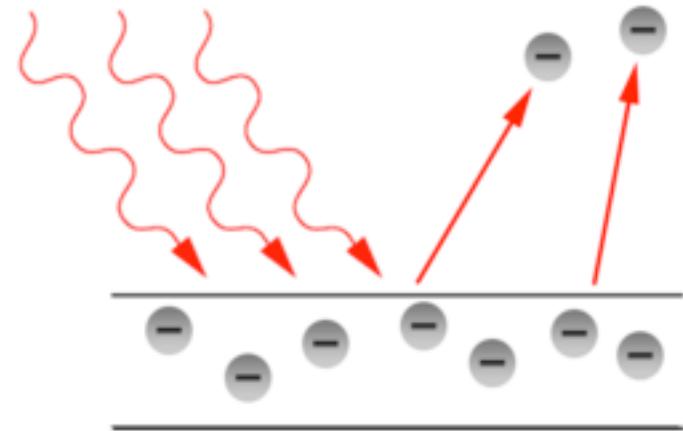
Einstein: effet photoélectrique

la lumière a un aspect corpusculaire

émission d'électrons par un matériau (généralement métallique) exposé à la lumière

- ou un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée, qui dépend du matériau.

En 1920 les quanta de lumière seront appelés photons



Expériences de Franck et Hertz (1914).

- Les états d'équilibre existent-ils bien dans les atomes ? Peut-on effectuer des transitions ?
- Vapeur de mercure, où arrivent des électrons d'énergie connue
- → les atomes irradient de la lumière (ν) seulement lorsque l'énergie des électrons est au-delà d'un seuil E_0 , tq $E_0 = h\nu$ → la perte en énergie des électrons est de $h\nu$

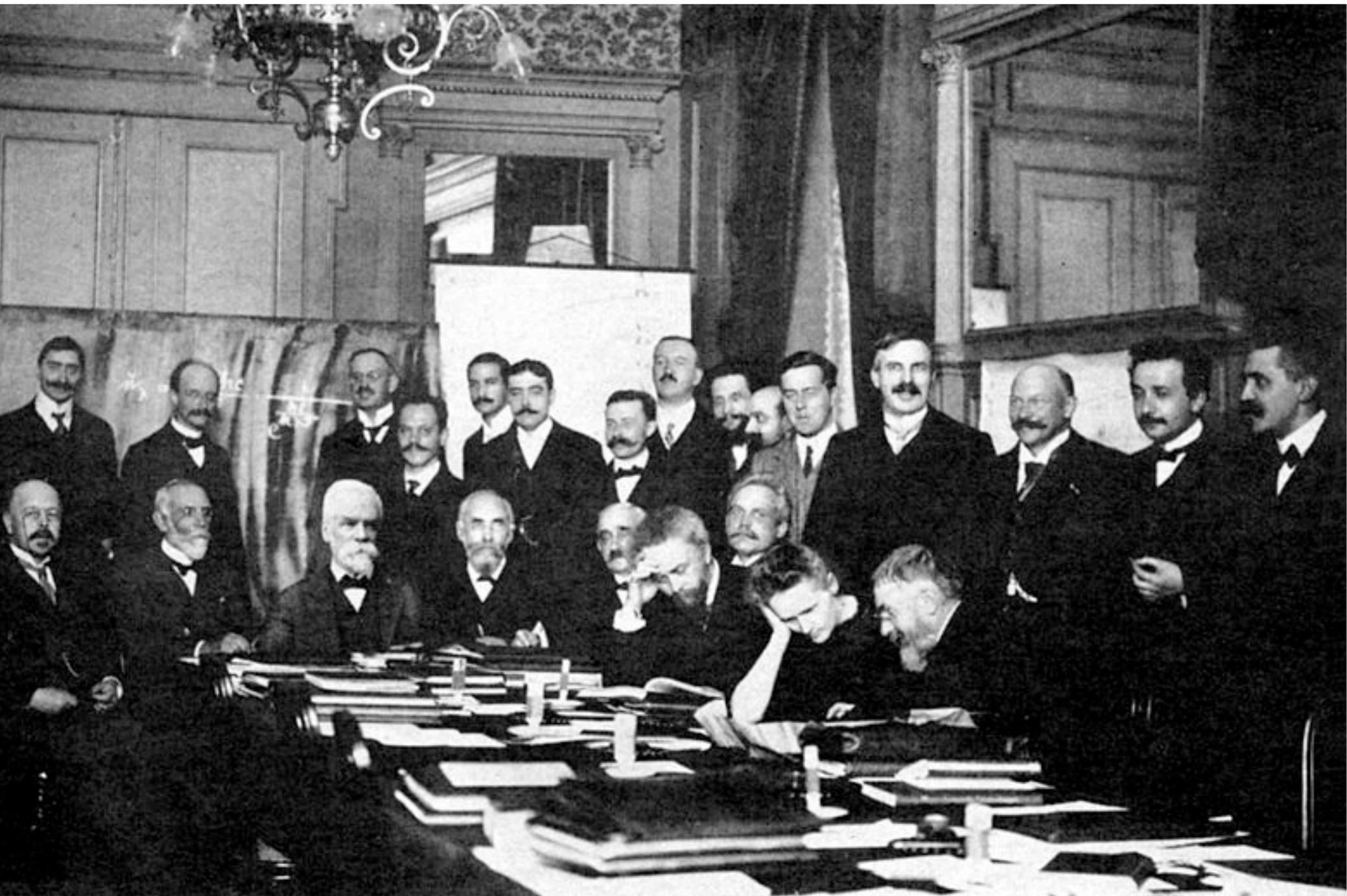
Solvay (novembre 1911)

conférences organisés grâce au mécénat d'[Ernest Solvay](#), un chimiste et industriel belge.

- Organisé par le physicien et chimiste Walther Nernst (qui avait au départ rejeté les idées quantiques comme “grotesques” (ensuite : indispensables)
 - Albert Einstein (32 ans: le plus jeune du groupe)
- « The congress in Brussels resembled the lamentations on the ruins of Jerusalem, Nothing positive came out of it.»

Einstein défend son idée que la lumière se comporte à la fois comme une onde et une particule (quantum). Très mal accepté

- Conclusion par Ernest Solvay
- « In spite of the beautiful results achieved at this congress, you have not solved the real problems that remain at the forefront. »



L'atome de Bohr (1913)

- point de départ : le modèle de Rutherford.
- Bohr (1883-1962) en visite chez Rutherford. Comment concilier le modèle de l'atome d'hydrogène avec la stabilité, et avec la quantification du rayonnement ?
- orbites circulaires pour les électrons qui devraient rayonner...
- passage d'un état stationnaire à un autre par émission d'un rayonnement.
- Conditions de quantification de Planck : $E_2 - E_1 = h\nu$
- retrouve la formule de Rydberg; rend compte des données expérimentales: Succès rapide.
- Généralisation par Sommerfeld (1916)
- → Piliers de la théorie quantique jusqu'en 1925 : hypothèse des états stationnaires, règle des fréquences.

L'atome de Bohr (1913)

- Spectre : l'atome ne peut absorber ou émettre que certaines fréquences de rayonnement: spectre
On le mesure ; il est donné par une loi curieuse:

- 1885 : formule de Balmer: les fréquences de l'atome d'hydrogène sont données par des différences de type $\nu_i - \nu_j$ avec $\nu_i = R/i^2$.

(R constante de Rydberg)

(formules similaires ensuite pour les autres atomes : Rydberg, 1889, Ritz 1908)

- Des différences, deux nombres entiers \rightarrow ???
- Max Planck (1858-1947) : l'énergie de la radiation est proportionnelle à ν : $E=h\nu$.

Niels Bohr (1913) : l'atome ne peut être que dans certains états d'énergie : ensemble discret et non pas continu !!!
Leurs énergies sont représentées par un nombre i .

La lumière émise a une énergie qui représente une différence entre niveaux (haut et bas)

- Bohr calcule la constante de Rydberg constant à partir de la charge et masse de l'électron
- Personne n'y croit: pourquoi ces états d'énergie discrets, stationnaires ???
(l'e devrait rayonner et perdre de l'énergie !!!)

L'hypothèse est contradictoire avec la physique

Mais rend compte des données à la perfection !!!

Fer à cheval de Bohr

L'atome de Bohr : réactions

- Heisenberg (Helgoland paper): vision pragmatique
- « *On a quantum theoretic reinterpretation of kinematical and mechanical relations* »
- « *... it will be attempted to secure foundations for a quantum theoretical mechanics, based exclusively on relations between quantities which are, in principle, observable.* »
- *observable : la notion d'orbitale, de mouvement, de l'électron ne l'est pas : on oublie !*

- *La seule chose importante est ce que l'on observe (les fréquences == énergie). On les représente par deux nombres et c'est tout !*
- *Il détermine les lois algébriques auxquelles obéissent ces nombres.*
- *Il s'aperçoit (← Born) que ce sont des relations algébriques des matrices. ($xy \neq yx$)*

- Heisenberg , Born , Pascual Jordan, Paul Dirac ... (1925): $[q,p]=qp-pq=i\hbar$
Loi du mouvement avec une algèbre nouvelle (non-commutative).
- → changement des notions de position, moment ...

- 1926 : (Born) : probabilistic interpretation of quantum mechanics.
- Heisenberg's uncertainty relations.

Mécanique quantique

- En 1925, la théorie des quanta est un ensemble disparate : ni cohérent, ni autonome.
- 1925–27/ seconde révolution: mécanique quantique
(implications bizarre, sujets de curiosité et de discussions jusqu'à aujourd'hui)

Heisenberg, Schrödinger, Dirac: deux élaborations :

– Mécanique matricielle de Heisenberg (1925).

(à Copenhague et Göttingen), puis Born et Jordan)

écriture algébrique des relations entre données

[Par rapport à Bohr, Heisenberg abandonne l'idée d'une représentation de l'atome.]

– Mécanique ondulatoire (de Broglie, puis Schrödinger)

Louis de Broglie (1892 – 1987)

- physicien français. [prix Nobel de physique](#) (1929) à 37 ans « pour sa découverte de la nature ondulatoire des [électrons](#) »
- Associe une onde aux particules massives (et non plus seulement à la lumière)
- « Mon idée essentielle était d'étendre à toutes les particules la coexistence des ondes et des corpuscules découverte par Einstein en 1905 dans le cas de la lumière et des photons »
- pose les bases de la [mécanique ondulatoire](#). (soutenue par Einstein)
confirmée par les expériences de diffraction des électrons de Davisson et Germer
Ensuite généralisée par les travaux de [Schrödinger](#).
- de Broglie : vision originale de la physique quantique. (sera en désaccord avec les interprétations ultérieures)
- À l'origine, il pensait qu'une onde réelle (c'est-à-dire ayant une interprétation physique directe) était associée aux particules.
- « la particule doit être le siège d'un mouvement périodique interne et [qu'elle] doit se déplacer dans son onde de façon à rester en phase avec elle, [fait] ignoré des physiciens quantistes actuels [qui ont] le tort de considérer une propagation d'onde sans localisation de particule, ce qui était tout à fait contraire à mes idées primitives. »
- l'aspect ondulatoire de la matière est formalisé par une [fonction d'onde](#) gouvernée par l'[équation de Schrödinger](#) :
- pure entité mathématique ayant une interprétation probabiliste, sans support d'éléments physiques réels. ???
- Cette fonction d'onde donne à la matière les apparences d'un comportement ondulatoire, sans pour autant faire intervenir des ondes physiques réelles.
- de Broglie revient, vers la fin de sa vie, à une interprétation physique directe et réelle des ondes de matière, à la suite des travaux de [David Bohm](#).
- → La théorie de de Broglie-Bohm : donne un statut réel aux ondes de matière en respectant les prédictions de la [théorie quantique](#). (problèmes / peu reconnue par la communauté scientifique.)

Mécanique ondulatoire (de Broglie (1924))

- la lumière et la matière sont des corpuscules guidés par des ondes.
- relation entre l'onde et le corpuscule : $E = h \nu$, $p = h / \lambda$
→ Optique ondulatoire
- « The new dynamics of the material point is to the old dynamics (including Einstein's) what undulatory optics is to geometrical optics »
- Premières confirmations expérimentales (Davisson-Kunsmann 1923)
- expérience de Davisson et Germer (1927) : diffraction des électrons par un cristal. Les résultats montrent un motif de Bragg, en accord avec de Broglie.
- Expérience de G. P. Thomson (1927) : diffraction d'électrons par des films fins.
- → La nature ondulatoire des électrons est finalement reconnue.

Mécanique ondulatoire (Schrödinger, 1926)

- Schrödinger veut déterminer l'équation de ces ondes. (Elles doivent donner des trajectoires classiques)
- Il s'inspire de la mécanique (équation hamiltonienne) et de l'optique.
- → équation d'évolution pour un champ scalaire ψ , → il retrouve les spectres d'émission de l'atome H :
- Retrouve les résultats de Heisenberg, et traite une grande variété de problèmes.
- Accueil variable !

Erwin Schrödinger (1887 -1961)

- [physicien](#) et théoricien scientifique [autrichien](#).

[formalisme](#) théorique de la [mécanique quantique](#):
[équation de Schrödinger](#) →

[\[Nobel de physique 1933 \(avec Dirac\)\]](#)
évolution de la [fonction d'onde](#) associée à l'état
d'une [particule](#),



- [Chat de Schrödinger](#) (à la suite de correspondance avec [Einstein](#)); 1935.
- [Qu'est-ce que la vie ?](#), (1944): discussion sur la [néguentropie](#) , le concept de molécule complexe, le code génétique des organismes vivants. → inspiration pour la recherche du gène et la découverte de la structure en [double hélice](#) de l'ADN ([James D. Watson](#), *l'ADN, le secret de la vie*)
- intérêt pour la philosophie du [Vedanta de l'hindouisme](#).
(conscience individuelle = manifestation d'une conscience unitaire dans l'univers?).

WERNER HEISENBERG (1901-1976)

- étudiant de Arnold Sommerfeld (1868-1951)
- 1923: Göttingen , puis Copenhague
(Rencontre Niels Bohr)
- en juin 1925, malade, il doit se retirer dans
l'île de Helgoland (mer du Nord)
tranquille → idée décisive

approches différentes

- Heisenberg : algébrique, non-commutatif, aucune image, plutôt concept de corpuscule.
 - Schrödinger : équations différentielles, images d'ondes.
 - Les deux approches sont fécondes :
 - la mécanique ondulatoire est utilisée pour résoudre des équations matricielles),
 - pour la formulation de la théorie,
 - pour l'élaboration de l'interprétation.
- Equivalence et intertraductibilité (par Schrödinger)

Théorie des transformations : Dirac-Jordan.

Congrès Solvay de 1927 : "théorie des quanta"

von Neumann, 1932 : espace de Hilbert, formulation axiomatique.

Paul Dirac (1902-1984)

- En 1926, il démontre l'équivalence physique de la [mécanique ondulatoire](#) et de la [mécanique matricielle](#). Il réalise l'analogie avec les [crochets de Poisson](#) dans la [mécanique hamiltonienne](#).
- (Il propose et étudie le concept de [monopôle magnétique](#), une particule encore jamais observée, comme moyen d'apporter encore davantage de symétrie aux [Équations de Maxwell](#).)
- Travaille avec Bohr à Copenhague ; puis Göttingen en 1927; cinquième [congrès Solvay](#) (rencontre [Albert Einstein](#).)
- En 1928: équation relativiste décrivant l'[électron](#), : [équation de Dirac](#).
- Prédit (1931) l'existence d'une particule appelée [positron](#), l'[antiparticule](#) de l'électron. Il faudra attendre 1932 pour qu'[Anderson](#) et [Patrick Blackett](#) observent cette particule.
- [prix Nobel de physique](#) 1933 (avec Erwin Schrödinger) : « la découverte de formes nouvelles et utiles de la [théorie atomique](#) ».
- « [distribution de Dirac](#) » (= fonction delta de Dirac) ([Laurent Schwartz](#) : [théorie des distributions](#)).
- beauté mathématique de la théorie

Solvay conférence 1927

- <https://www.youtube.com/watch?v=8GZdZUouzBY>
- Tous les pères fondateurs de la mécanique quantique
- (17 des 29 participants auront des prix Nobel)

Ervin Schrödinger, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Auguste Piccard, Paul Dirac, Max Born, Wolfgang Pauli, Louis de Broglie, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein ...
- Schrödinger : mécanique des ondes ; en désaccord avec Bohr
- Heisenberg : principe d'incertitude...
- Max Born: interprétation statistique de la fonction d'onde: pas de **déterminisme** dans le monde atomique.
Réponse d' Albert Einstein "God does not play dice."
- Louis de Broglie : nature ondulatoire (→ base pour Schrödinger)

interprétation probabiliste Born (1926)

- ψ donne la probabilité d'une observation dans dans chaque état possible :
interprétation corpusculaire.
- On ne peut prédire le résultat d'une mesure mieux que de manière probabiliste.
- La particule n'existe pas vraiment (?) avant d'être mesurée.

Théorie quantique des champs (Dirac)

- 1928: rendre l'équation (de Schrödinger) de la mécanique quantique) compatible avec la relativité restreinte
- → introduction de la notion de spin
- → (belle) équation relativiste décrivant l'[électron](#), : [équation de Dirac](#).
- Solutions à énergie négative → ?
- Dirac prédit (1931) l'existence du [positon](#): [antiparticule](#) de l'électron.
- 1932 : [Anderson](#) et [Patrick Blackett](#) observent cette particule.

- Théorie quantique des champs: un champ quantique pour chaque espèce [de particules]
- Le nombre de particules n'est pas nécessairement défini
- Il existe un état à zéro particule = fondamental = vide quantique (symétrie maximale, énergie minimale)

- Ensuite: autres champs (théories de jauge, théorie électrofaible, modèle standard)

Problèmes, interprétations

- La plupart dans le cadre de la mécanique quantique

Probabilités

Complémentarité

États superposés; 1935 [Chat de Schrödinger](#)

Incertitude

intrication (non séparabilité) (EPR)

Non localité

Problème de la mesure (collapse), décohérence

Autre logique ?

Pourquoi ne voit-on pas ces effets quantiques (étranges) dans le monde macroscopique?

[Chat de Schrödinger](#) , décohérence

Principe de superposition

- Physique classique : la particule est au point A ou au point B
- Physique quantique: la particule est à la fois au point A et au point B
- (à la fois dans deux états)
- (dans un « état superposé »)
- Conséquence : si on la mesure en A, elle cesse instantanément d'exister (partiellement) en B

- → **interférences quantiques (deux chemins)**
 (lumière, électrons, atomes, molécules [1970])
 (si l'on oblige ...)
 (une seule particule à la fois !)
 [la particule passe à la fois par les deux fentes]
 (si elle passe par l'une elle ne peut « savoir » que l'autre est ouverte)

Information sur le chemin OU franges d'interférences : complémentarité.

Le dispositif « décide » si la particule se comporte comme une onde ou comme un corpuscule

Incertitude ? (Heisenberg 1927)

Heisenberg :le formalisme mathématique est non-commutatif, mais il est d'usage d'employer les concepts classiques. Source de problèmes

- Dirac et Jordan : p (impulsion) et q (position) ne peuvent pas être des valeurs simultanément bien connues: ou l'un ou l'autre:

Variables conjuguées

- Heisenberg (1927) : Plus la position est déterminée précisément, moins l'impulsion est connue précisément et vice-versa. Si on connaît q , on ne connaît pas p .
- (Heisenberg: la mesure perturbe le système observé.)
- **Concept définissable ssi mesurable.**

- L'interprétation de Copenhague : q et p n'ont pas simultanément une réalité objective → pas de réalité objective
- EPR : si. Mais (Einstein) la description de la réalité donnée par la mécanique quantique ne serait pas complète → variables cachées
- La réalité quantique est de nature différente

dualité onde-corpuscule, complémentarité

- concepts classiques : « Les ondes et les corpuscules ne sont que des abstractions indispensables pour ramener l'expression des résultats expérimentaux à nos formes ordinaires d'intuition. » (Bohr)
- L'usage de concepts classiques mène à des contradictions : dualité onde-corpuscule.
- → Renoncer à une image spatio-temporelles en termes classiques. → nouvelle logique : la complémentarité (Bohr, 1927).
- Philosophie à tonalité positiviste.

Le problème de la mesure

deux sortes de processus en physique quantique : unitaire et mesure.

Heisenberg: la mesure perturbe le système observé.

1) Qu'est ce qui distingue les deux ? (observateur, macroscopique...) [conscience ???]

• la séparation radicale entre l'« objet » et l'observateur (à travers ses appareils de mesure) est illusoire:

3) la mesure semble non déterministe

- [fonctions d'onde](#) = [amplitudes](#) de probabilité
- opération dite de « mesure » → (la *mesure* perturbe le système)
- état *quantique* superposé (atome à la fois intact et désintégré par exemple) déterminé → état mesuré.
(Cet état ne préexiste pas à la mesure : la mesure semble le faire advenir.)
- Un objet [macroscopique] peut-il se trouver dans plusieurs états à la fois?
fracture entre le monde [quantique](#) et le monde [macroscopique](#) (déterministe).

Chat de Schrödinger 1935

- [Schrödinger](#) a imaginé cette expérience pour réfuter l'[interprétation de Copenhague](#) de la mécanique quantique ([Albert Einstein](#) avait fait la même expérience de pensée avec un baril de poudre.)
- → la mécanique quantique obéit à des lois contraires à notre intuition ([problème de la mesure](#)).
- **Le chat** est enfermé dans une boîte
- avec un dispositif qui tue l'animal dès qu'il détecte la désintégration d'un atome d'un corps radioactif [détecteur Geiger](#), → interrupteur → chute d'un marteau → cassant une fiole de gaz mortel ([acide cyanhydrique](#)) .

probabilités (« [états superposés](#) » (combinaison linéaire)): une désintégration a une chance sur deux d'avoir eu lieu au bout d'une minute

[mécanique quantique](#) : tant que l'observation n'est pas faite, l'atome est *simultanément* dans deux états (intact/désintégré).

le mécanisme lie l'état du chat (mort ou vivant) à l'état des particules radioactives → *simultanément* dans deux états (l'état *mort* et l'état *vivant*),

jusqu'à l'ouverture de la boîte (=observation) → *choix* entre les deux états.

passage à l'échelle macroscopique (ce n'est pas une question sur le vivant)

- Remarque: même si le chat est mort et vivant, on ne peut l'observer car la mesure ...mesurer provoque le *collapse* de la fonction d'onde

Le paradoxe EPR, intrication

- Pour **Einstein-Podolsky-Rosen**: [expérience de pensée](#) élaborée par [Albert Einstein](#), [Boris Podolsky](#) et [Nathan Rosen](#),
Pour réfuter l'[interprétation de Copenhague](#) de la [physique quantique](#).
-
- 1) deux particules sont créées avec spins + et -.
- 2) le système se propage ...
- 3) on mesure A : + ou - : la valeur mesurée est déterminée aléatoirement au moment de la mesure.
- 4) Ceci nous renseigne immédiatement sur l'état de B (sans mesure sur B)
- **Question 1 (non localité)** : comment B « sait-il » que A a été mesuré ?
 - que la mesure a donné + pour A (par exemple) et qu'il doit donc avoir la valeur - ?
- Pas de transfert causal d'information de A vers B → Réponse ? : transfert d'information **acausal**
- Réponse ? : il existe des **variables cachées** qui codent le fait que A doit avoir la valeur +, et B - : non locales (← Bell)
- autre
- **Problème** : pas d'invariance relativiste de la description du système; pas de réponse connue → mauvaise description?
- **Questions** : est ce que les deux particules sont chacune dans un état précis (+ ou -) avant la mesure ?
 - Physique quantique : NON : on ne peut parler d'états pour chaque particule.
- Alors que peut on dire sur l'état du système entre l'émission et la mesure ?
 - 1) interprétation de Copenhague : Rien; pas de notion de réalité du système *avant* la [mesure](#).
 - 2) il existe un état intriqué (entangled): les deux particules sont séparées mais ne peuvent être décrites séparément. Ceci (la fonction d'onde)représente la réalité du système
 - 3) alternative : (la fonction d'onde)représente la réalité du système du point de vue d'un observateur (Rovelli)
- **réalité ou non localité.**
- EPR : condition de « réalité » : « Si, sans perturber en aucune manière l'état d'un système, on peut prédire avec certitude (avec une probabilité égale à l'unité) la valeur d'une quantité physique de ce système, alors il existe un élément de réalité correspondant à cette quantité physique. »

Inégalités de Bell

- 1964, [John Stewart Bell](#) : [théorème](#)
- Les [variables cachées locales](#) entraînent les [inégalités de Bell](#)
-
- [Alain Aspect](#) ([1981](#), puis [1982](#), à [Orsay](#)): confirme les prédictions de la mécanique quantique dans le cas du paradoxe EPR. (idée [1976](#))
- Puis
- Puis autres expériences (1988-1989; Maryland, Rochester) testent les [intrications](#) à très grande distance
- les [inégalités de Bell](#) sont violées
- → pas de vc (qu'espérait Einstein), ou vc non locales
- → [non-localité](#) de la mécanique quantique : on en peut donner une description séparée d'un système [de deux particules] créé dans les conditions epr]. Même si les « deux particules » sont géographiquement séparées: elles se comportent comme un système unique ([non-localité](#)) , [intriqué](#).

interprétation de Copenhague

- courant de pensée qui donne une interprétation de la [mécanique quantique](#).
- ([Niels Bohr](#), [Werner Heisenberg](#), [Pascual Jordan](#), [Max Born](#))
- (sert de référence)
- « Toute expérience physique [phénomènes de la vie quotidienne ou phénomènes atomiques], se décrit forcément en termes de physique classique. » (ce n'est sans doute plus vrai)

- Les concepts de physique classique forment le langage grâce auquel nous décrivons les conditions dans lesquelles se déroulent nos expériences et communiquons leurs résultats.
- Il nous est impossible de remplacer ces concepts par d'autres et nous ne devons pas le tenter.
-
- parler d'objets indépendamment de toute mesure n'a pas de sens ; la question de l'état ou l'évolution d'un système entre deux mesures n'a pas de sens .

décohérence

- Un état de superposition ne peut être maintenu qu'en l'absence d'interactions avec l'environnement.
- Celui ci serait une « mesure » qui « déclenche » le choix entre les deux états (mort ou vivant). C'est la théorie de la [décohérence](#).
- (pas besoin d'action « consciente »)
- la cohérence est rompue d'autant plus vite qu'il y a plus d'interactions (macroscopique)
- observateur, mesure = d'interactions avec du macroscopique (gravitation [Penrose]...)

- **Variables cachées** (approche [réaliste](#))
- paramètres physiques supplémentaires (que nous ne voyons pas) dans les lois quantiques
- (action de la gravitation par exemple → décohérence)

- « non local » (← théorème de Bell)
-
- [David Bohm](#) (inspiré des idées de [Louis de Broglie](#)); [paradigme](#) d'une théorie à variables cachées non locales.
- reproduit tous les phénomènes connus de la physique quantique dans une, à [variables cachées](#) (non locales).
- Pas de superposition des particules ,
- Pas de collapse de la fonction d'onde
- Pas de paradoxe du Chat
- peu reconnue par la communauté des physiciens.

Everett et les univers parallèles

- Hugh Everett (contre-pied de l'approche positiviste)
- la fonction d'onde décrit toute la réalité.
- Mais cette réalité est défini dans un ensemble E de plusieurs univers parallèles (ou plutôt *divergents*). (incapables de communiquer)
- les lois quantiques sont exactes, complètes, déterministes (plutôt que statistiques.) dans E
- duplication de la réalité (*many-worlds*) ?
ou duplication des observateurs (*many-minds*)?
- Réfutabilité ? /
- déterminisme

- Propriétés de la matière, chimie
- Supraconductivité, superfluidité
- Effet tunnel
- Lasers, transistors
- Expériences quantiques (Serge Haroche, Paris: *photons jumeaux*; Seilinger (Innsbruck); *ions piégés* ...; *piégeage de photons*. Paires EPR (groupes) d'atomes de Rydberg intriqués; porte ouverte **et** fermée (10 photons)
- *Franges de Ramsey* → métrologie : Atome $\frac{1}{2}$ excité, $\frac{1}{2}$ non excité: (atome de césium dans une horloge atomique)

(Informatique et physique quantique)

- machines surclassant celles basées sur la physique classique (pour le traitement de l'information.)
- comportement quantique de certains circuits électriques notamment supraconducteurs ; bien avéré , sert à tester la physique quantique dans des régimes inaccessibles autrement.
- Les processeurs quantiques électriques en sont encore à leurs balbutiements.
 - circuits quantiques supraconducteurs issus de la boîte à paires de Cooper
 - processeurs quantiques d'information supraconducteurs
 - algorithmes ou protocoles quantiques
 - structures hybrides pour réaliser des mémoires quantiques

- No cloning
- Photonique quantique, communication quantique

Téléportation quantique (Genève, **Nicolas Gisin**) de la structure

L'objet [polarisation d'un photon] passe d'un endroit à l'autre sans exister entre deux (←
intrication)

→ Cryptographie

- Ordinateur quantique...

- Vide quantique, énergie noire, effet Casimir...
- Création de particules, effets Unruh et Hawking...
- Théorie unifiée ?

- Gravité quantique, cosmologie quantique ...

- Regard quantique sur la Biologie, le cerveau → ?