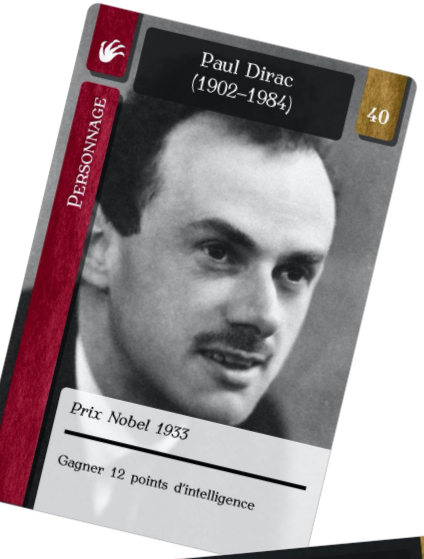
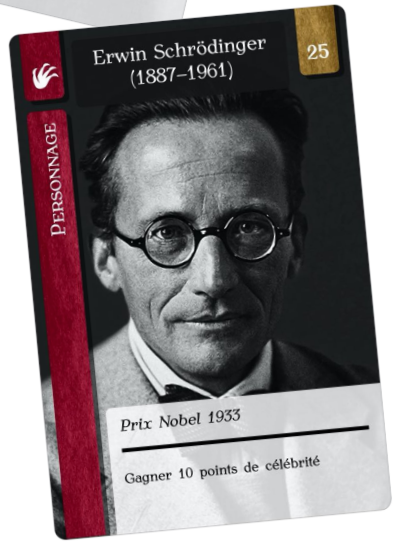
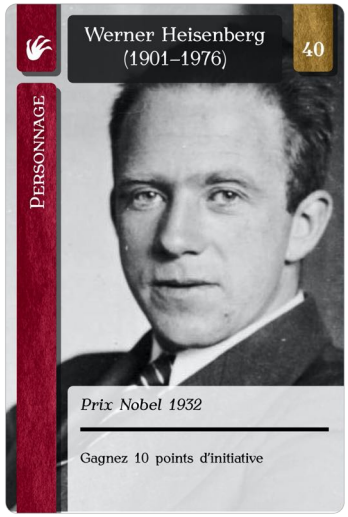
Physique quantique : quelques repères historiques & épistémologiques

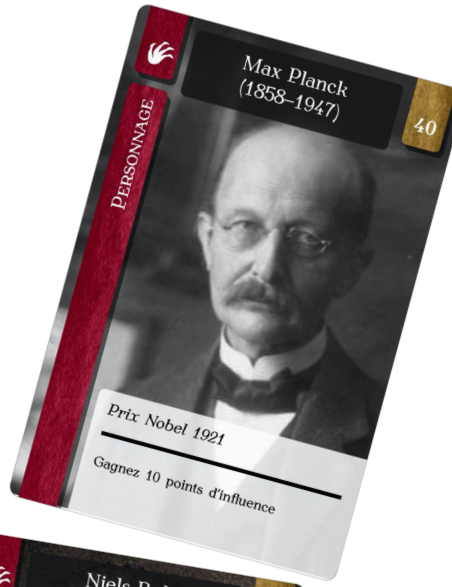
In memoriam
Claude Aslangul

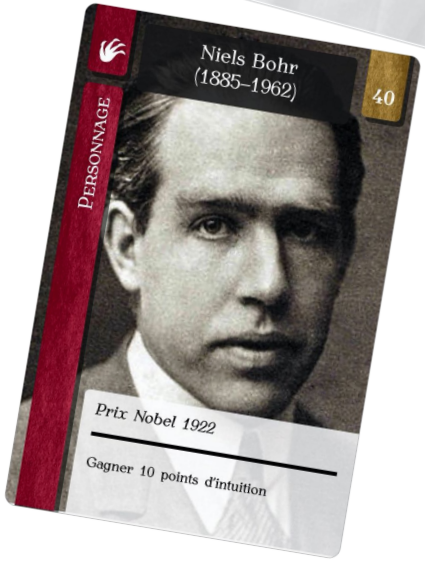
Physique quantique : quelques repères historiques & épistémologiques











Ce que ne fera pas cette présentation :

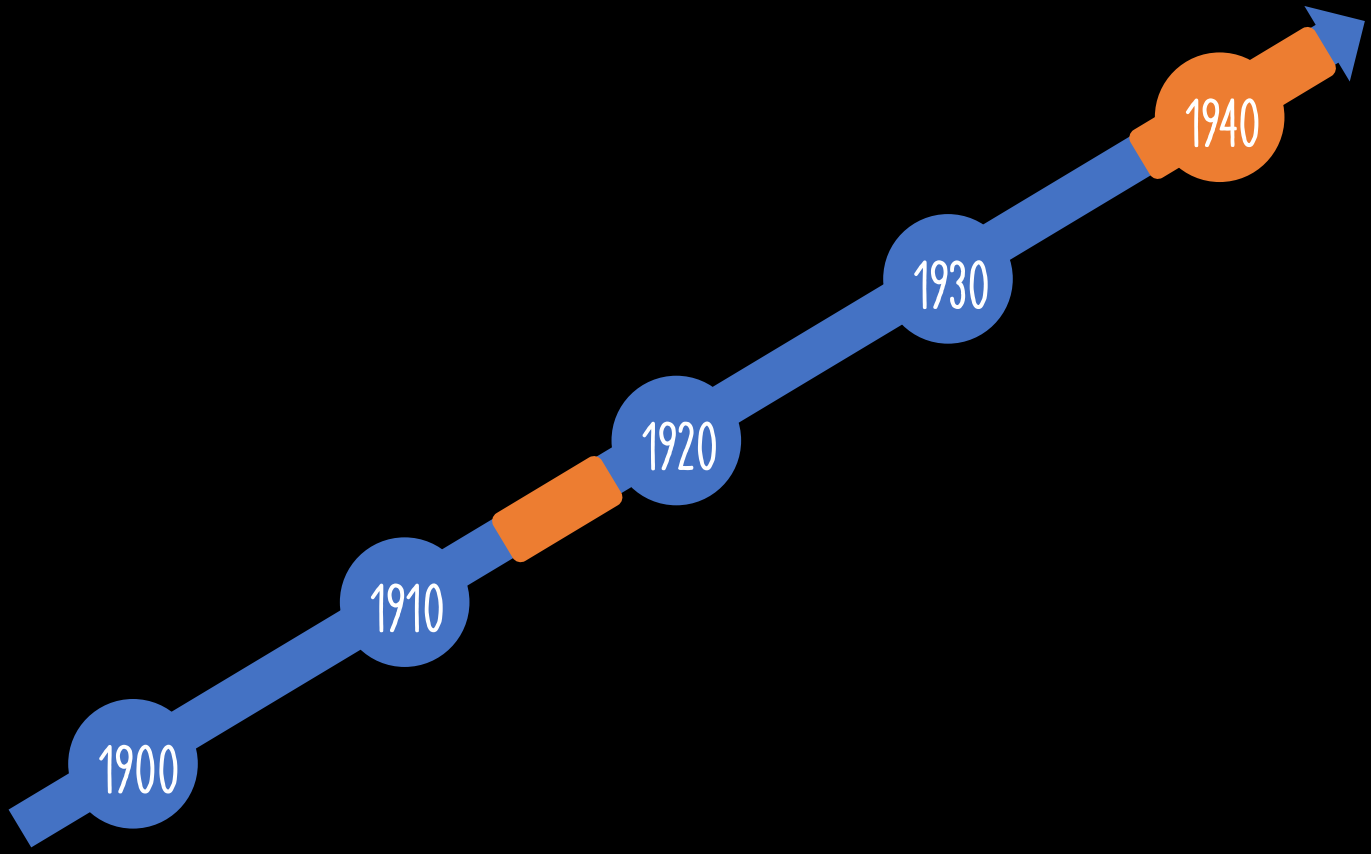
Vous convaincre que la mécanique quantique est une théorie physique intéressante et pertinente

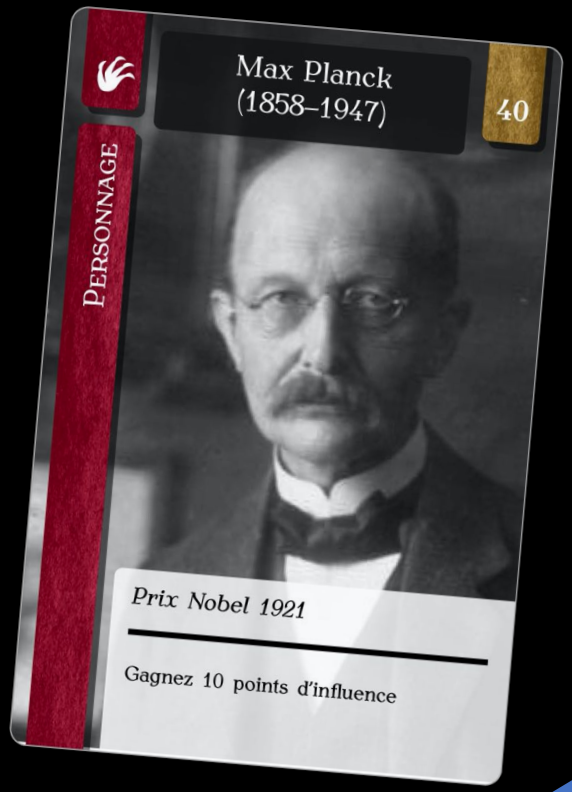
Trancher les grands débats épistémologiques et philosophiques qui entourent la mécanique quantique

Vous transformer en des experts d'histoire des sciences du domaine

Ce qu’elle tentera de faire :

Vous intéresser à l’histoire des sciences et vous guider vers des ressources qui permettent de le faire de façon riche


1900
1910
1920
1930
1940



42

ans

1900 Planck formule l'hypothèse des quanta

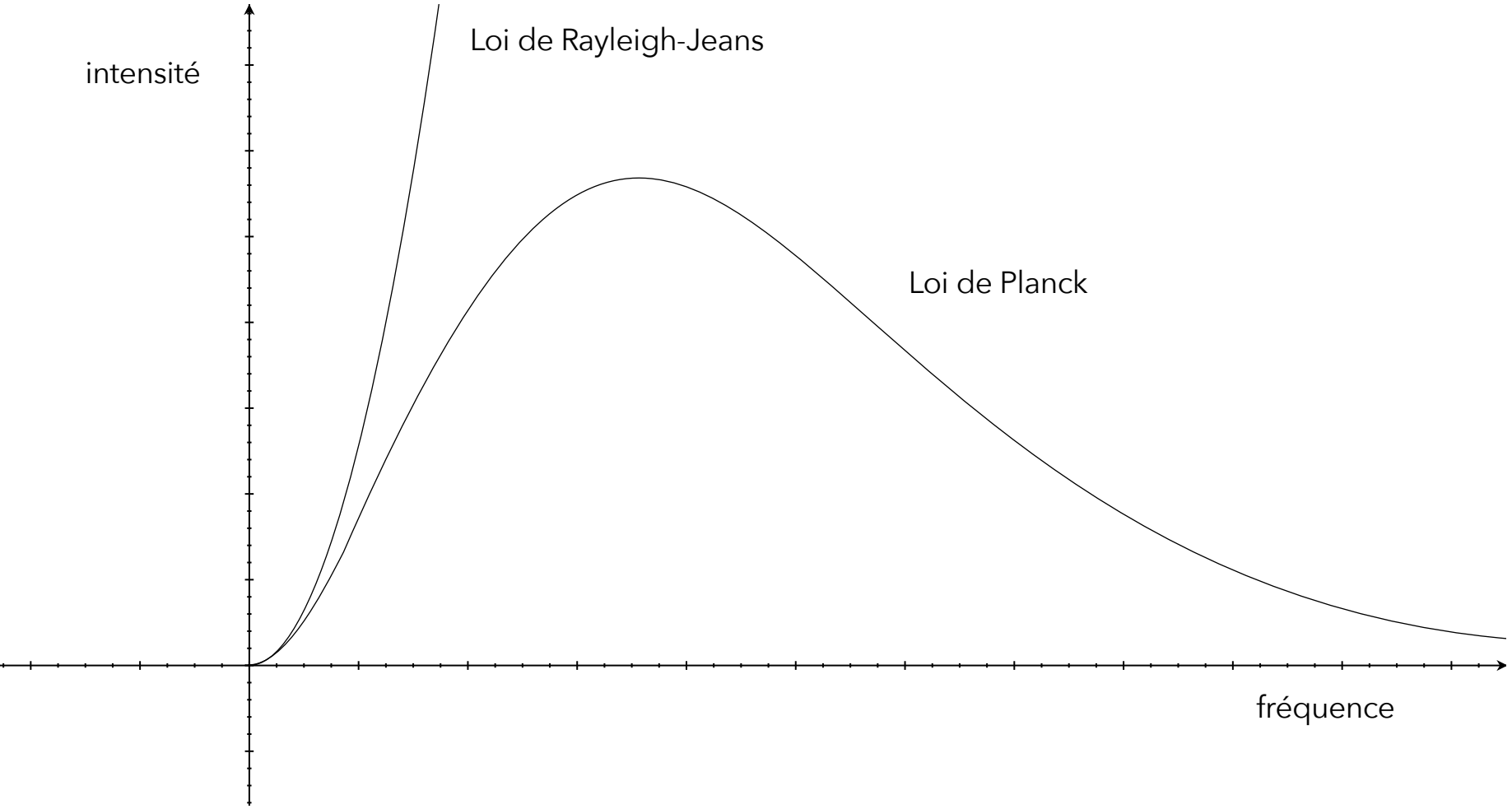
1910

1920

1930

1940

1900 Hypothèse des quanta



1900 Hypothèse des quanta

Électromagnétisme et thermodynamique

$$dN = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}\,d\nu$$

$$u(\nu) = \frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3}$$

$$\int_0^\infty u(\nu)\,d\nu \to \infty$$

Hypothèse de Planck

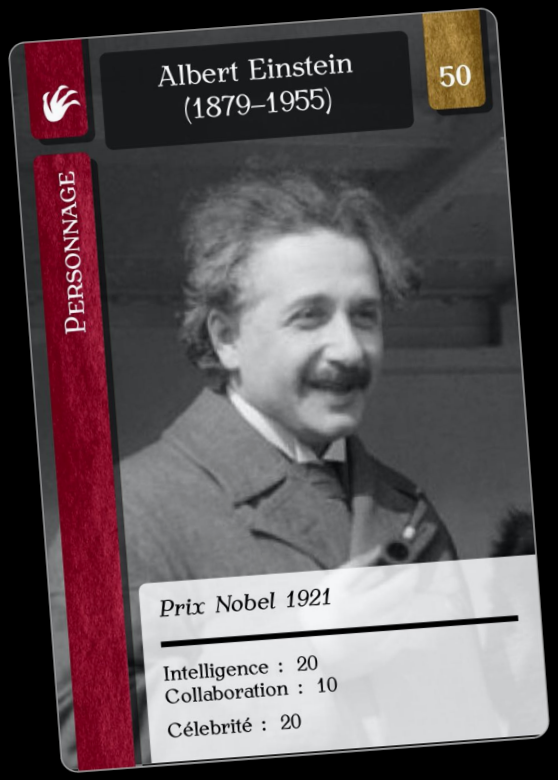
$$p(n) = \frac{\exp(-E_n/kT)}{\sum_{n=0}^{\infty}\exp(-E_n/kT)}$$

$$u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\,\frac{1}{\exp(h\nu/kT)-1}$$

$$\int_0^\infty u(\nu)\,d\nu = aT^4$$

Principe de Planck

« Une nouvelle vérité scientifique ne triomphe jamais en convainquant les opposants et en leur faisant voir la lumière, mais plutôt parce que ses opposants finissent par mourir, et qu'il arrive une nouvelle génération à qui cette vérité est familière. »



26 ans

1900

1905

Einstein explique l'effet photo-électrique

1910

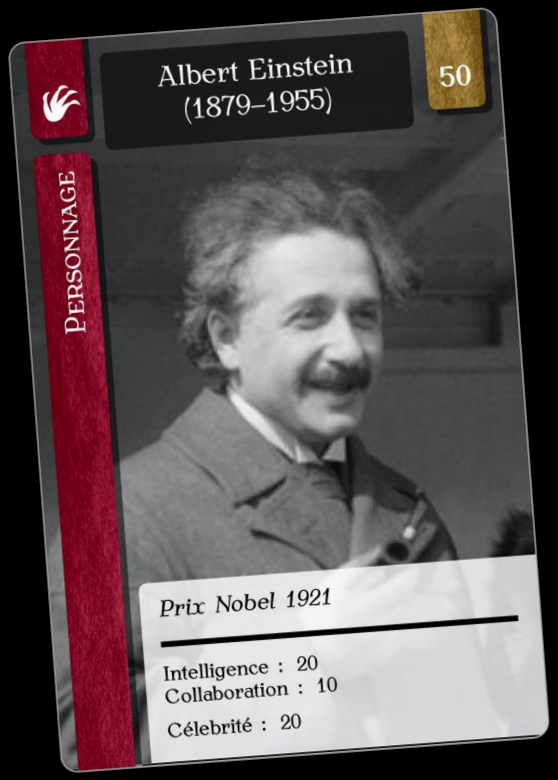
1920

1930

1940

effet photoélectrique [Quant.] (angl. *photoelectric effect*) Éjection d'électrons par une surface métallique soumise à un rayonnement électromagnétique. Si cette surface est utilisée comme cathode dans un tube à vide (on l'appelle alors **photocathode**), il apparaît un courant électrique (**photocourant**) que l'on peut mesurer. Cet effet est mis en œuvre dans certains photodétecteurs (tubes photomultiplicateurs ou cellules photosensibles) et dans les panneaux solaires, par exemple. Il fut découvert en 1887 par Heinrich Hertz (1857–1894) et joua ensuite un rôle crucial dans l'avènement de la physique quantique. En effet, l'électromagnétisme classique ne parvenait pas à expliquer les caractéristiques de ce phénomène :

- l'énergie cinétique des électrons émis est indépendante de l'intensité lumineuse ;
- l'énergie cinétique maximale des électrons croît linéairement avec la fréquence f du rayonnement utilisé ;
- les électrons commencent à être émis au bout de quelques nanosecondes, indépendamment de l'intensité lumineuse ;
- il existe un seuil en fréquence en deçà duquel l'effet disparaît ;
- le nombre d'électrons émis par unité de temps (le courant électrique) est proportionnel à l'intensité lumineuse.



1900

1907

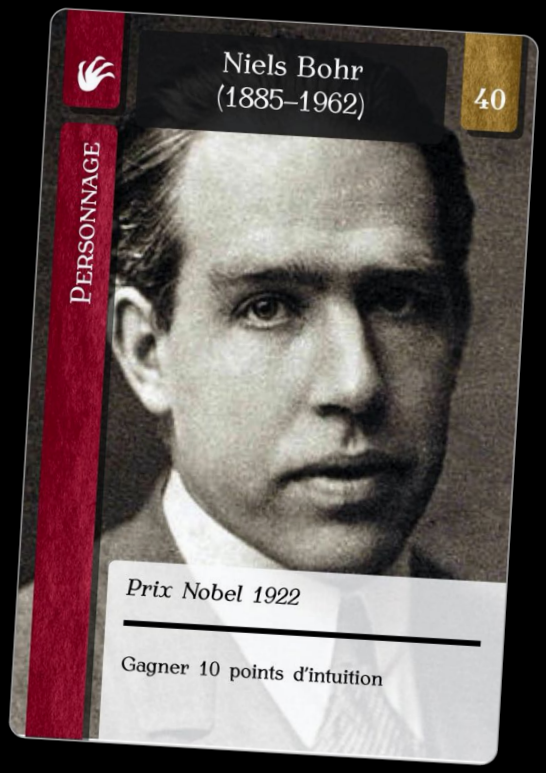
Capacité calorifique des solides

1910

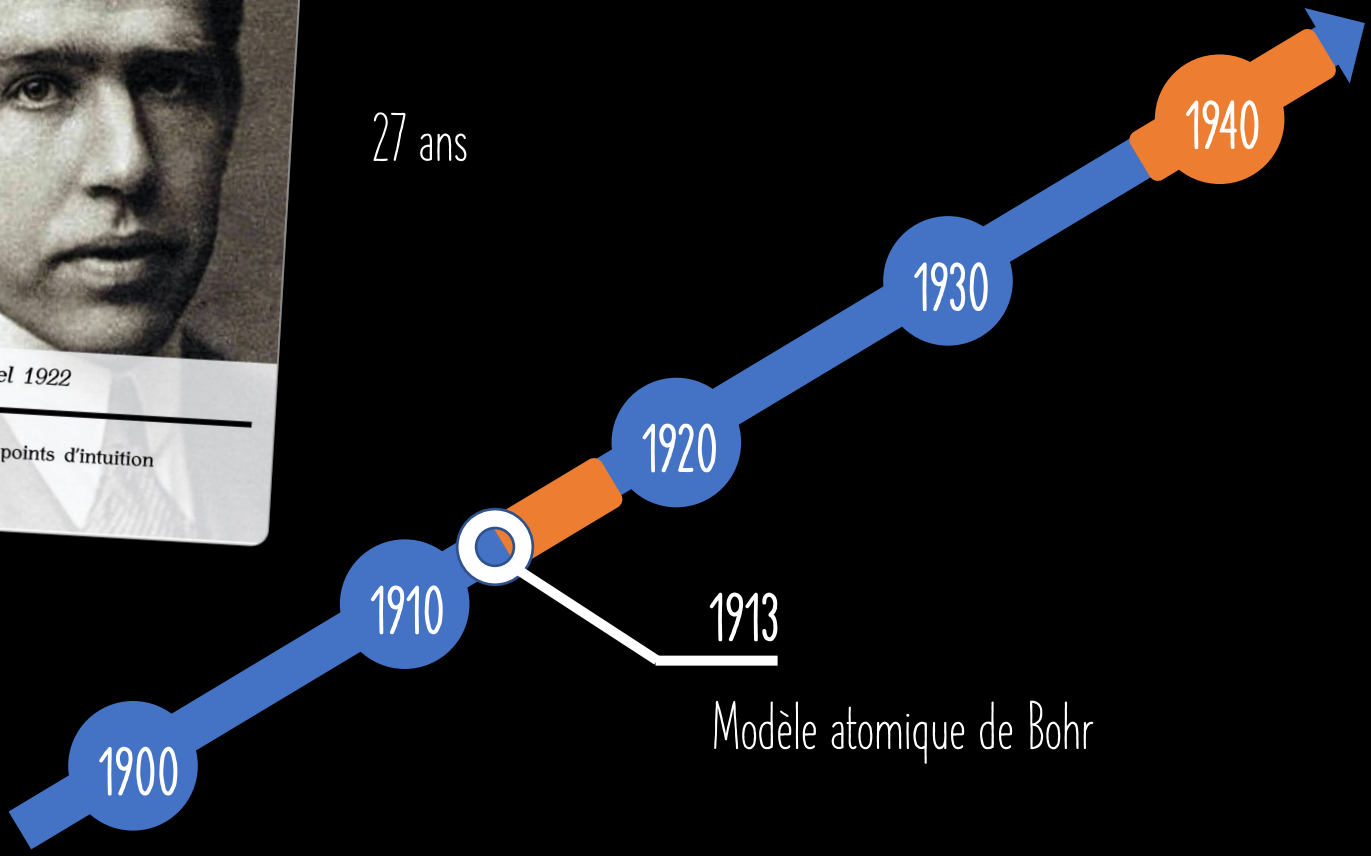
1920

1930

1940


Niels Bohr
(1885–1962)
40
Personnage
Prix Nobel 1922
Gagner 10 points d'intuition

27 ans


1900
1910
1913
1920
1930
1940
Modèle atomique de Bohr

1913 Atome de Bohr

Instabilité du modèle planétaire des atomes
Modèle de J.J. Thomson (cake aux électrons)
Résultats de Rutherford

Hypothèses de Bohr

1. Il existe des orbites atomiques sur lesquelles l'électron ne rayonne pas

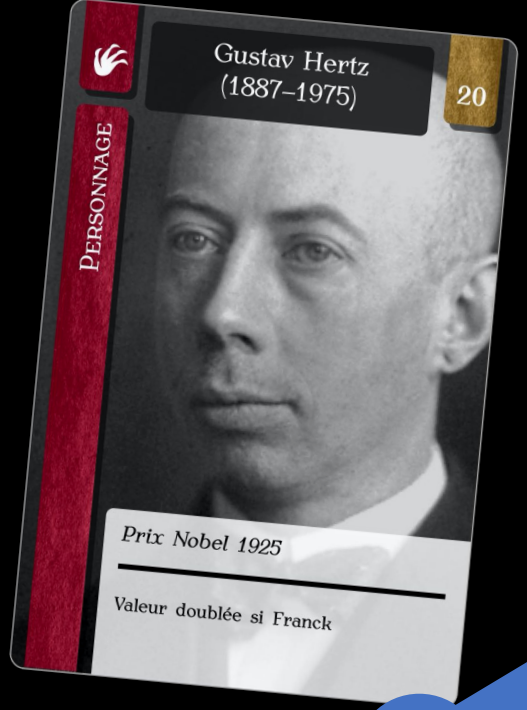
2. Un électron peut passer d'une orbite à l'autre en émettant ou absorbant un quantum de lumière

3. Les niveaux d'énergie sont tels que $\|\vec{L}\| = n\hbar$

1913 Atome de Bohr

1916 Sommerfeld et Debye étendent le modèle à des orbites elliptiques, ce qui introduit des « nombres quantiques » nouveaux (ℓ et m)

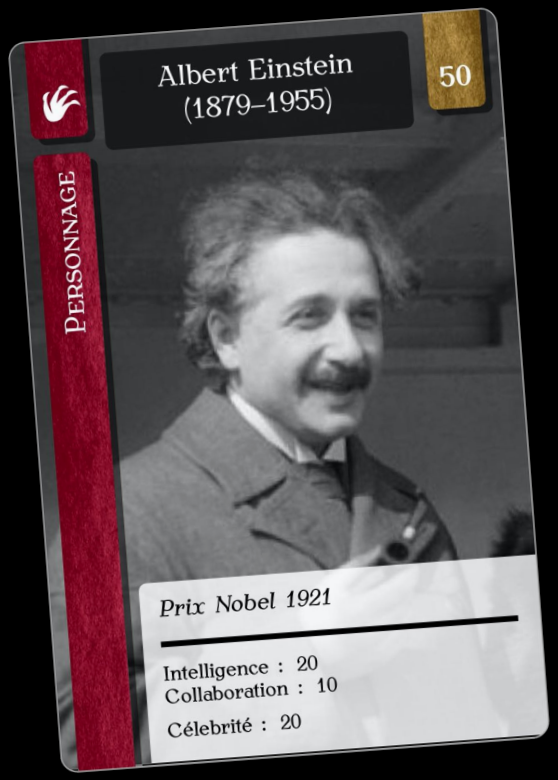
James Franck
(1882–1964)
20
Personnage
Prix Nobel 1925
Valeur doublée si Hertz

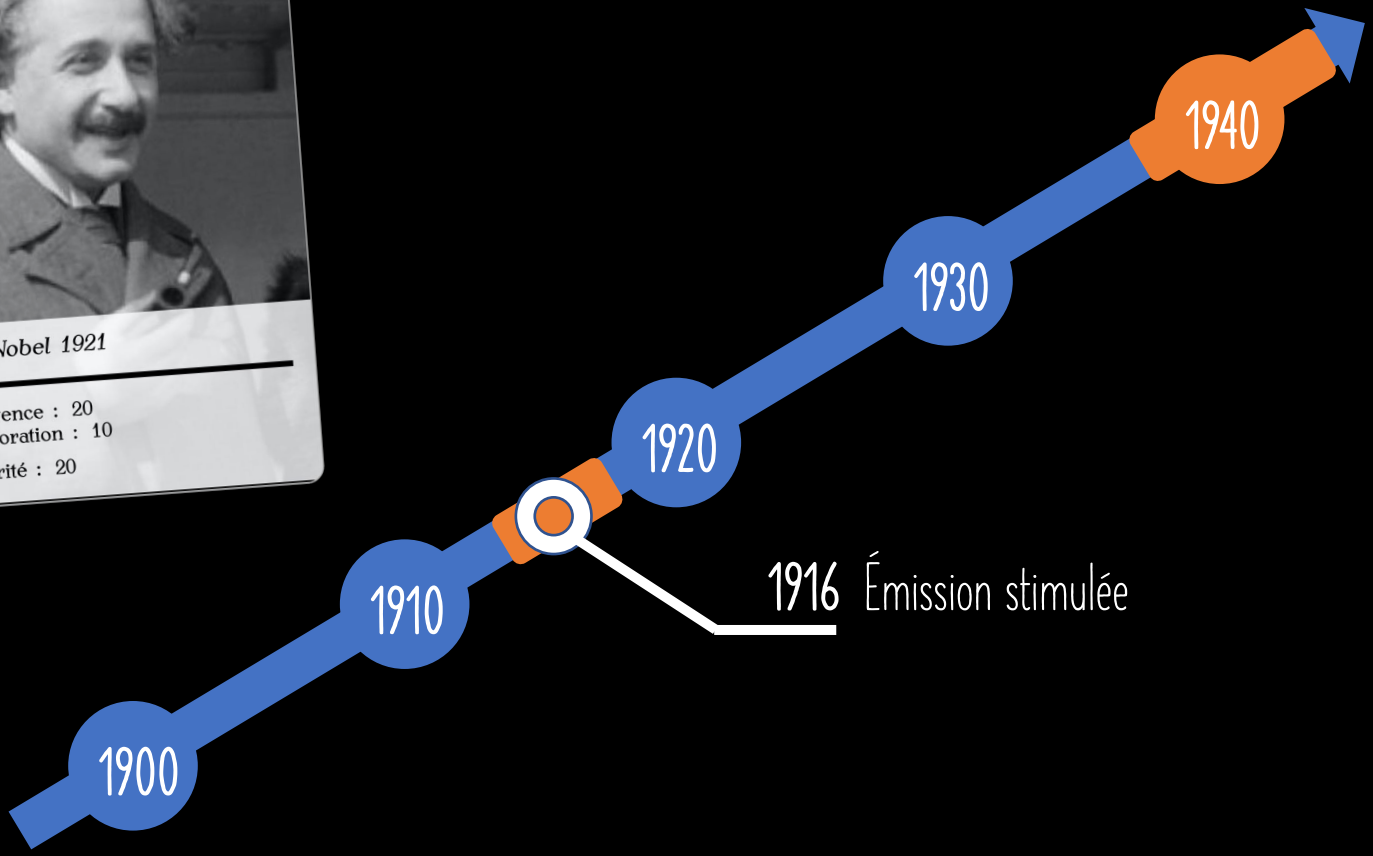

Gustav Hertz
(1887–1975)
20
Personnage
Prix Nobel 1925
Valeur doublée si Franck

1900
1910
1914
1920
1930
1940
Expérience de Franck & Hertz

Franck–Hertz (expérience de) [Quant.] (angl. *Franck-Hertz experiment*) Expérience montrant l'existence d'états excités quantifiés dans les atomes de mercure. Elle consiste à accélérer des électrons dans un tube rempli de mercure gazeux, par une différence de potentiel entre deux plaques. On remarque que pour certaines valeurs de la différence de potentiel, le courant collecté chute brutalement. Il s'agit des valeurs pour lesquelles l'électron arrive dans le tube de gaz avec une énergie qui lui permet d'exciter un atome de mercure et donc de perdre l'énergie correspondante, en subissant une collision inélastique. Cette expérience fut réalisée en 1914 par James Franck (1882–1964) et Gustav Hertz (1887–1975) (neveu de Heinrich Hertz, celui qui donna son nom à l'unité), et récompensée par le prix Nobel en 1925.

- ▷ *[Notes and Discussions] Comment on the Franck-Hertz experiment* ; J. S. Huebner ; American Journal of Physics **44** (1976) p. 302
- ▷ *What really happens in the Franck-Hertz experiment with mercury ?* ; G. F. Hanne ; American Journal of Physics **56** (1988) p. 696
- ▷ *New features of the Franck-Hertz experiment* ; Gerald Rapior, Klaus Sengstock, Valery Baev ; American Journal of Physics **74** (2006) p. 423
- ▷ *The Franck-Hertz Experiments, 1911–1914 Experimentalists in Search of a Theory* ; Clayton A. Gearhart ; Physics in Perspective **3** (2014) p. 293


Albert Einstein
(1879–1955)
50
Personnage
Prix Nobel 1921
Intelligence : 20
Collaboration : 10
Célébrité : 20


1900
1910
1916 Émission stimulée
1920
1930
1940

émission stimulée [Quant.] (angl. *stimulated emission*) Désexcitation radiative d'un système sous l'action d'un rayonnement électromagnétique. On l'appelle aussi **émission induite**. La perturbation électromagnétique d'un système quantique initialement dans un état excité, par exemple sous l'action d'une onde lumineuse, peut conduire à une transition vers un état d'énergie inférieure. Plus précisément, en interagissant avec un photon dont la longueur d'onde correspond à celle associée à une transition électronique, un système peut passer dans un état d'énergie moindre en émettant un second photon identique au premier qui n'est lui-même pas modifié par l'interaction. Les deux photons ont la même énergie, la même quantité de mouvement (en particulier, le second est émis dans la direction de propagation du premier), la même polarisation et la même phase. Dans un milieu dans lequel on favorise ce type d'émission (▷ *inversion de population*), les deux photons identiques peuvent à leur tour conduire chacun à l'émission de deux autres photons identiques, etc. La cascade qui en résulte est à la base du fonctionnement des masers et des lasers. C'est l'un des trois processus fondamentaux de transition électromagnétique d'un système quantique (▷ *émission spontanée*, *absorption*). Il fut introduit de façon théorique en 1917 par Albert Einstein (1879–1955) pour expliquer l'équilibre thermodynamique d'un rayonnement de corps noir, puis observé indirectement en 1928 par Rudolf Ladenburg (1882–1952) et Hans Kopfermann (1895–1963), dans des mesures spectroscopiques de précision (▷ *absorption négative*). Le terme « émission stimulée » fut introduit en 1924 par John van Vleck (1889–1980).

1916 Émission stimulée

Trois modes d'interaction atome/lumière

1. **Absortion** d'un quantum lumineux
   L'atome passe d'un niveau E_n à un autre $E_m > E_n$

2. **Émission spontanée** d'un quantum lumineux
   L'atome passe d'un niveau excité E_n à $E_m < E_n$

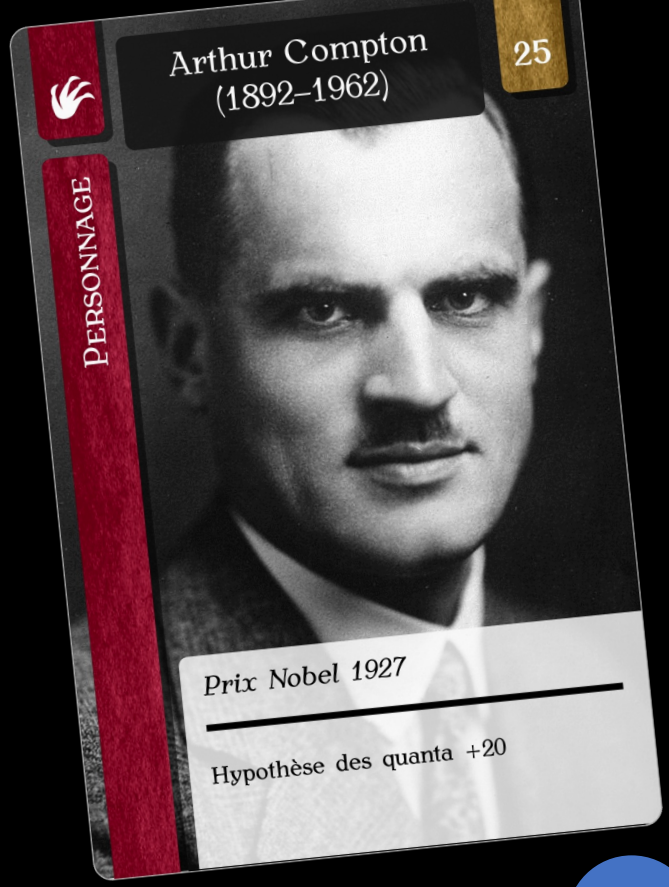
3. **Émission stimulée** d'un quantum lumineux
   L'atome soumis à un quantum d'énergie E_n-E_m passe du niveau E_n à E_m en émettant un quantum identique au quantum incident

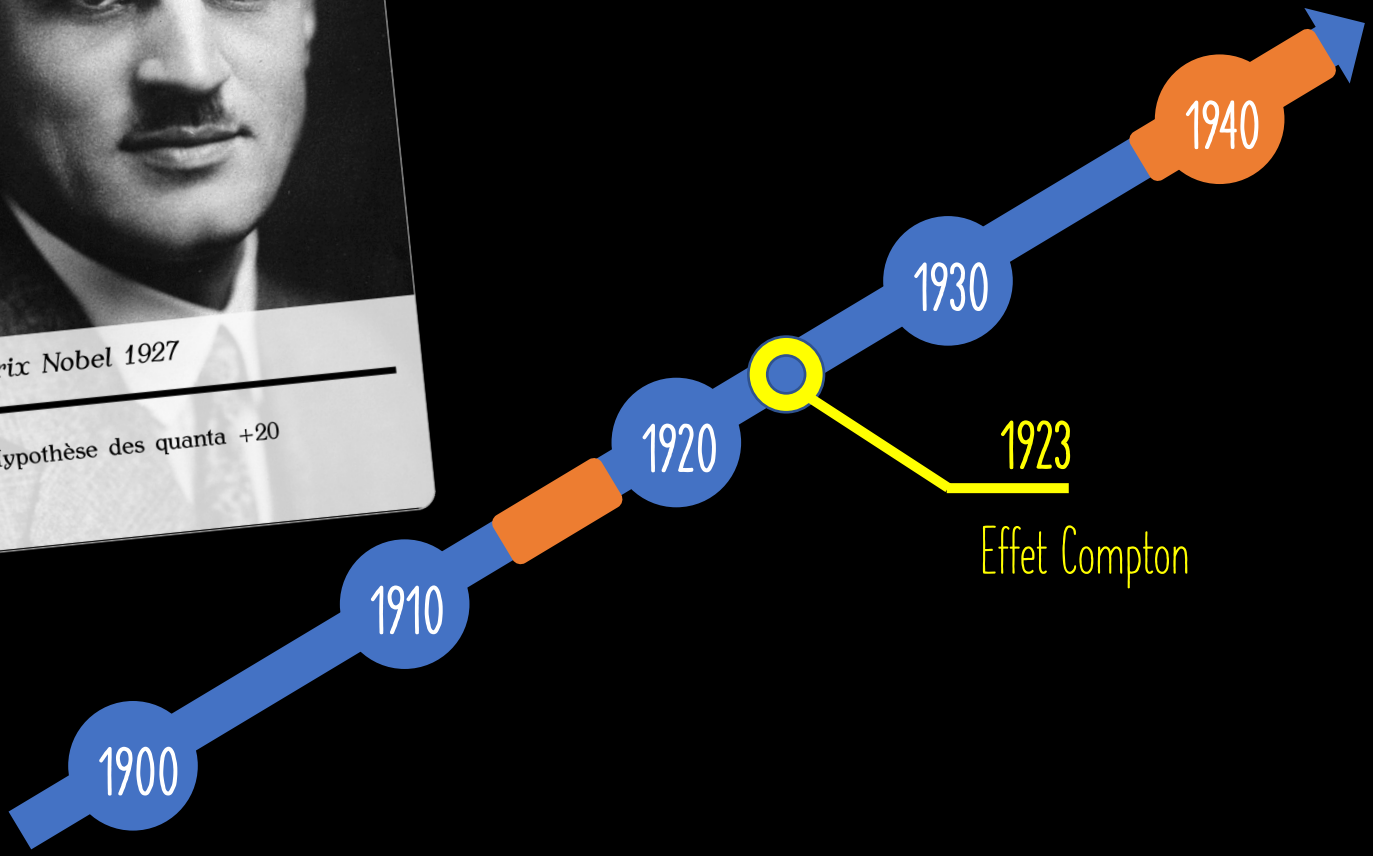
Retombée en 1960 : rayonnement LASER

Otto Stern
(1988–1969)
15
Personnage
Prix Nobel 1943
Valeur doublée si Gerlach
Walther Gerlach
(1989–1979)
15
Personnage
Prix Nobel 1943
Valeur doublée si Stern
1900
1910
1920
1922
1930
1940
Expérience de Stern & Gerlach

Stern–Gerlach (expérience de) [Quant.] (angl. *Stern-Gerlach experiment*) Expérience mettant en évidence la quantification du moment magnétique dans les atomes. Dans cette expérience, un faisceau d'atomes d'argent est envoyé dans l'entrefer d'un aimant, où le gradient de champ magnétique trie les atomes selon l'une des composantes de leur moment magnétique. Stern et Gerlach observèrent que, dans le cas des atomes d'argent, le faisceau se scinde en deux parties bien séparées spatialement, ce qui montre que le moment magnétique ne peut prendre que deux valeurs discrètes, et non un continuum de valeurs comme on s'y attendrait à partir du modèle atomique proposé par Niels Bohr (1885–1962). Le fait que le faisceau se scinde en un nombre pair indique que le moment magnétique n'est pas de type orbital et témoigne de l'existence du spin. Cette expérience fut réalisée en 1922 par Otto Stern (1888–1969) et Walther Gerlach (1889–1979).

- ▷ *Paradox in the treatment of the Stern-Gerlach experiment* ; Preben Alstrøm, Poul Hjorth, Richard Mattuck ; American Journal of Physics **50** (1982) p. 697
- ▷ *Comment on "Paradox in the treatment of the Stern-Gerlach experiment"* ; Sardar Singh, N. K. Sharma ; American Journal of Physics **52** (1984) p. 274
- ▷ *Wrong theory—Right experiment : The significance of the Stern-Gerlach experiments* ; Friedel Weinert ; Studies in History and Philosophy of Science Part B **1** (1995) p. 75
- ▷ *Stern and Gerlach : How a Bad Cigar Helped Reorient Atomic Physics* ; Bretislav Friedrich, Dudley Herschbach ; Physics Today **56** (2003) p. 53


Personnage
Arthur Compton
(1892–1962)
25
Prix Nobel 1927
Hypothèse des quanta +20


1900
1910
1920
1923
Effet Compton
1930
1940

Compton (effet) [Quant.] (angl. *Compton effect*) Diffusion d'un photon par un électron, aussi appelée **diffusion Compton**. Le changement d'énergie du photon dû au recul de l'électron se traduit par un changement de longueur d'onde $\Delta\lambda$, lié de façon univoque à la direction de diffusion par

$$\Delta\lambda = \lambda_c(1 - \cos\theta) \quad \text{avec} \quad \lambda_c \equiv \frac{h}{m_e c} ,$$

où l'on a introduit la **longueur d'onde de Compton de l'électron** $\lambda_c \approx 2{,}426 \times 10^{-3}\,\text{nm}$, la masse de l'électron m_e, la constante de Planck h et la vitesse de la lumière c. Cette variation de longueur d'onde est faible (de l'ordre de 10^{-5}) pour la lumière visible. En revanche, elle devient importante pour des rayons X et des rayons gamma. Cet effet a été découvert en 1923 par Arthur Compton (1892–1962), avec des rayons X de longueur d'onde 0,071 nm. Il reçut pour cela le prix Nobel en 1927.

- ▷ *A new angle on Compton scattering* ; Dan Wilkins ; American Journal of Physics **60** (1992) p. 221
- ▷ *Compton scattering by nuclei* ; M.-Th. Hütt, A.I. L'vov, A.I. Milstein, M. Schumacher ; Physics Reports **323** (2000) p. 457
- ▷ *The Compton effect as one path to QED* ; Laurie M. Brown ; Studies in History and Philosophy of Science Part B **2** (2002) p. 211

30 ans

1900

1910

1920

1924

Statistique de Bose-Einstein

1930

1940

distribution de Bose–Einstein [Phys. stat.] (angl. *Bose-Einstein distribution*) Fonction de distribution décrivant une assemblée de bosons à l'équilibre thermodynamique. On l'appelle aussi **statistique de Bose-Einstein**. Le nombre de bosons N_i occupant le niveau d'énergie ϵ_i de dégénérescence g_i à la température T, est donné par

$$N_i = \frac{g_i}{e^{(\epsilon_i - \mu)/k_\mathrm{B}T} - 1} \,,$$

où μ désigne le potentiel chimique du système de bosons (lorsqu'il existe) et k_B la constante de Boltzmann. Dans le cas particulier où les particules sont des photons, cette distribution donne la loi du rayonnement de Planck. Elle se réduit à la distribution de Maxwell-Boltzmann corrigée lorsque $\mu/k_\mathrm{B}T \ll -1$. Elle fut introduite en 1920 par Satyendranath Bose (1894–1974), puis généralisée et diffusée plus largement en 1924 par Albert Einstein (1879–1955).

32 ans

1900

1910

1920

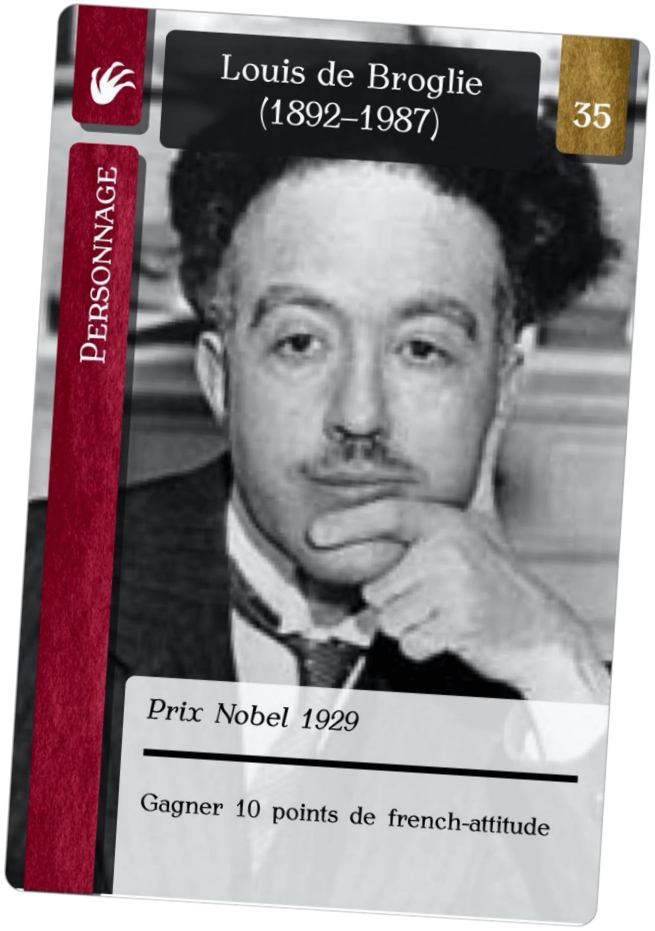
1924

Caractère ondulatoire de la matière

1930

1940

1924 Louis de Broglie



Longueur d'onde de de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Équivalence entre principe de Fermat et principe de moindre action

Explique les conditions de Bohr

https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00006807

Samuel Goudsmit
(1902–1978)
15
Personnage
Valeur doublée si Uhlenbeck
Gagnez 5 points de persuasion

George Uhlenbeck
(1900–1988)
15
Personnage
Valeur doublée si Goudsmit
Gagnez 5 points de persuasion

1900
1910
1920
1925
1930
1940
Notion de spin de l'électron

24 ans

23 ans

43 ans

1900

1910

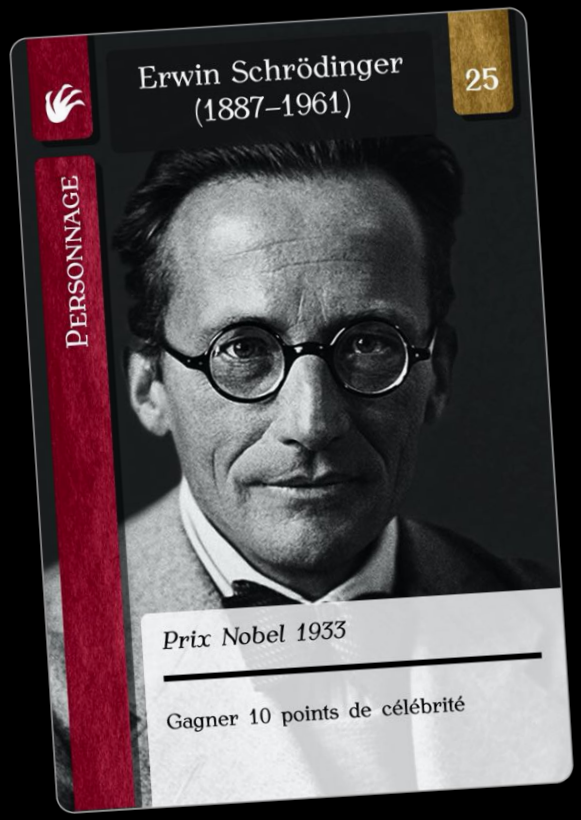
1920

1925

1930

1940

Formalisation matricielle



1900

1910

1920

38 ans

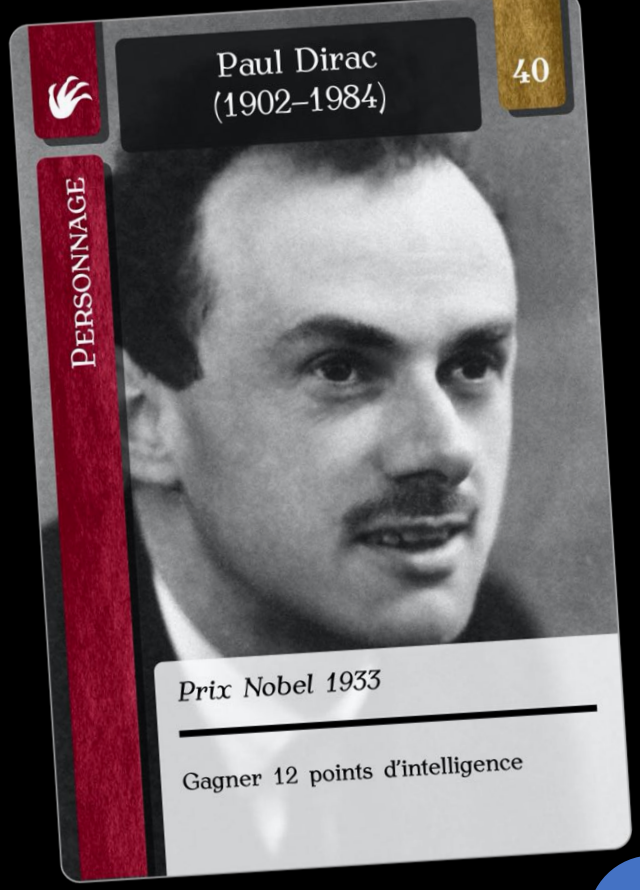
1925

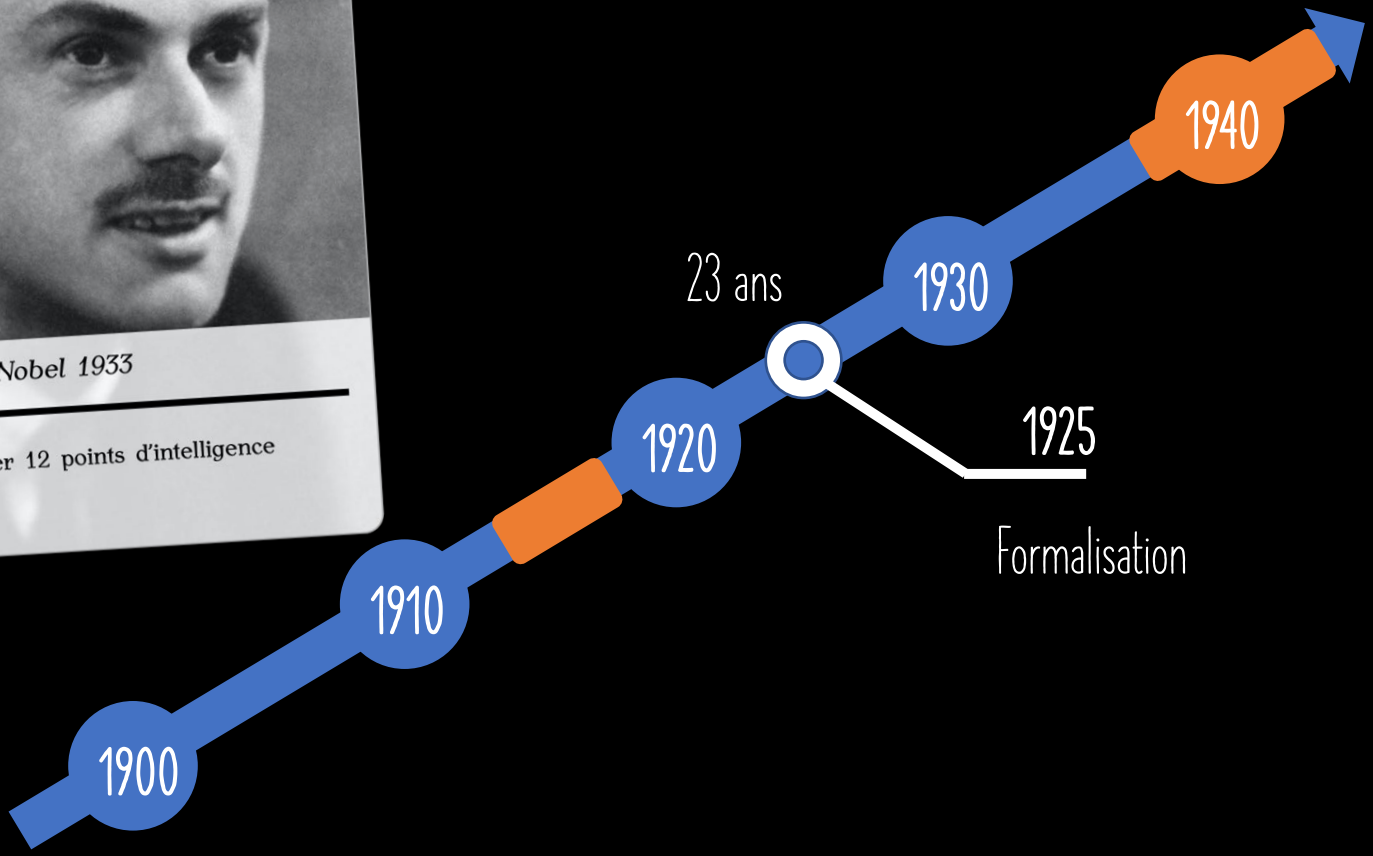
Formalisation

Approche ondulatoire

1930

1940


Paul Dirac
(1902–1984)
40
Personnage
Prix Nobel 1933
Gagner 12 points d'intelligence


1900
1910
1920
23 ans
1925
Formalisation
1930
1940

Formalisation de Dirac

$$\hat{A}|\psi\rangle = a|\psi\rangle$$

Formalisation de Dirac

$$\hat{A}|\psi\rangle = a|\psi\rangle$$

$$\{A, B\} \equiv \sum_i \left(\frac{\partial A}{\partial q_i} \frac{\partial B}{\partial p_i} - \frac{\partial A}{\partial p_i} \frac{\partial B}{\partial q_i} \right)$$

$$[A, B] \equiv AB - BA$$

$$[A, B] \longleftarrow i\hbar \{A, B\}$$

25 ans

1900

1910

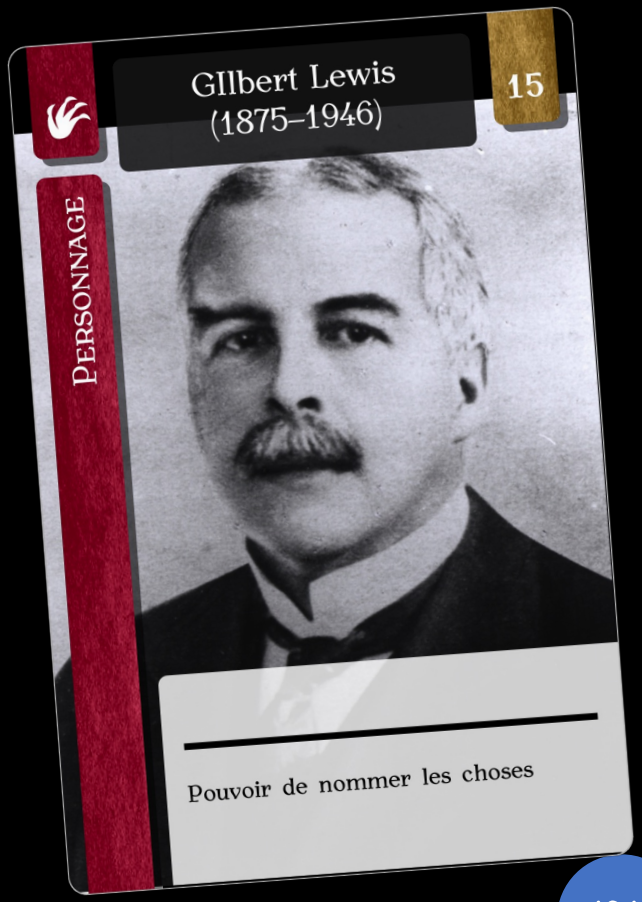
1920

1925

Principe d'exclusion

1930

1940



1900

1910

1920

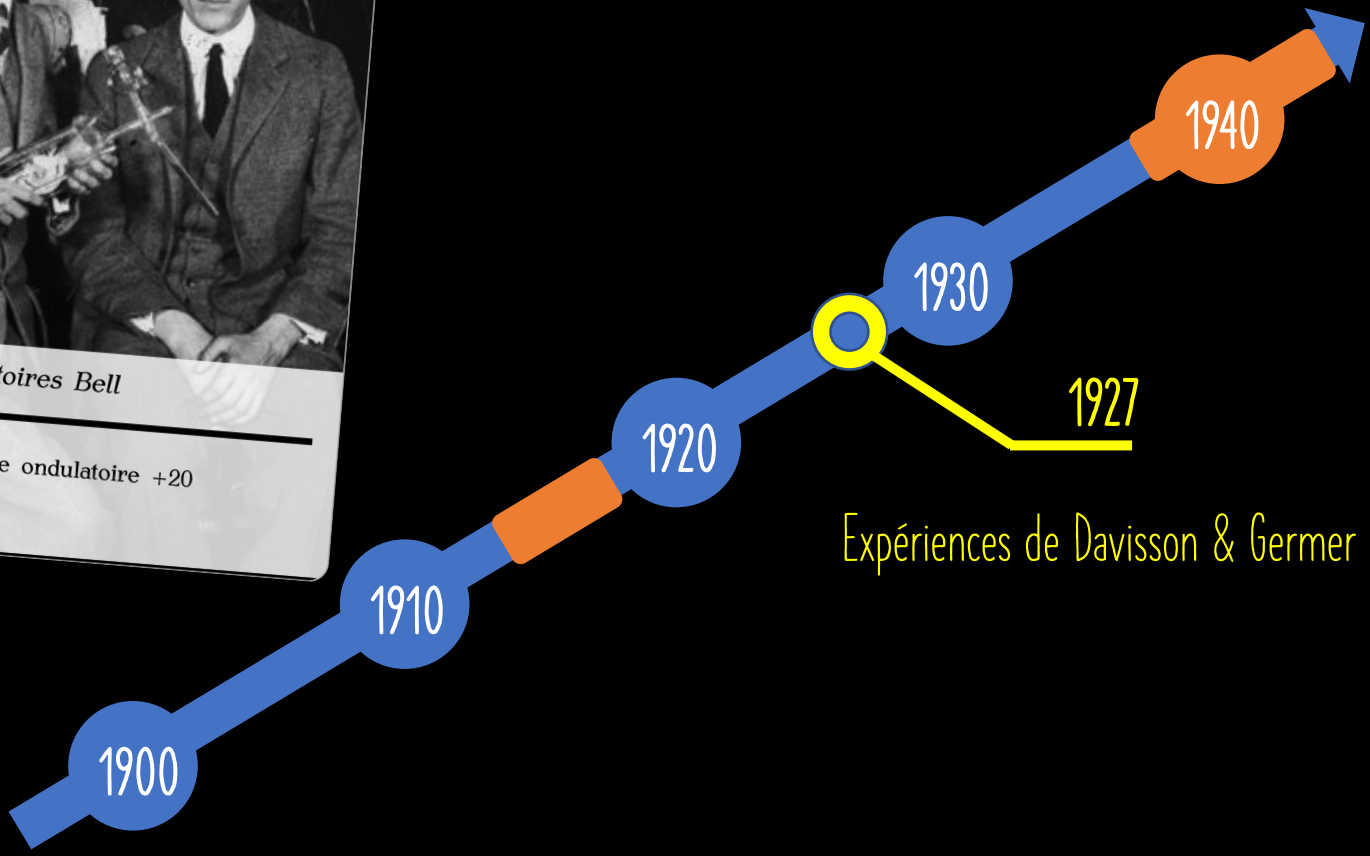
1926

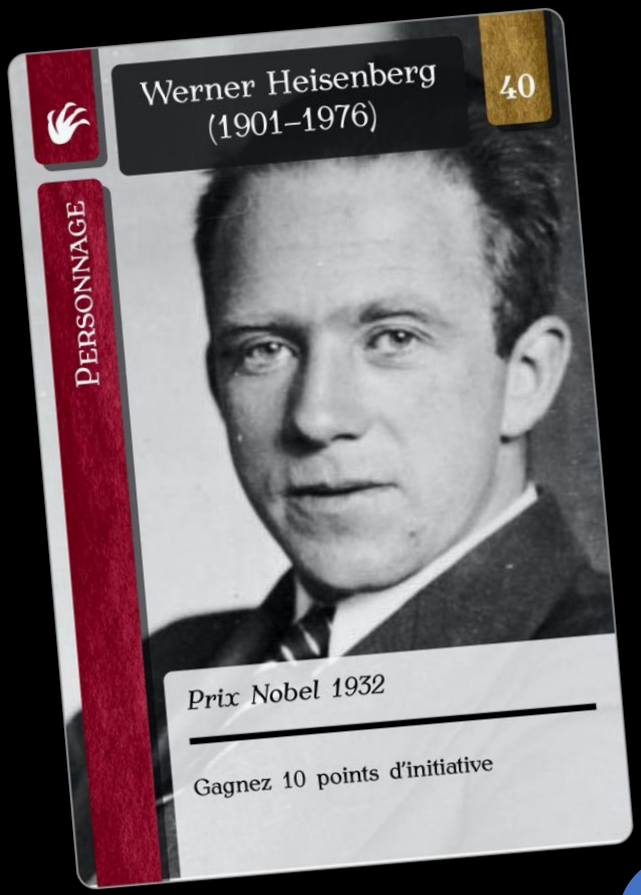
Introduction du mot « photon »

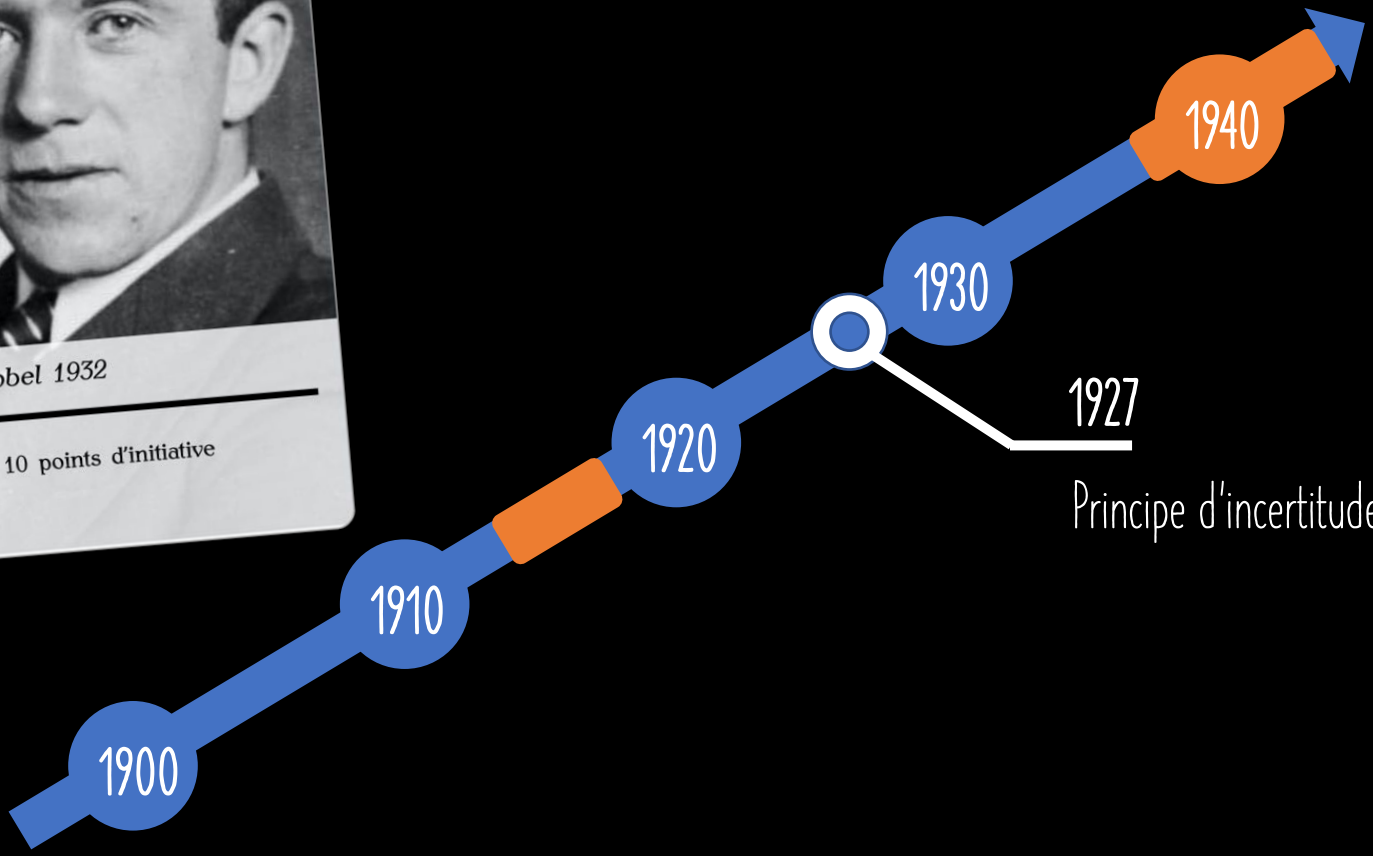
1930

1940

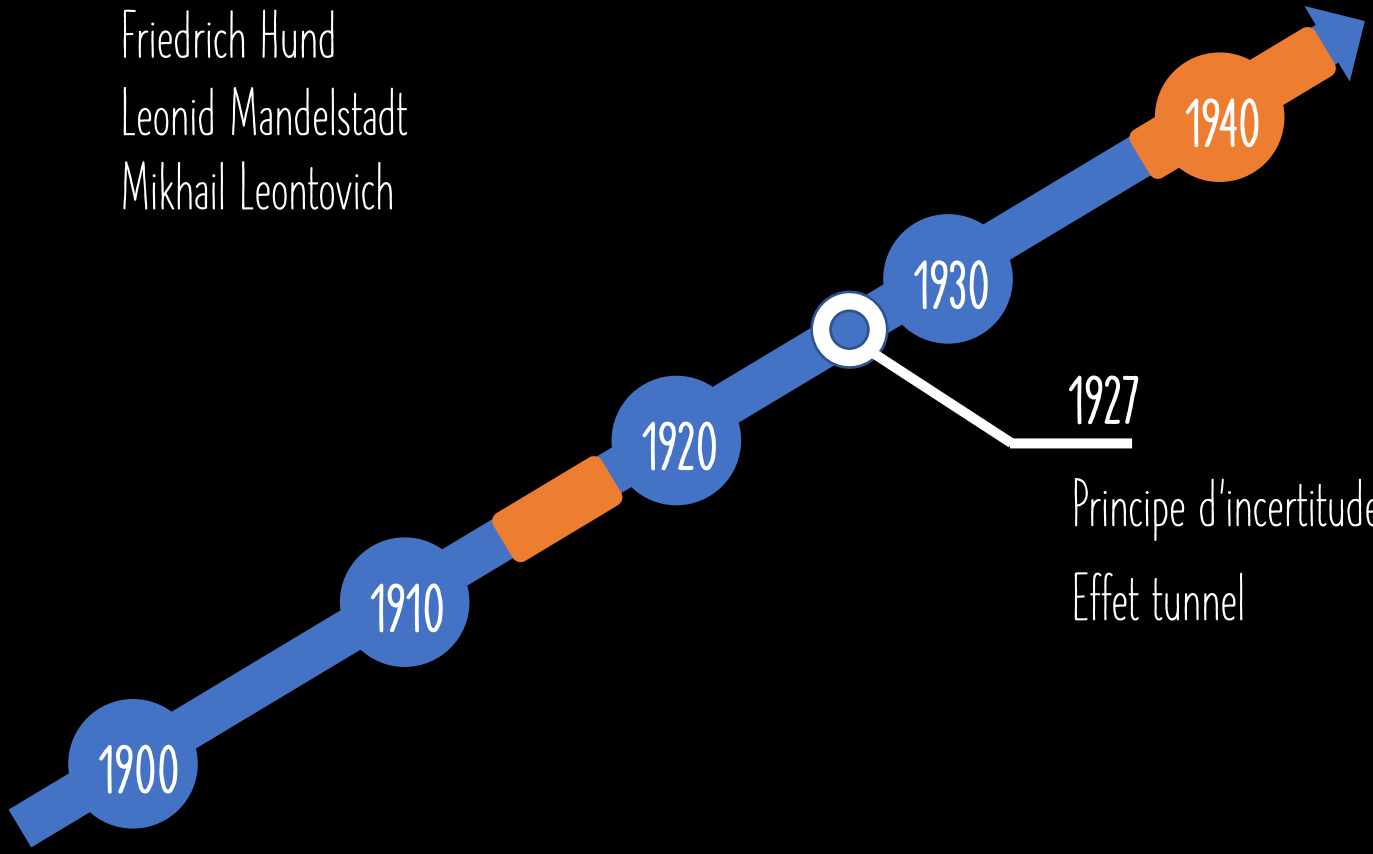
Expérience de
Davisson & Germer
1927
25
Expérience
Laboratoires Bell
Hypothèse ondulatoire +20

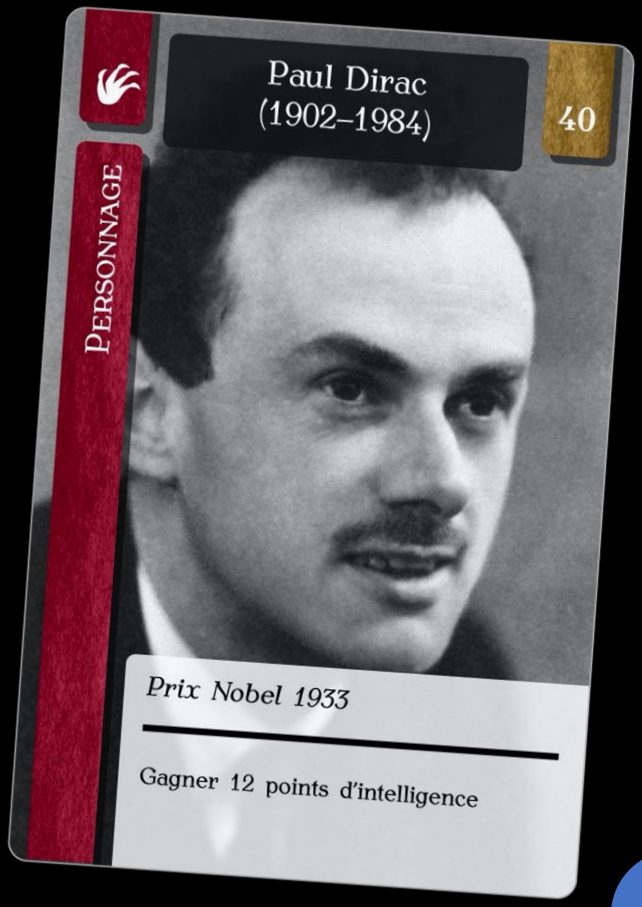

1900
1910
1920
1930
1940
1927
Expériences de Davisson & Germer

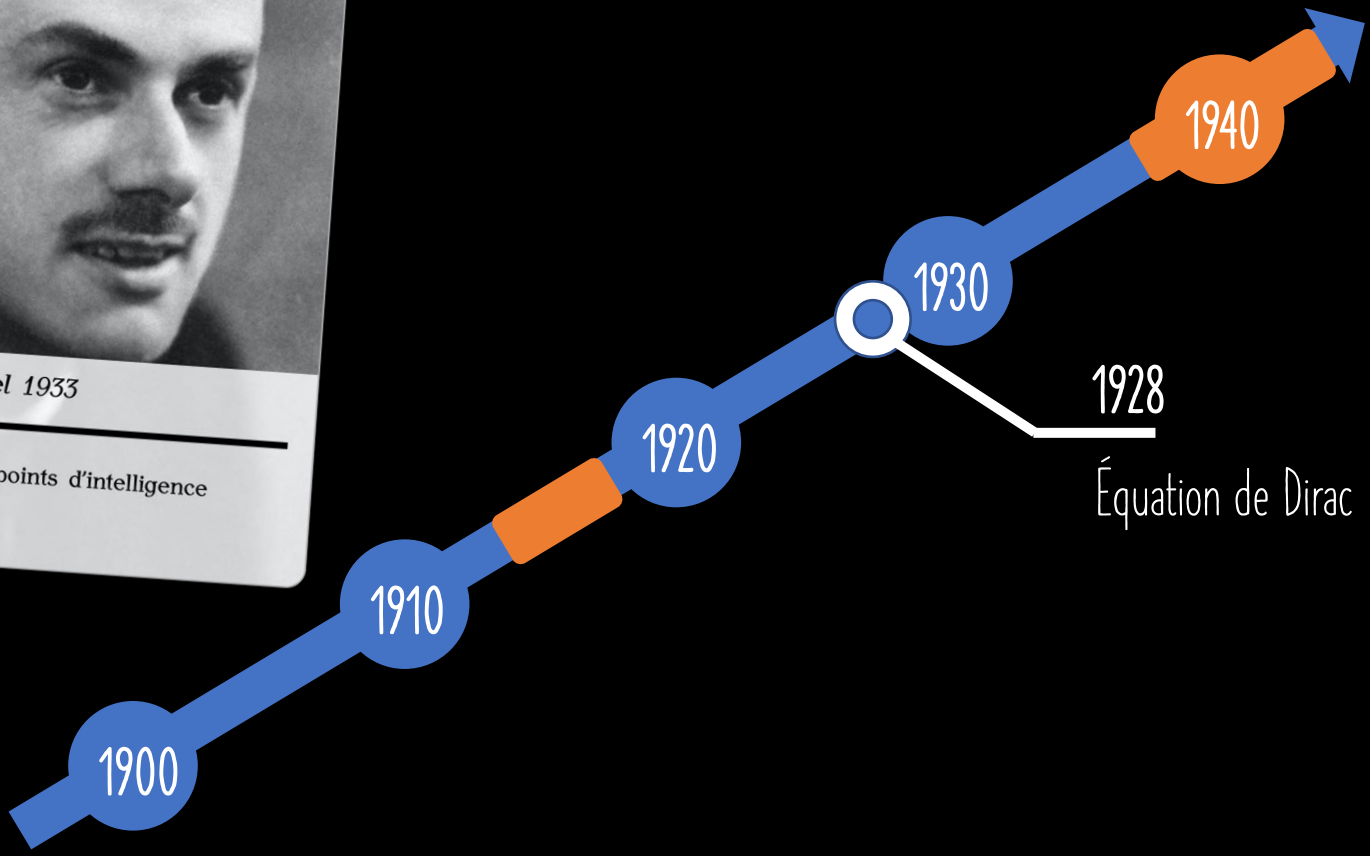

Werner Heisenberg
(1901–1976)
40
Personnage
Prix Nobel 1932
Gagnez 10 points d'initiative

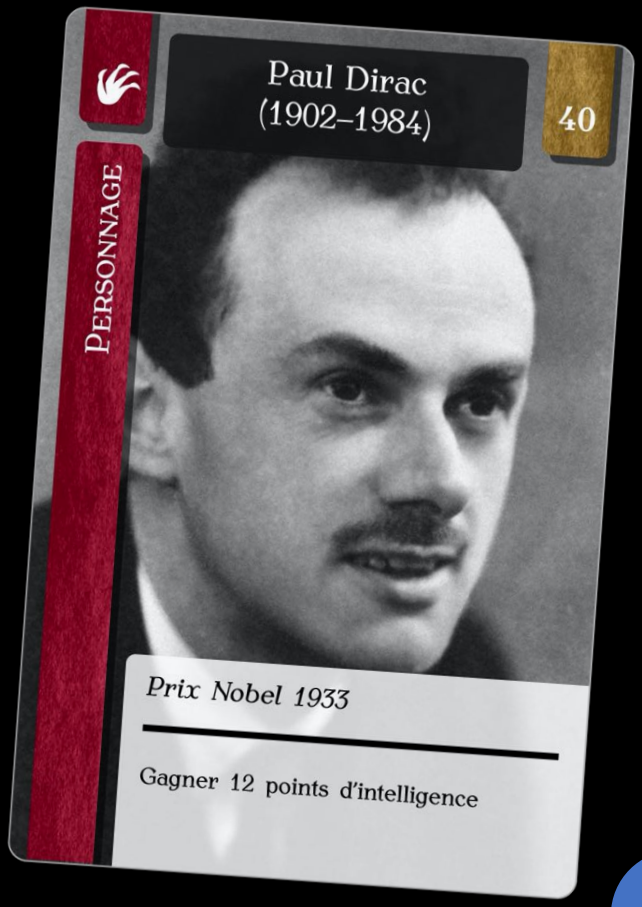

1900
1910
1920
1930
1940
1927
Principe d'incertitude

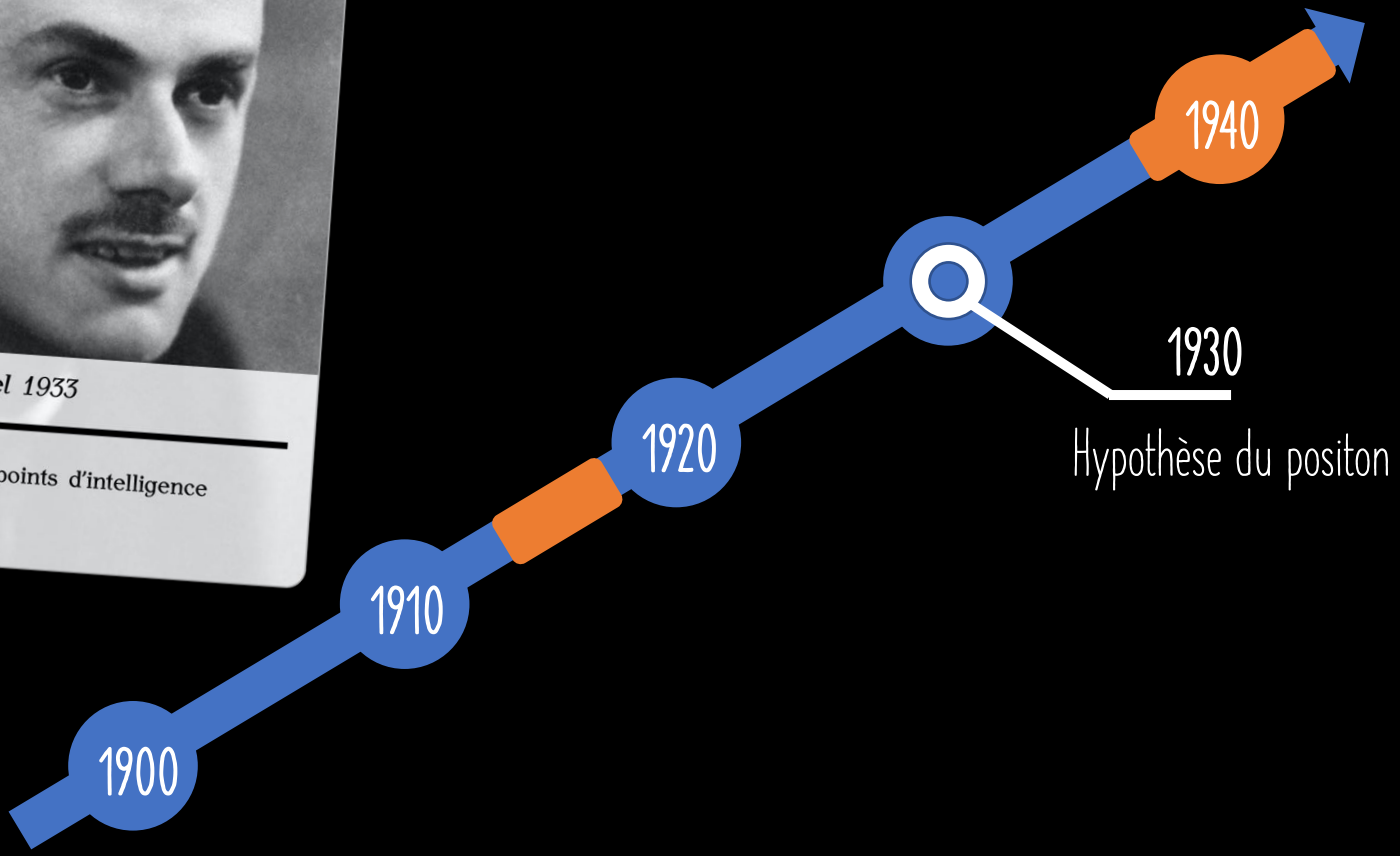
Friedrich Hund
Leonid Mandelstadt
Mikhail Leontovich

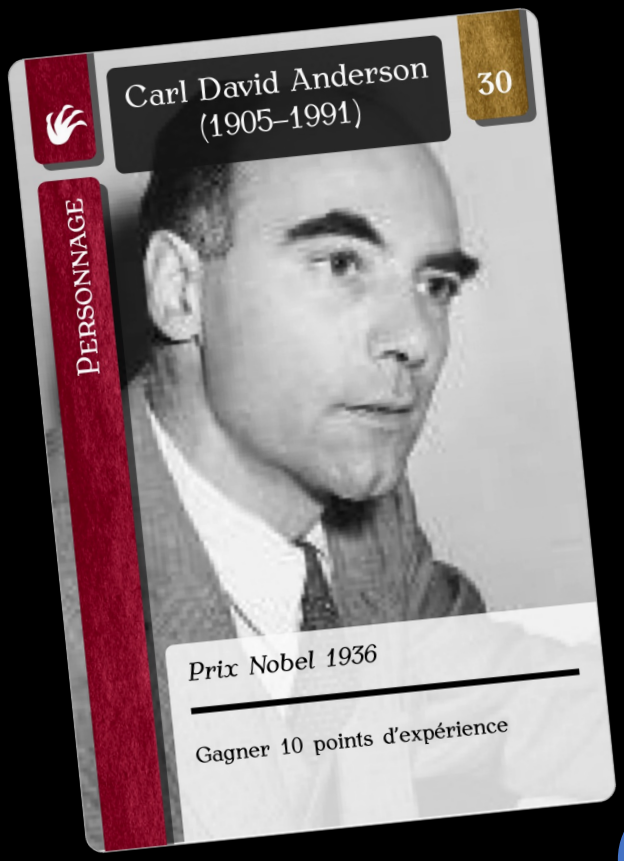



Paul Dirac
(1902–1984)
40
Personnage
Prix Nobel 1933
Gagner 12 points d'intelligence


1900
1910
1920
1930
1940
1928
Équation de Dirac


Paul Dirac
(1902–1984)
40
Personnage
Prix Nobel 1933
Gagner 12 points d'intelligence


1900
1910
1920
1930
1940
Hypothèse du positon



Observation du positon 1931

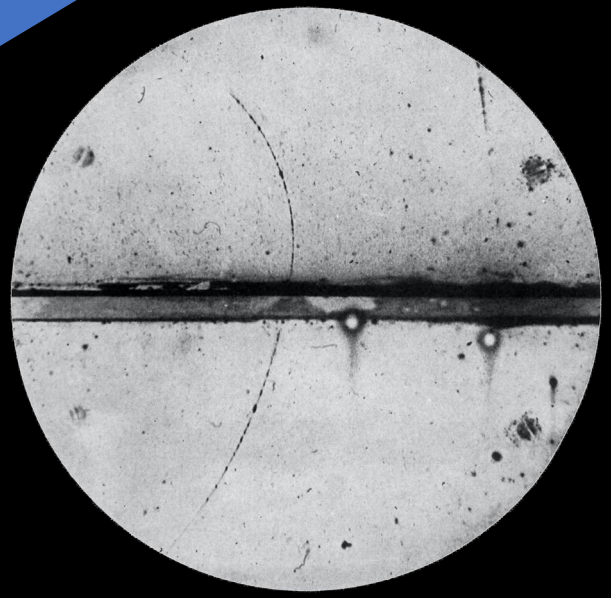
1900

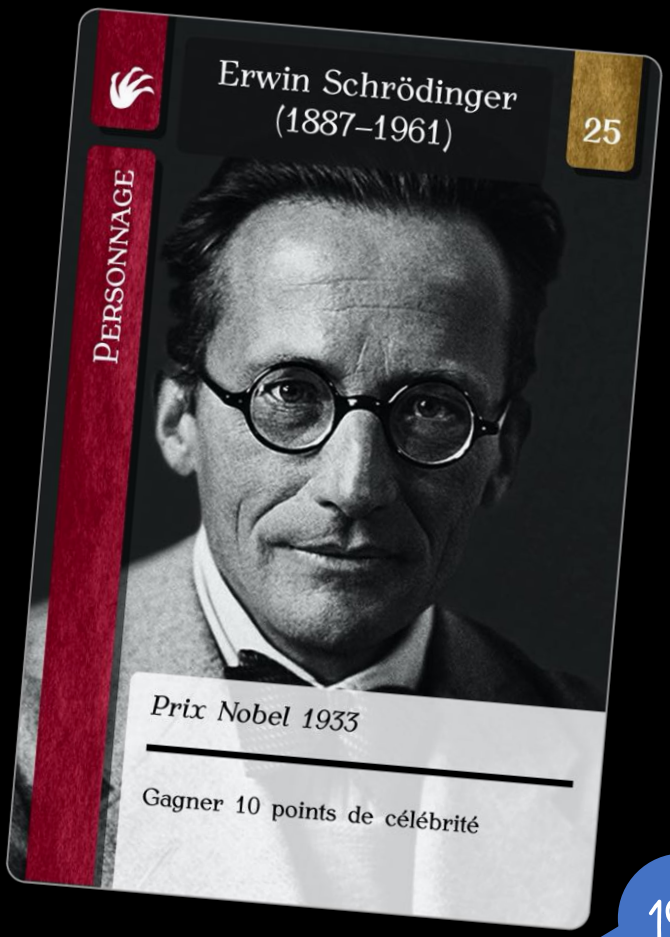
1910

1920

1930

1940





1935

Chat de Schrödinger

1900

1910

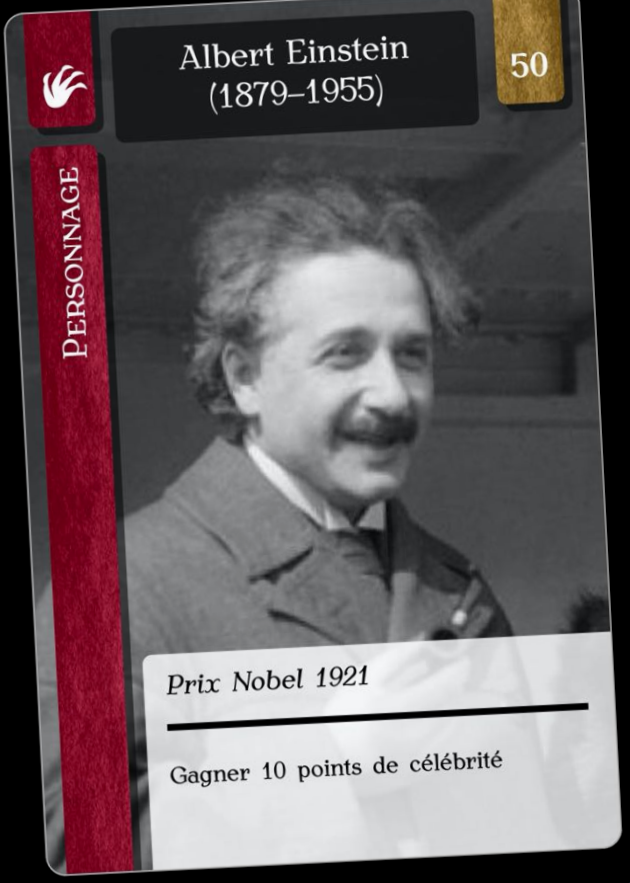
1920

1930

1940

« One can even set up quite ridiculous cases. A cat is penned up in a steel chamber, along with the following diabolical device (which must be secured against direct interference by the cat): in a Geiger counter there is a tiny bit of radioactive substance, *so* small, that *perhaps* in the course of one hour one of the atoms decays, but also, with equal probability, perhaps none; if it happens, the counter tube discharges and through a relay releases a hammer which shatters a small flask of hydrocyanic acid. If one has left this entire system to itself for an hour, one would say that the cat still lives *if* meanwhile no atom has decayed. The first atomic decay would have poisoned it. The ψ-function of the entire system would express this by having in it the living and the dead cat (pardon the expression) mixed or smeared out in equal parts. »

Schrödinger, 1935



1935

Chat de Schrödinger

Paradoxe EPR

1900

1910

1920

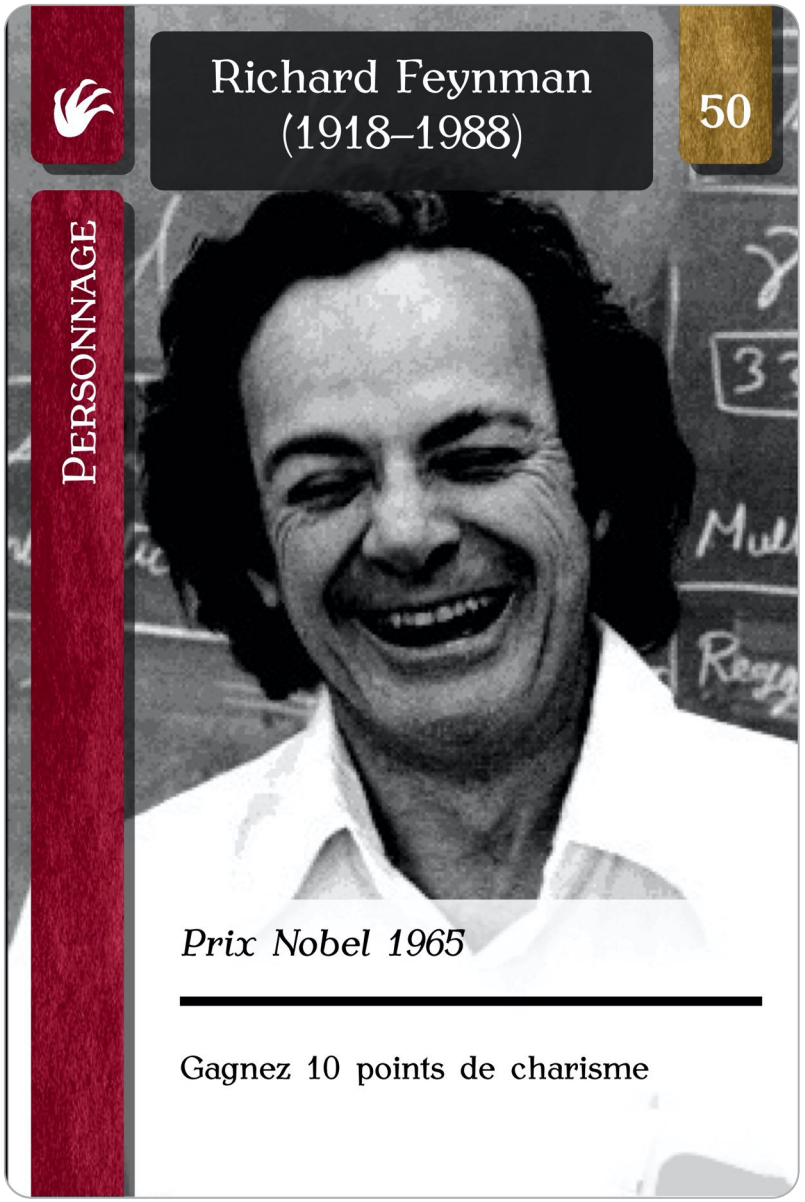
1930

1940

Ce qui manque

1961 – Expérience de pensée de l'ami de Wigner
1964 – Inégalités de Bell
1981 – Expériences d'Aspect

Électrodynamique quantique
Physique nucléaire
Physique des particules
Développement de la cryptographie quantique
Interférences avec des grosses molécules
Développement des ordinateurs quantiques
Supraconductivité
Superfluidité



MAY 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

Repères épistémologiques

La mécanique quantique donne lieu à des interprétations, par exemple :

Interprétation de Copenhague
Théorie de Bohm

Interprétation de Copenhague

On accède à des informations sur le monde grâce à des mesures

La MQ permet de déterminer les résultats possibles d'une mesure, avec leur probabilité, via l'évolution de la fonction d'onde

Les mesures modifient le système

On ne peut pas faire mieux !

Interprétation de Bohm

1927 Présentation de l'onde-pilote par Louis de Broglie

1954 Interprétation reprise et affinée par David Bohm

L'onde décrite par l'équation de Schrödinger a une existence physique

Elle détermine complètement la position de la particule

Interprétation de Copenhague

Would Bohr be born if Bohm were born before Born?

Hrvoje Nikolić[a)]
Theoretical Physics Division, Rudjer Bošković Institute, P. O. B. 180, HR-10002 Zagreb, Croatia

(Received 24 May 2007; accepted 13 October 2007)

I discuss a hypothetical historical context in which a Bohm-like deterministic interpretation of the Schrödinger equation is proposed before the Born probabilistic interpretation and argue that in such a context the Copenhagen (Bohr) interpretation would probably have not achieved great popularity among physicists. © *2008 American Association of Physics Teachers.*
[DOI: 10.1119/1.2805241]

Interprétation de Copenhague

THE SCANDAL OF QUANTUM MECHANICS

The article by Nikolić[1] with its catchy title is a reminder of the scandalous fact that eighty years after the development of quantum mechanics the literature is still swamped by voluminous discussions about what is called its "interpretation."[2] Actually quantum mechanics provides a complete and adequate description of the observed physical phenomena on the atomic scale. What else can one wish? (It is true that the connection with gravity is still a problem, but that is outside this discussion.) The difficulty is that the authors are unable to adjust their way of thinking—and speaking—to the fact that phenomena on the microscopic scale look different from what we are accustomed to in ordinary life. That two electrons far apart may be entangled seems strange to someone who still thinks of electrons as individual particles rather than as manifestations of a wave function.

The inability to adjust one's thinking to the new phenomena gave rise to the idea of hidden variables, made popular by Bohm.[3] He (and many others) wrote the Schrödinger equation in a form resembling the classical Hamilton–Jacobi equation, concealing the counter-intuitive features of quantum mechanics in a "quantum potential." That DeBroglie initially regarded the wave function as a pilot wave is understandable, but the fact that he revived it in 1957 only means that he refused to accept the quantum mechanical picture.[4] Even a nonlinear interaction with our consciousness has been suggested.[5] Ghirardi–Rimini–Weber[6] proposed to modify the Schrödinger equation so as to make it agree with their ideas about how reality ought to look.

The scandal of quantum mechanics

N. G. van Kampen

Citation: American Journal of Physics **76**, 989 (2008); doi: 10.1119/1.2967702
View online: https://doi.org/10.1119/1.2967702

Le scandale de la physique ?

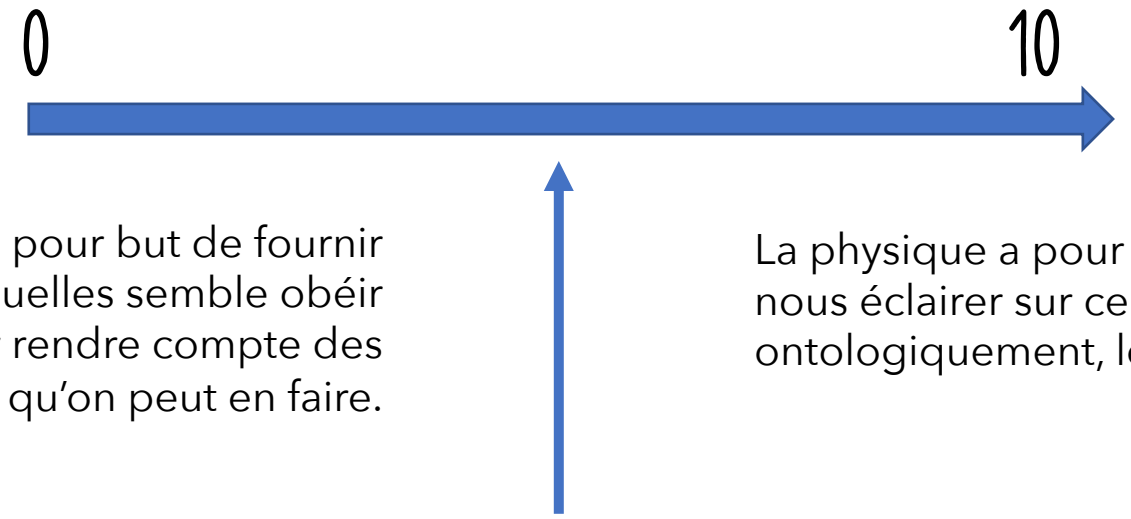
Comment le monde existe-t-il quand on ne l'observe pas ?

Le scandale de la physique ?

La physique a pour but de fournir des règles auxquelles semble obéir le monde, pour rendre compte des mesures qu'on peut en faire.

La physique a pour but de nous éclairer sur ce qu'est, ontologiquement, le réel.

Le scandale de la physique ?



Le scandale de la physique ?

« Je crois pouvoir affirmer que personne ne comprend vraiment la physique quantique. »

Richard Feynman, 1964

Que signifie « comprendre » ?

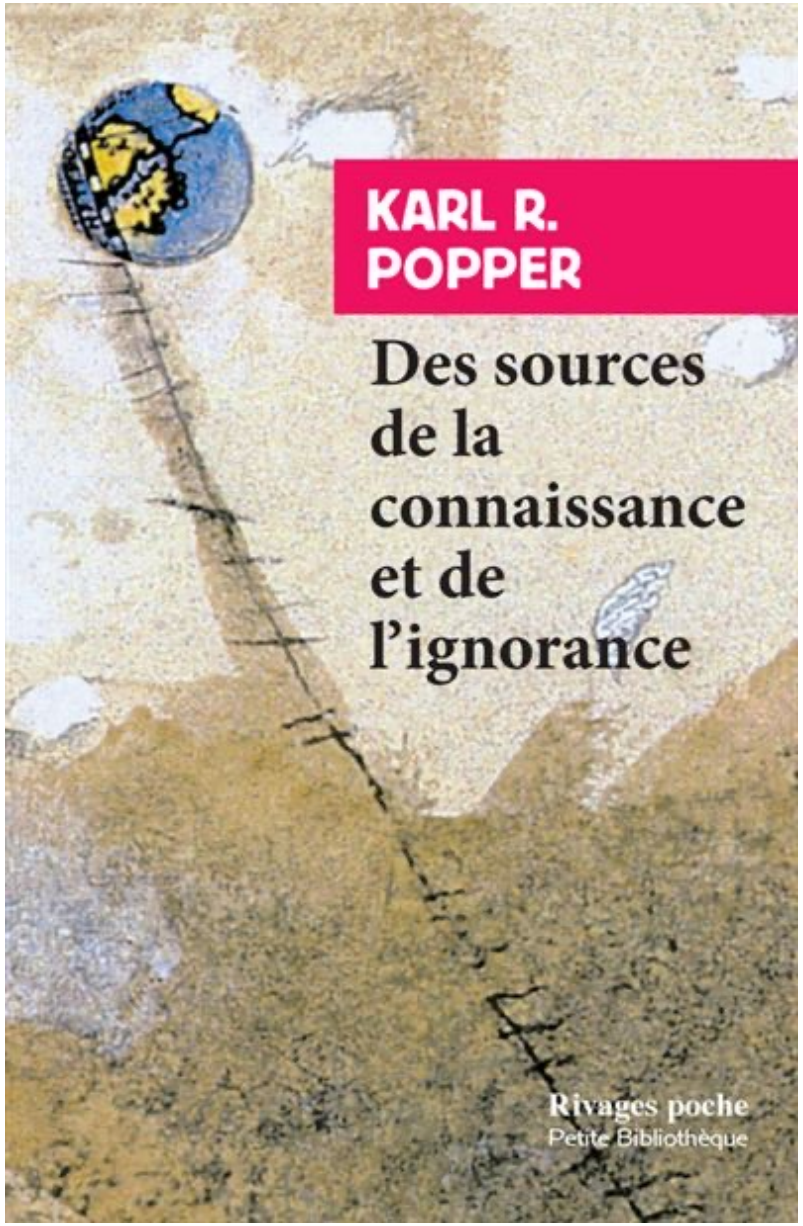
Qui « comprend vraiment » la mécanique newtonienne ?

Épine épistémologique

Peut-on savoir qu'une affirmation est vraie ?

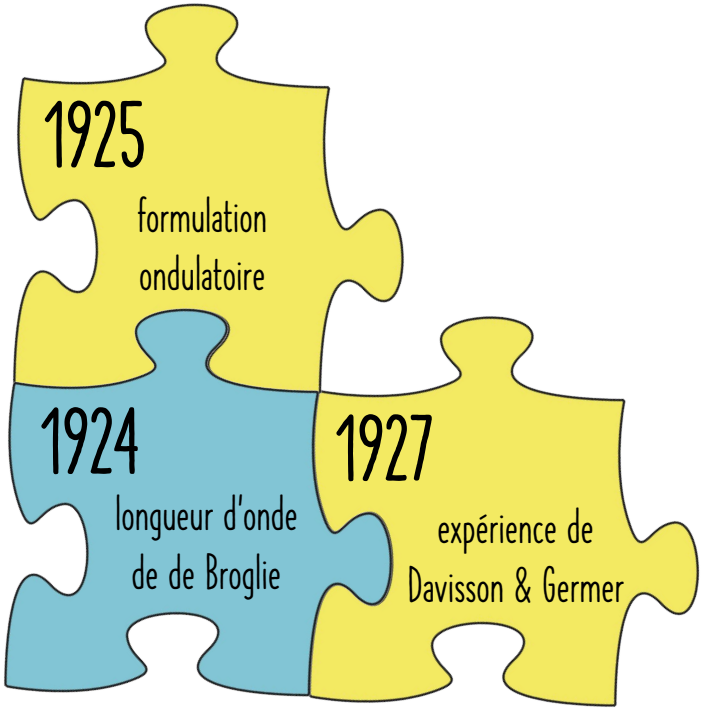
Proposition de Karl Popper : falsificationnisme

La place de la mécanique quantique

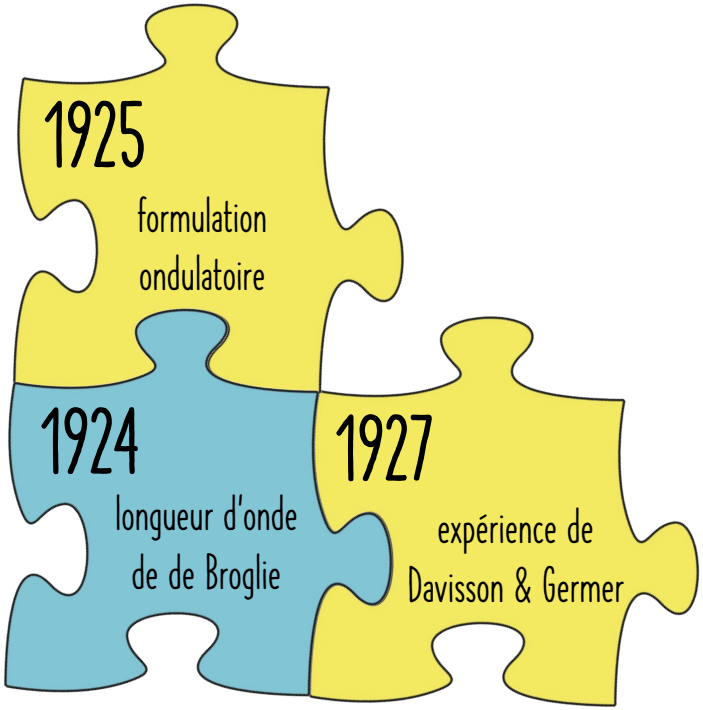


Remarques historiographiques

Remarques historiographiques

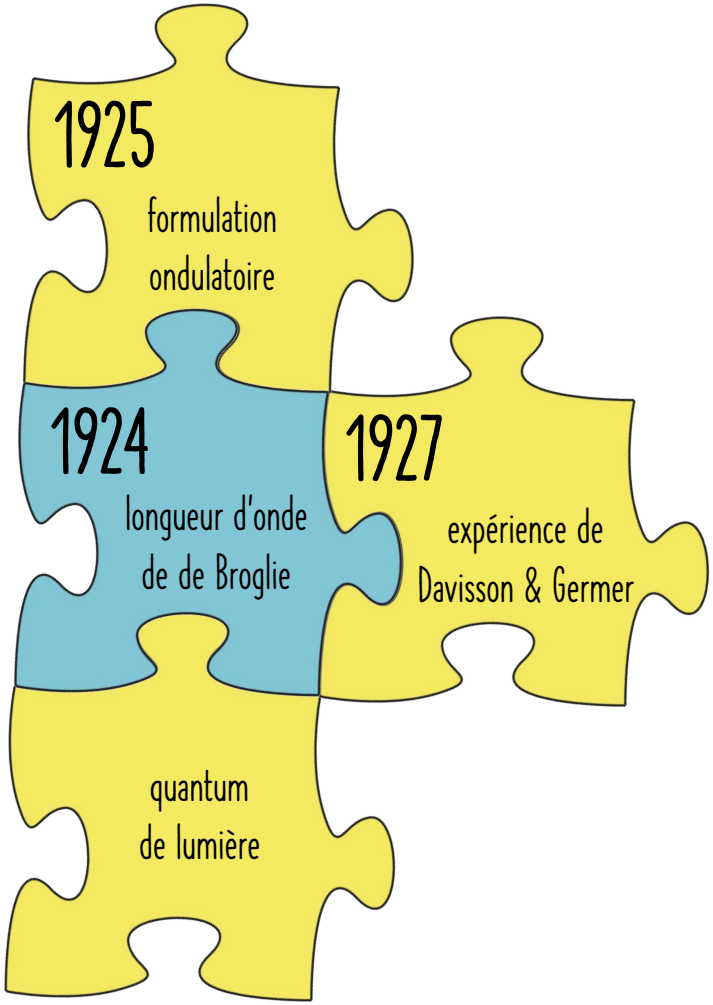


Remarques historiographiques

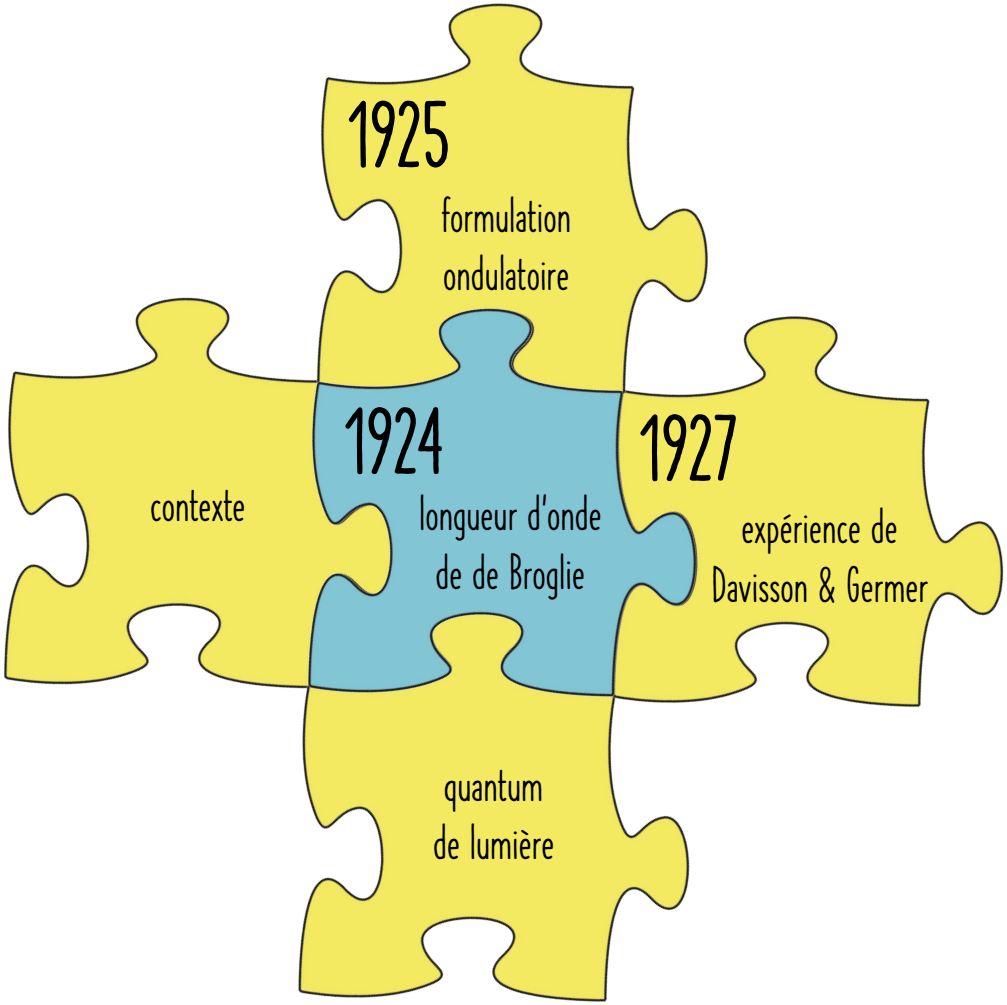


attention

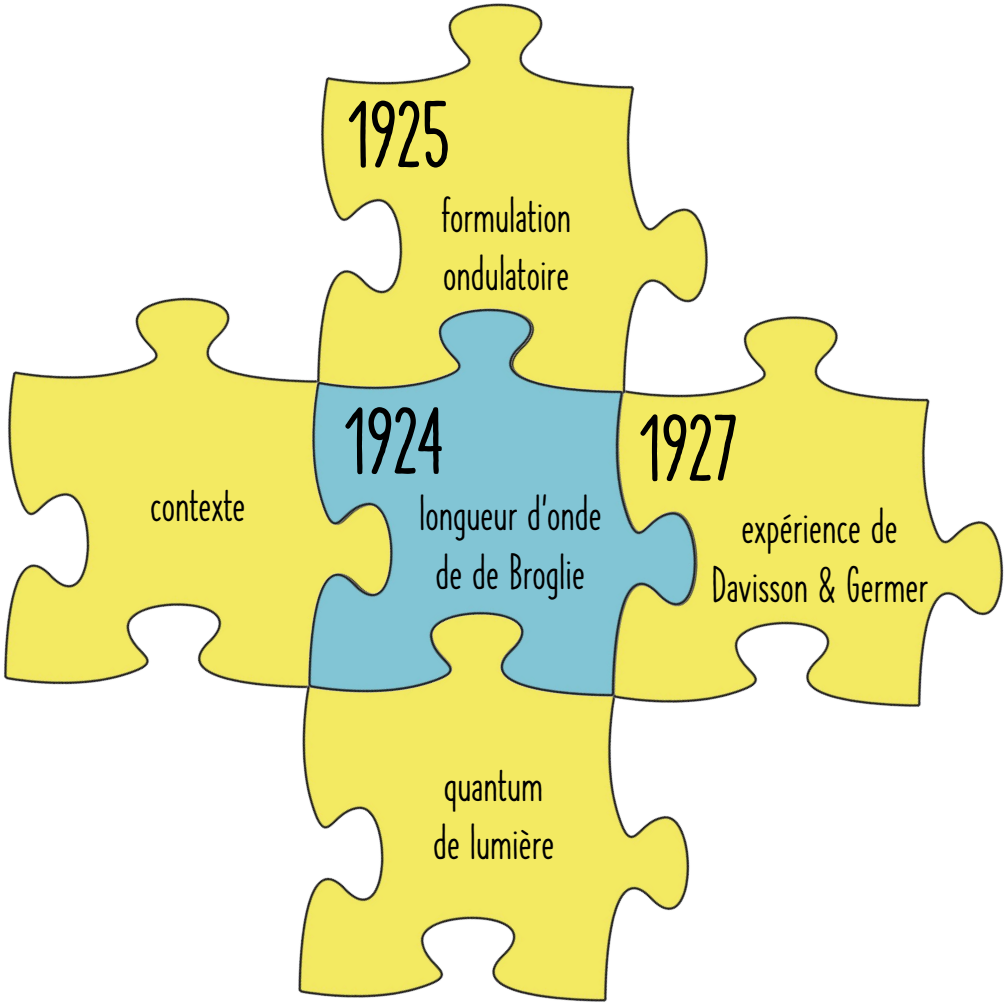
Remarques historiographiques

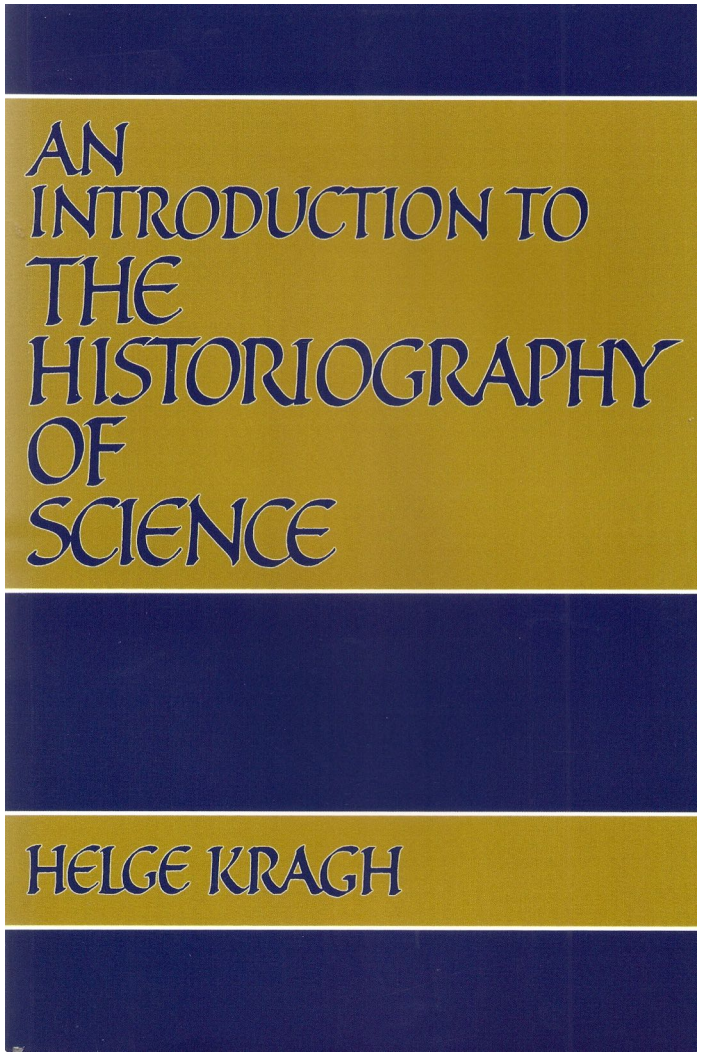


Remarques historiographiques

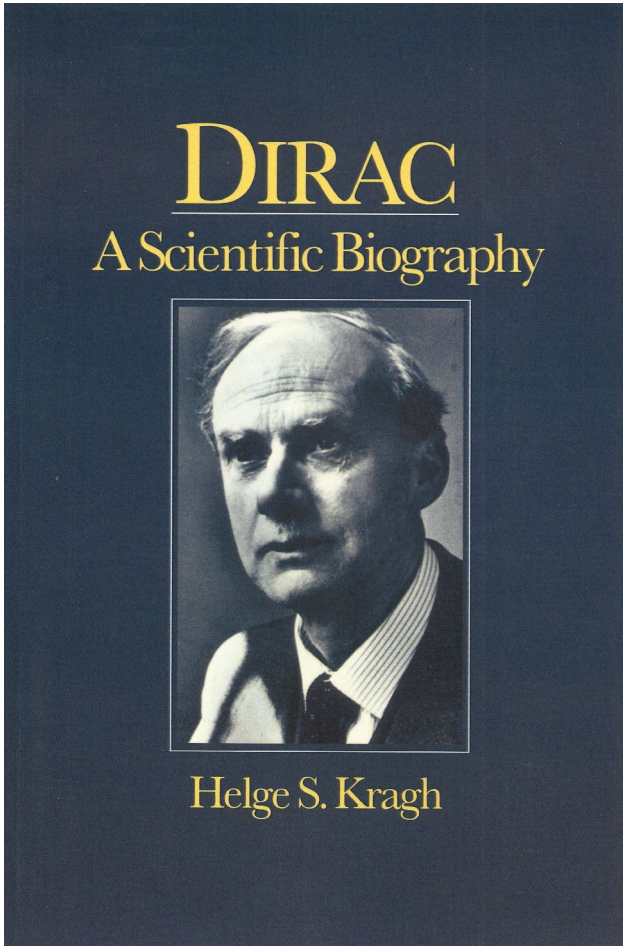


Remarques historiographiques





De l'importance du contexte



Contexte : trajectoires personnelles

Chaque savant est en partie le produit de son éducation, de son milieu, de ses lectures, de son entourage.

Contexte : politique

Voici ce qui s'écrit, ouvertement, en 1920 en Allemagne

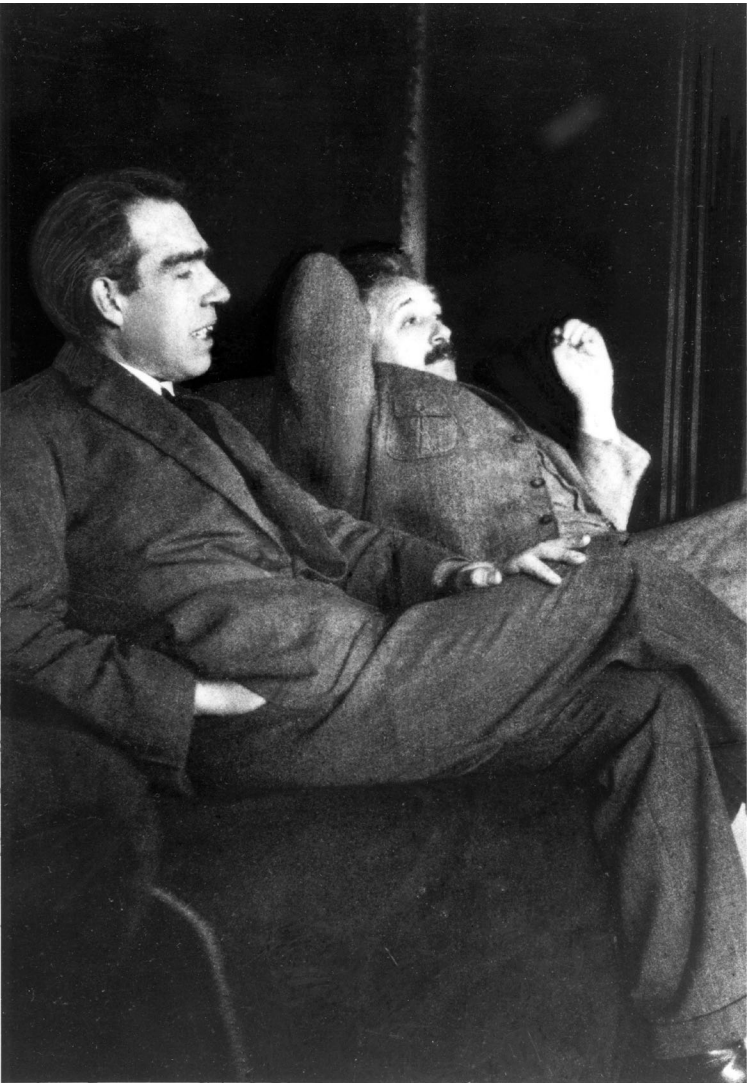
« La véritable science est expérimentale et réaliste, cause et intuitive, inductive, elle cherche la nature et la réalité, et elle est d'origine fondamentalement nordique. Au contraire, la science juive est théorique et formelle, probabiliste et non intuitive, esclave des mathématiques. Indifférente à la nature et à la réalité, elle se présente internationale. La division ente physique classique et physique moderne n'est qu'une astuce de la physique juive, car le Juif prétend créer des contractions partout et séparer les connections pour que le pauvre Allemand, qui tombe facilement dans les pièges, perde toute possibilité de savoir où il est. »

Stark & Lenard, 1920, *Deutsch Physik*

Contexte : technique

Certaines prédictions de la physique quantique ne peuvent pas être mises à l'épreuve de l'expérience au moment où elles sont formulées. Par exemple :

- Émission stimulée
- Inégalités de Bell
- Interférences avec des objets macroscopiques



Contexte : social

1919 Discussion entre Bohr et Einstein

L'énergie lumineuse est-elle quantifiée ?

La physique est-elle probabiliste ?

Voir la page wikipedia « Bohr–Einstein debates »

Contexte : thématique

Les réflexions liées à la mécanique quantique nourrissent celles d'autres disciplines de la physique. Par exemple

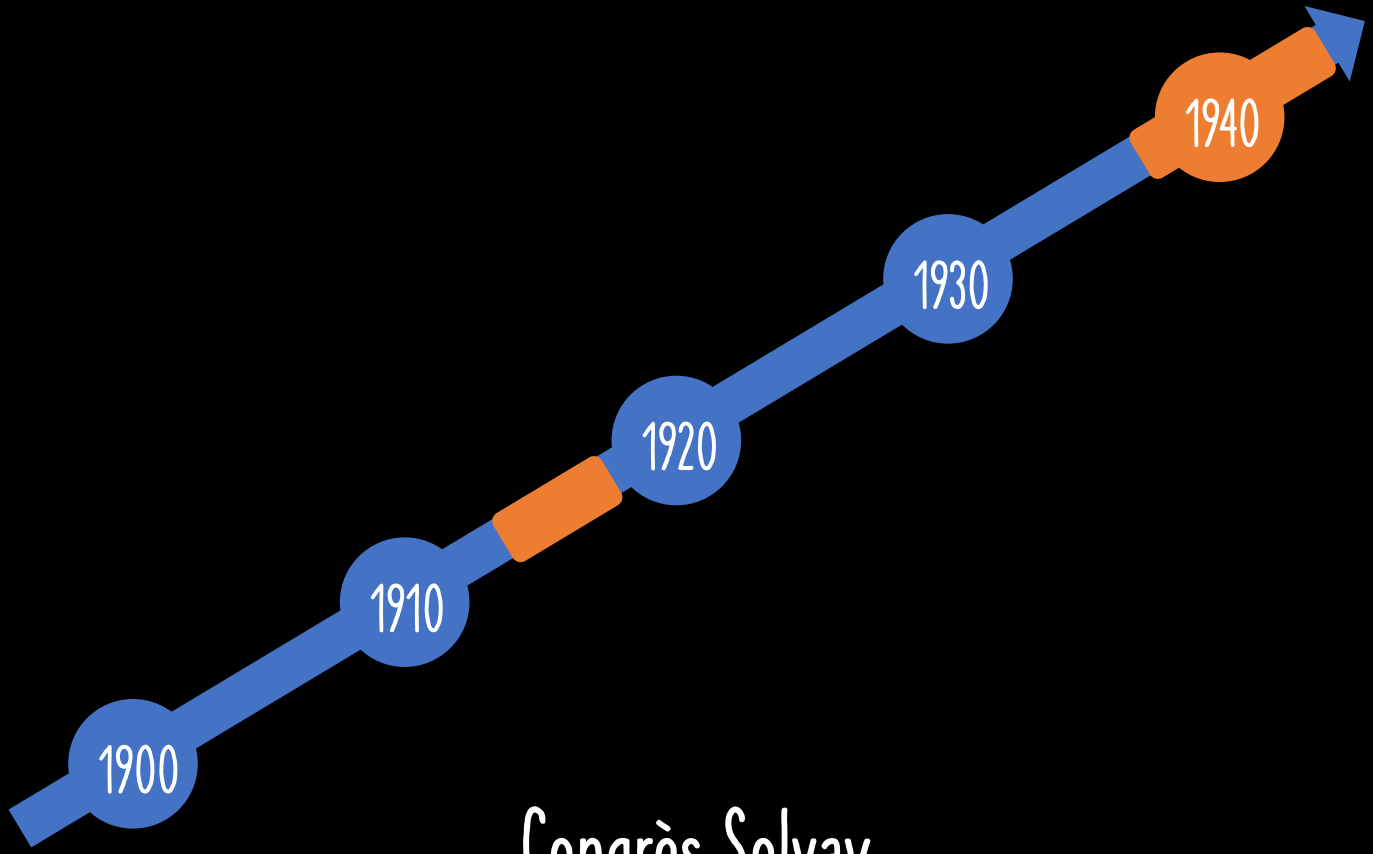
Lemaître et l'atome primordial
Gamow et la physique nucléaire
La physique des naines blanches

Contexte : le hasard

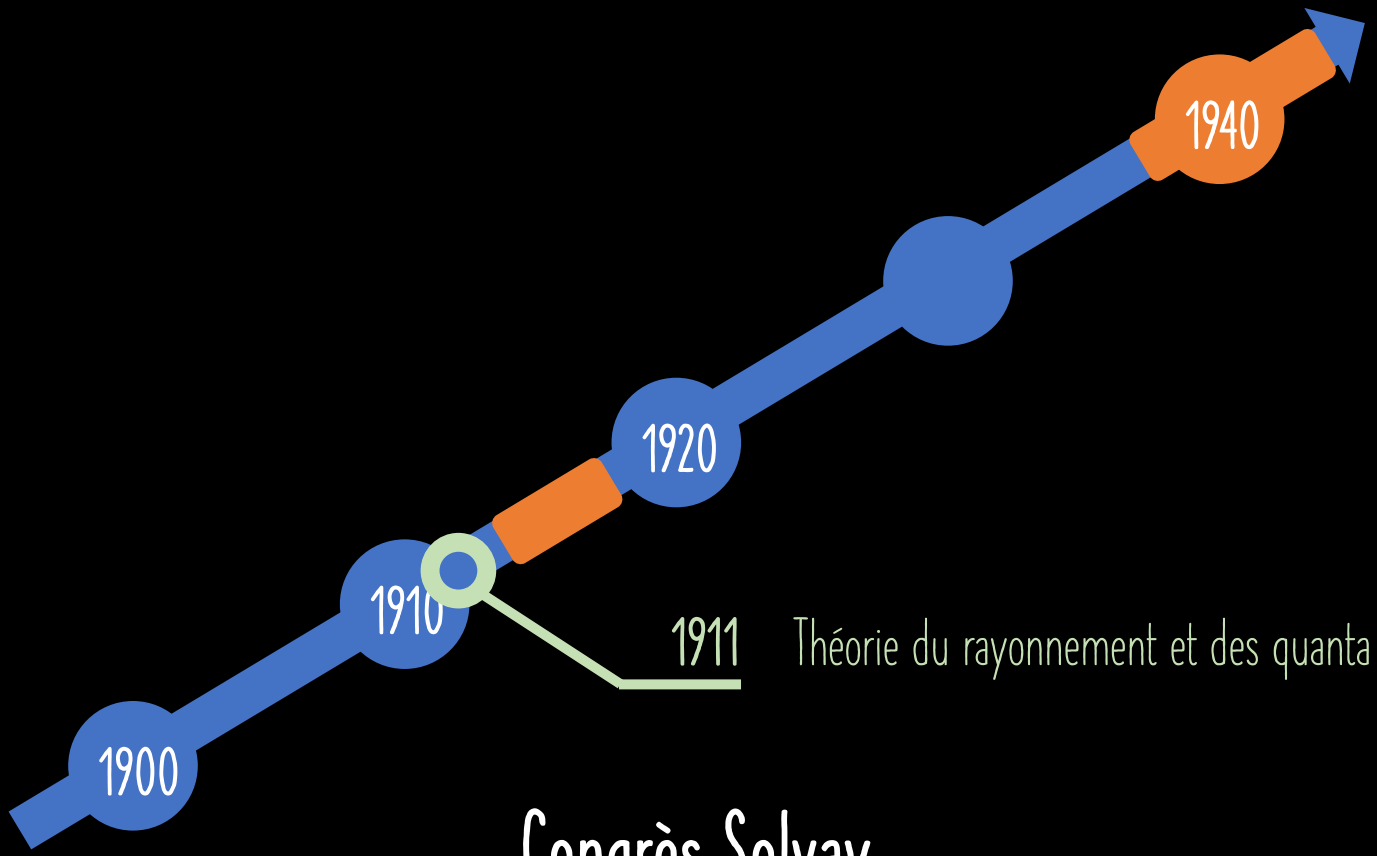
Congrès Solvay 1911

Congrès Solvay

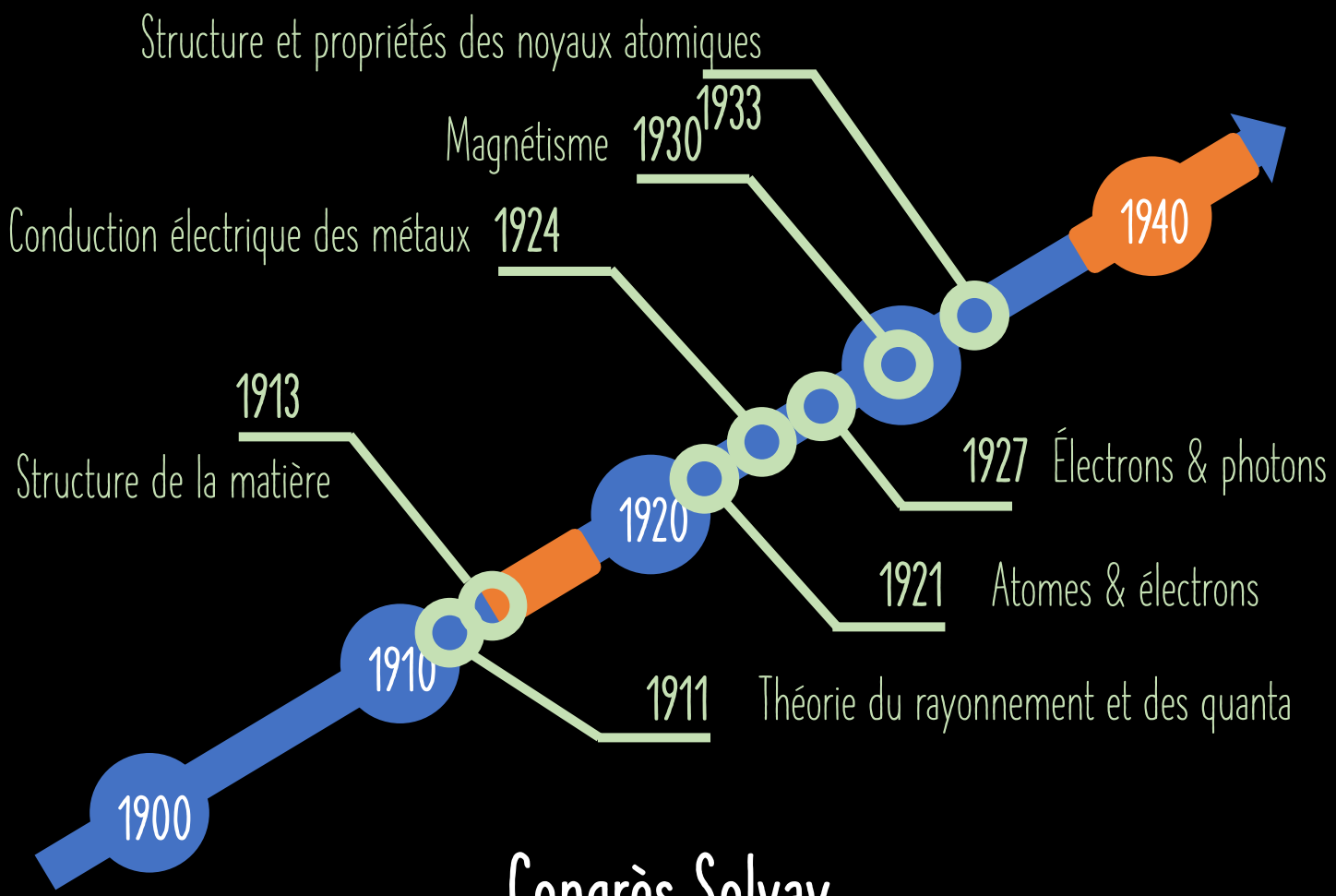
Participants au premier Congrès Solvay de 1911. 1 Walther Nernst 2 Robert Goldschmidt 3 Max Planck 4 Marcel Brillouin 5 Heinrich Rubens 6 Ernest Solvay 7 Arnold Sommerfeld 8 Hendrik Antoon Lorentz 9 Frederick Lindemann 10 Maurice de Broglie 11 Martin Knudsen 12 Emil Warburg 13 Jean-Baptiste Perrin 14 Friedrich Hasenöhrl 15 Georges Hostelet 16 Édouard Herzen 17 James Hopwood Jeans 18 Wilhelm Wien 19 Ernest Rutherford 20 Marie Curie 21 Henri Poincaré 22 Heike Kamerlingh Onnes 23 Albert Einstein 24 Paul Langevin

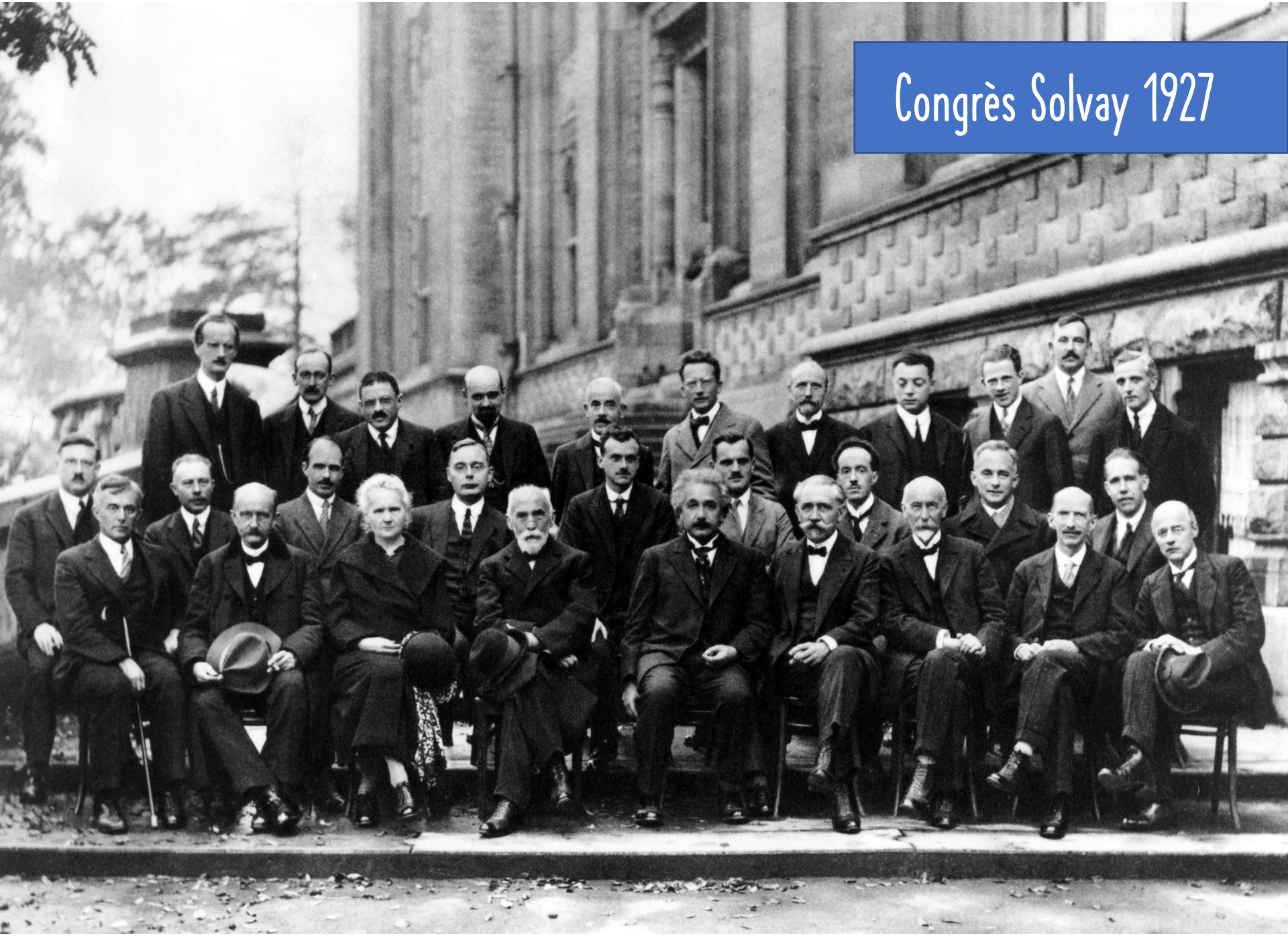


Congrès Solvay



Congrès Solvay


Structure et propriétés des noyaux atomiques
1933
Magnétisme
1930
Conduction électrique des métaux
1924
1940
1913
Structure de la matière
1927 Électrons & photons
1920
1921 Atomes & électrons
1910
1911 Théorie du rayonnement et des quanta
1900
Congrès Solvay


Congrès Solvay 1927

Ressources bibliographiques

HELGE KRAGH

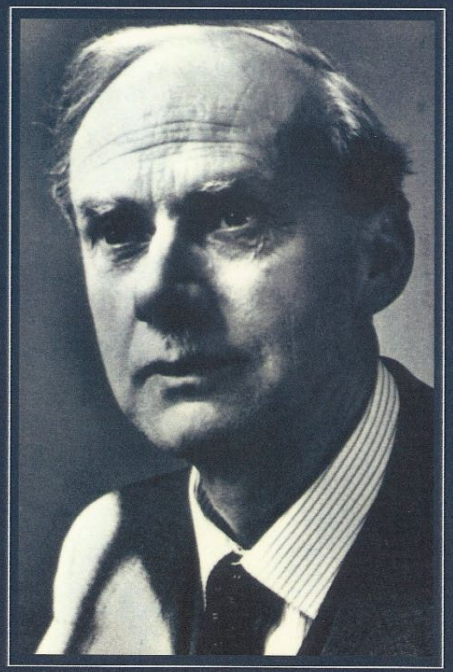
QUANTUM GENERATIONS

A HISTORY OF PHYSICS IN

THE TWENTIETH CENTURY

DIRAC

A Scientific Biography



Helge S. Kragh

Questions / remarques : taillet@lapth.cnrs.fr