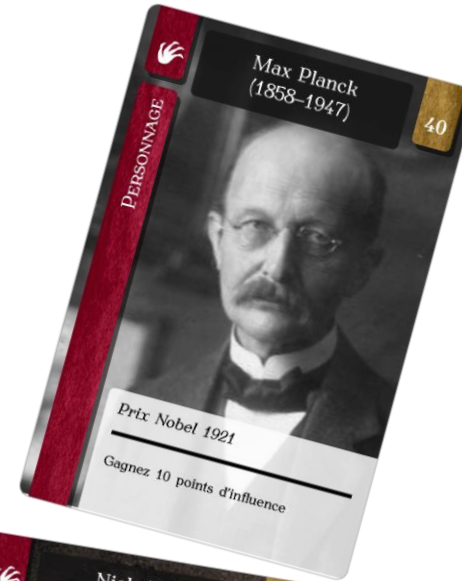
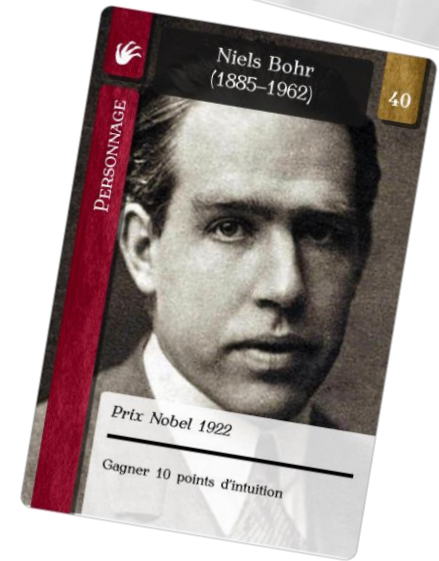
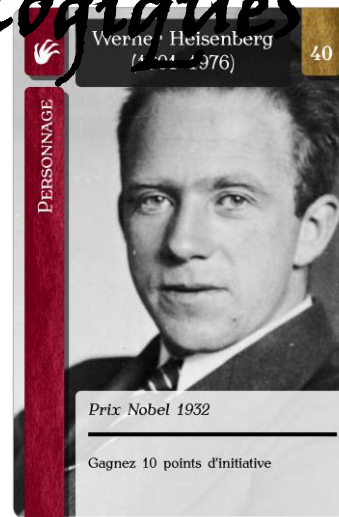
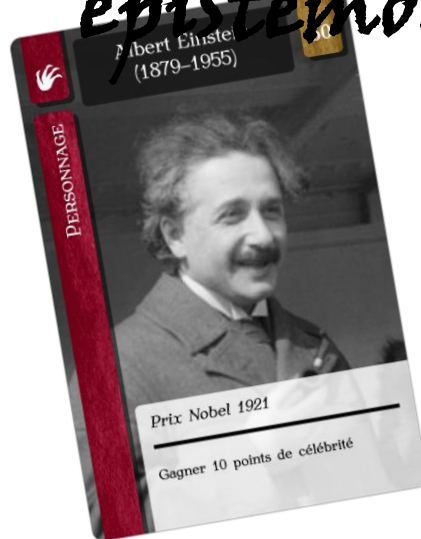
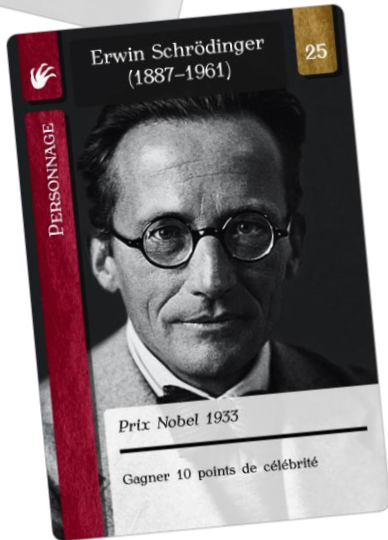


Physique quantique /  
quelques repères  
historiques &  
épistémologiques

In memoriam  
Claude Aslangul

# Physique quantique / quelques repères historiques & épistémologiques



# Cette présentation ne va pas

Vous convaincre que la mécanique quantique est une théorie 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

# Cette présentation ne va pas

Vous convaincre que la mécanique quantique est une théorie 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

Mais

Vous proposer une **structure** pour aborder ces questions et vous guider vers des **ressources**.

MANJIT  
**KUMAR**

Le Grand Roman de  
la physique quantique

Einstein, Bohr... et le débat  
sur la nature de la réalité



Champs sciences

HELGE KRAGH

**QUANTUM**



**GENERATIONS**



A HISTORY OF PHYSICS IN



THE TWENTIETH CENTURY



1900 / Planck formule

l'hypothèse des quanta

Atome l'effet photo-électrique

Rutherford / 1911 / Modèle

Expérience atomique de Bohr

Franck & Hertz / 1914 / Émission stimulée

Expérience de

Stern et Gerlach / 1922 / Principe de correspondance

Compton / 1923 / Caractère ondulatoire de la

matière / Statistique de Bose-Einstein

Expériences de Davisson et Germer / 1927 / Spin / Approche ondulatoire / Dirac

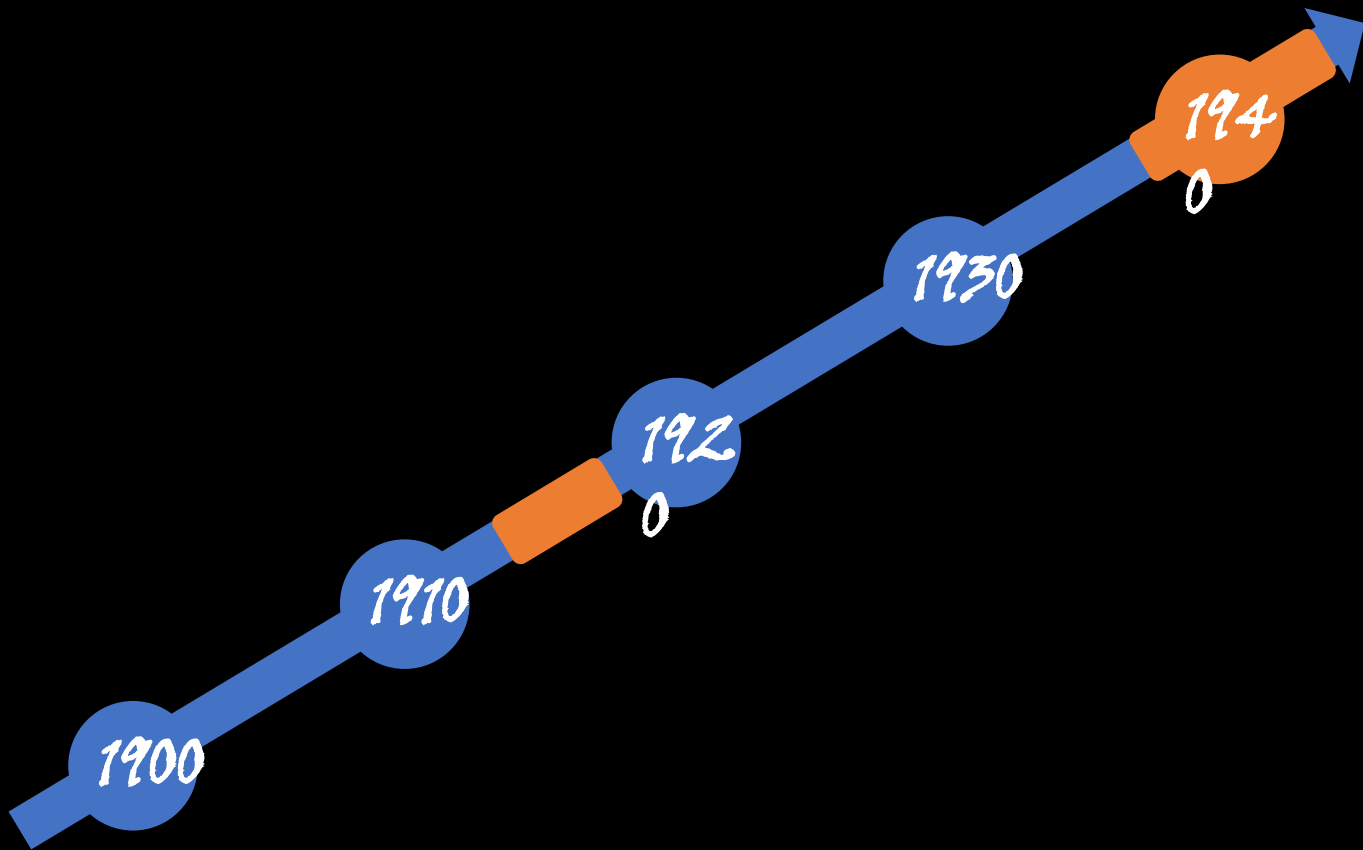
1928 /

Prédiction de la création de la matière / Antiparticule du positon

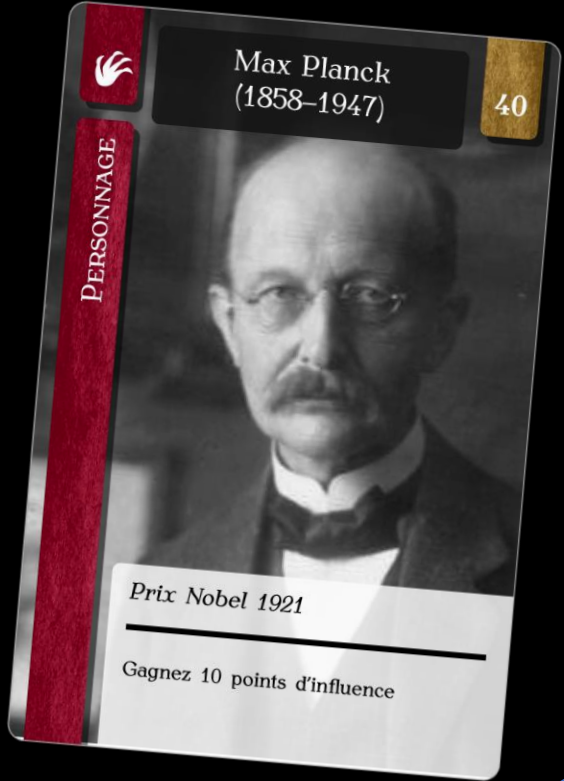
Observation du

positon / 1951 / Chat de Schrödinger /

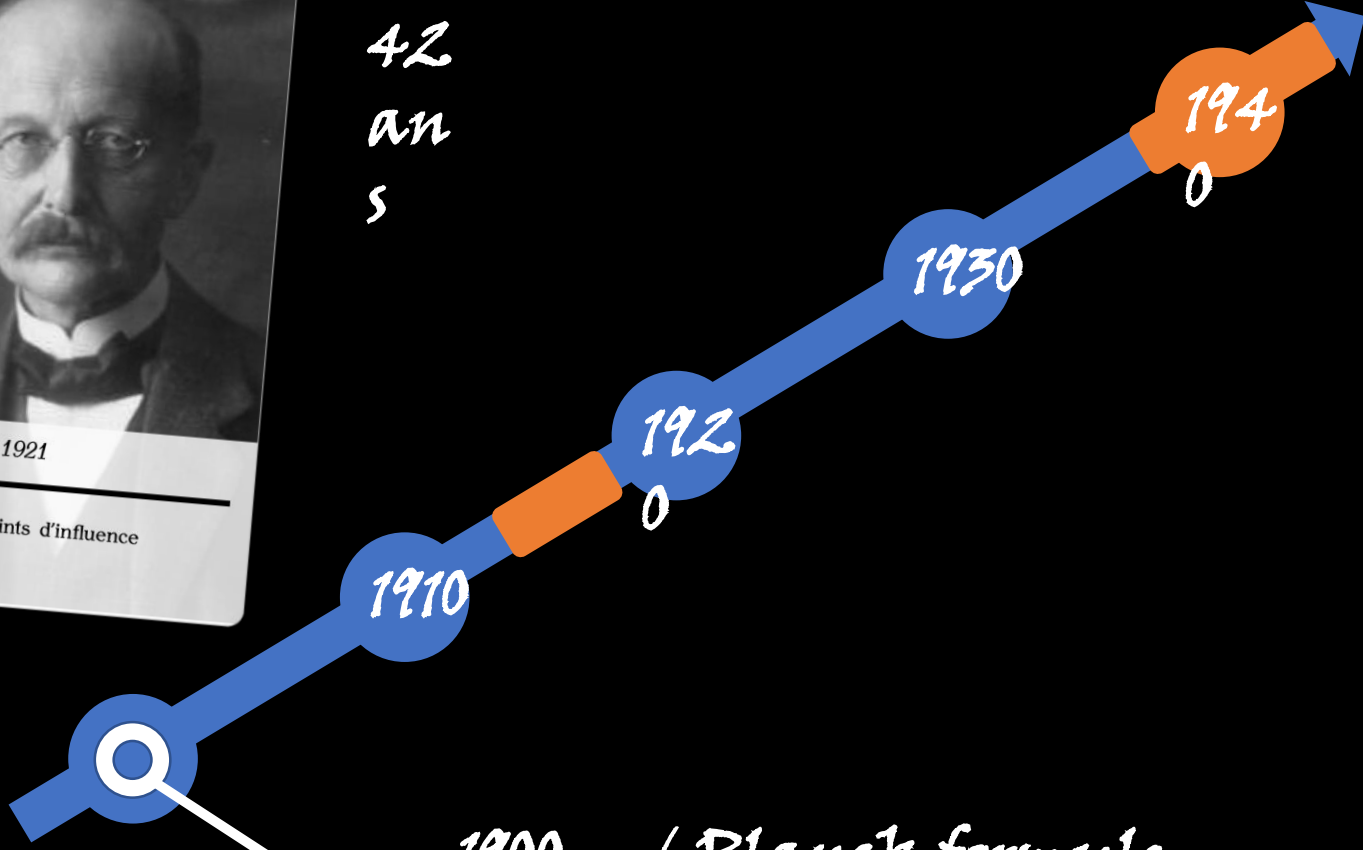
Dirac







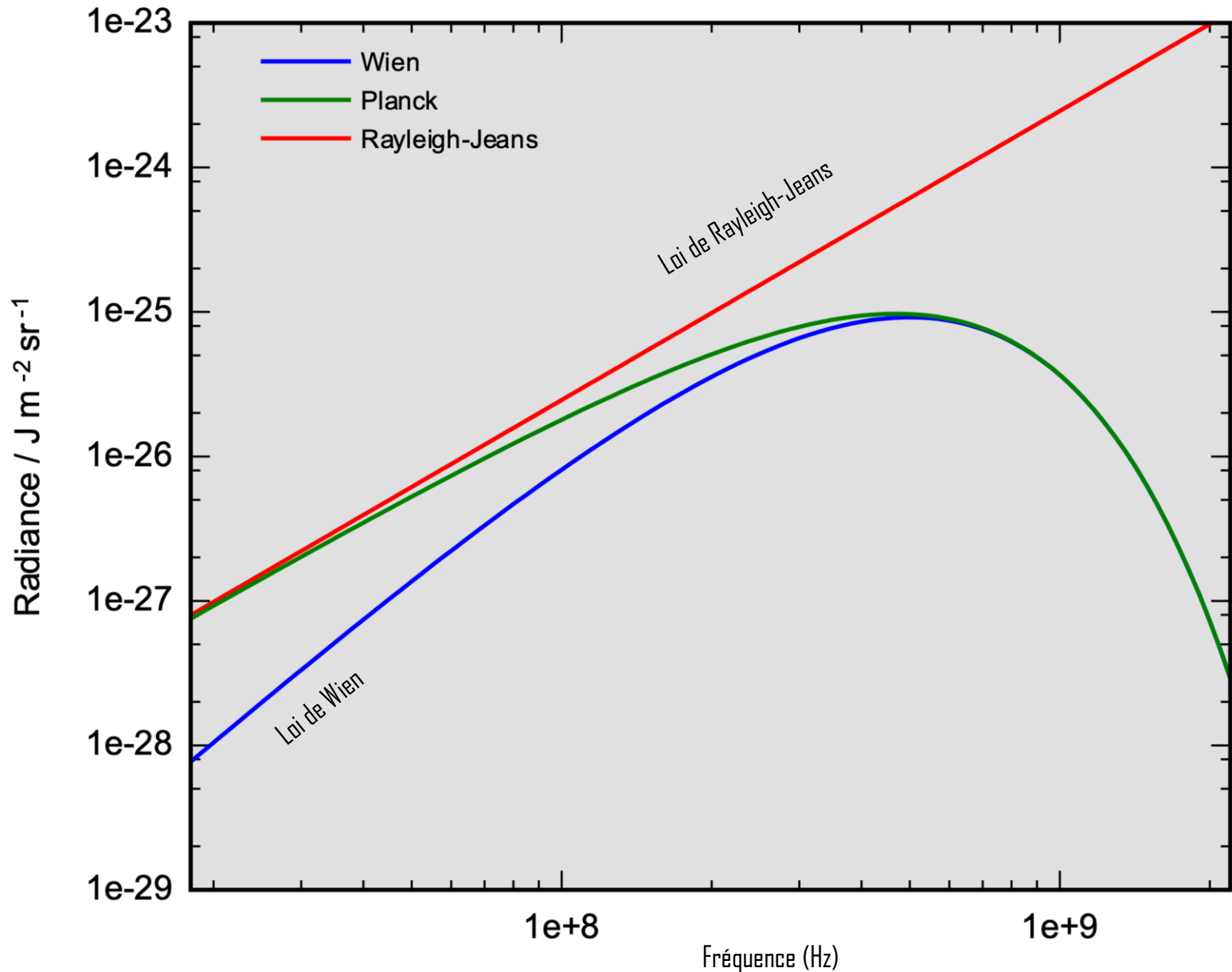
42  
an  
s



1900 / Planck formule  
l'hypothèse des quanta



# 1900 / Hypothèse des quanta



# 1900 / Hypothèse des quanta

Électromagnétisme et  
thermodynamique

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

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

$$\int_0^{\infty} u(\nu) d\nu \rightarrow \infty$$

Hypothèse de Planck

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

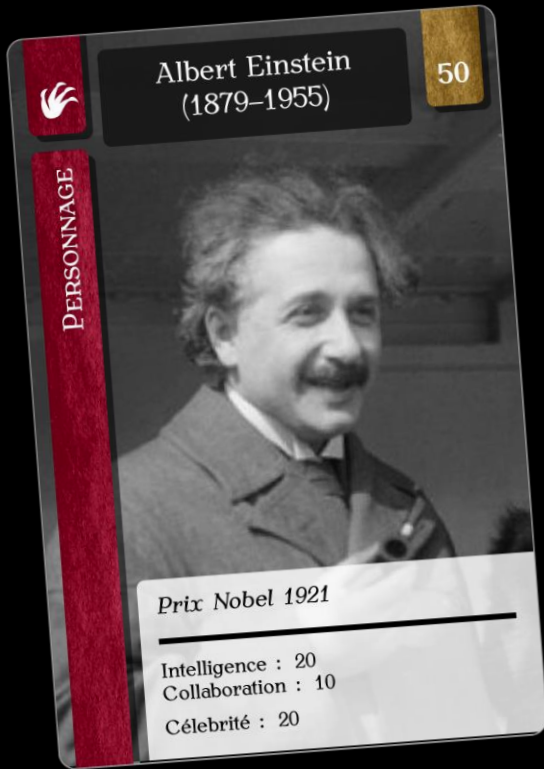
$$u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

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

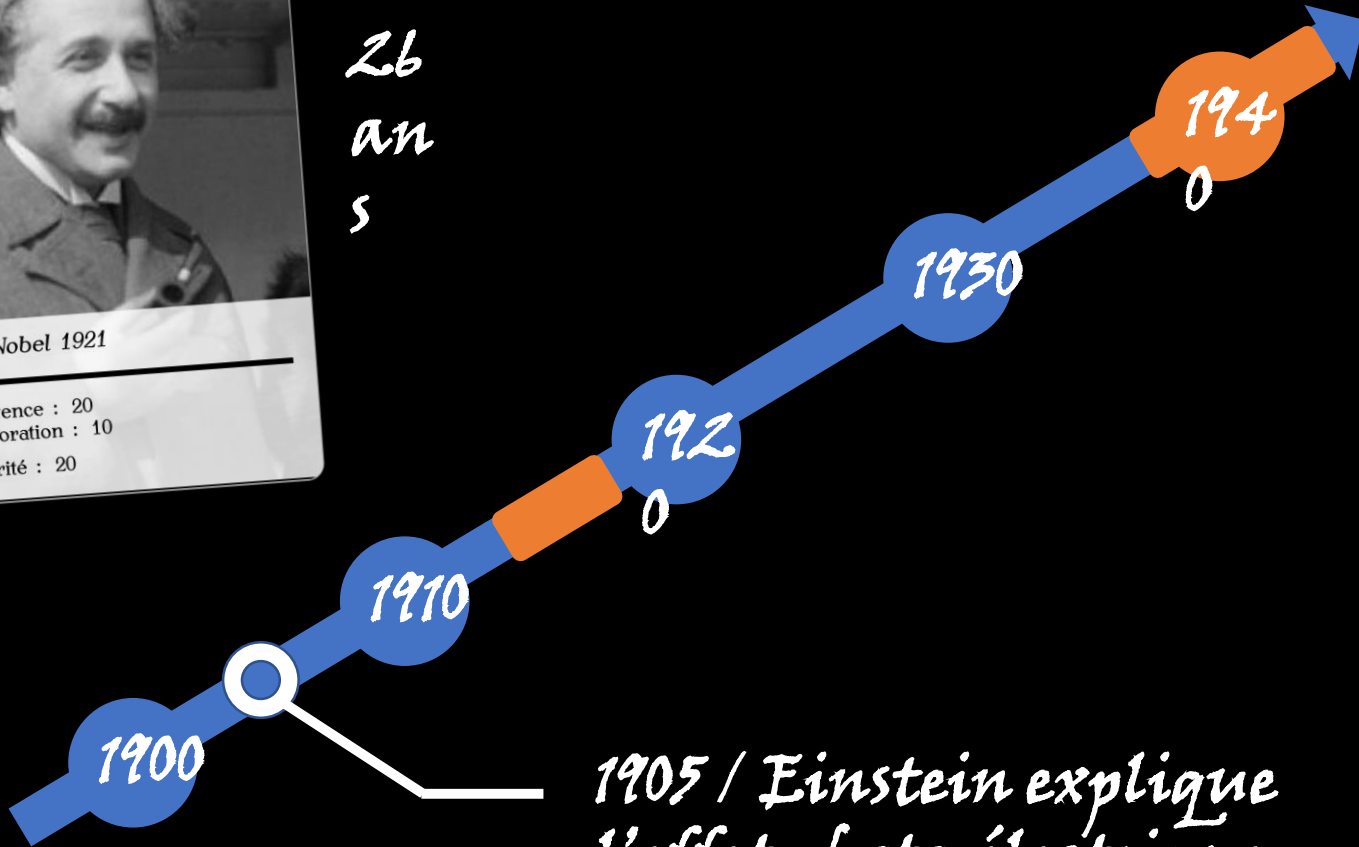
# 1900 / Hypothèse des quanta

Ce qui est « quantifié », c'est l'énergie de vibration des oscillateurs qui constituent les parois du corps noir, comme astuce de calcul.

Planck ne croyait pas à la théorie atomique de la matière.



26  
ans



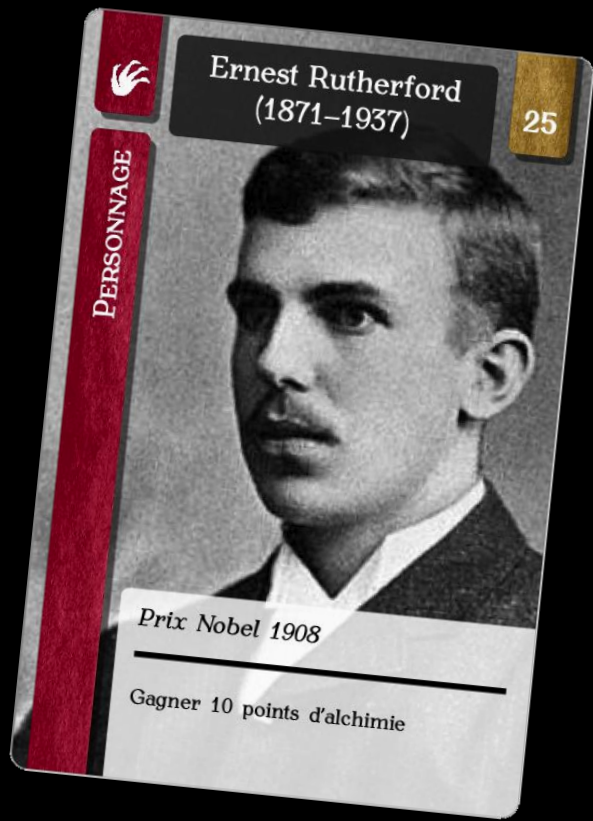
1905 / Einstein explique  
l'effet photo-électrique

1905 / Effet photo-électrique  
Prix Nobel de physique 1921

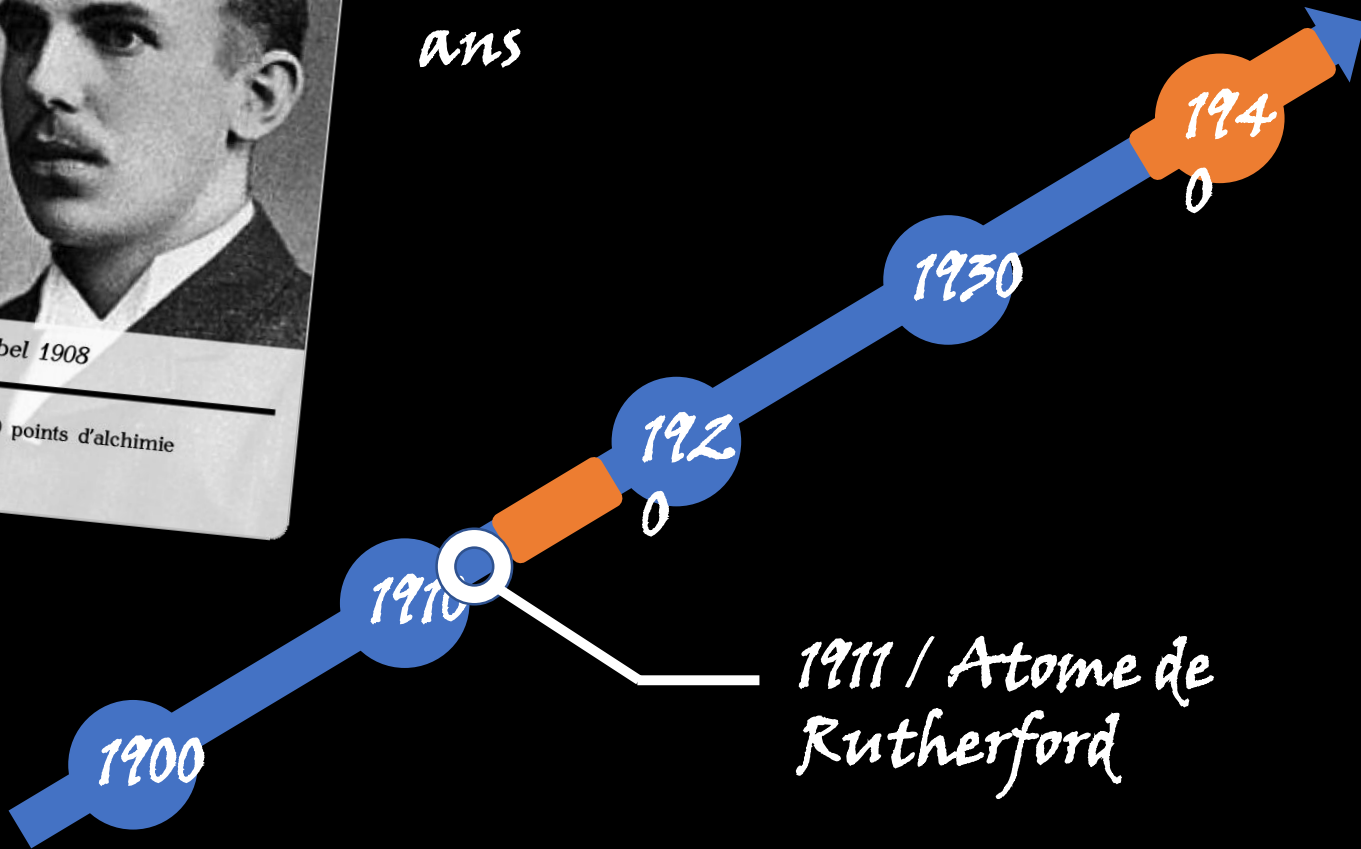
Ce qui est « quantifié », c'est l'énergie de l'onde lumineuse

$$E = h\nu$$

Einstein était partisan de la théorie atomique de la matière.



40  
ans

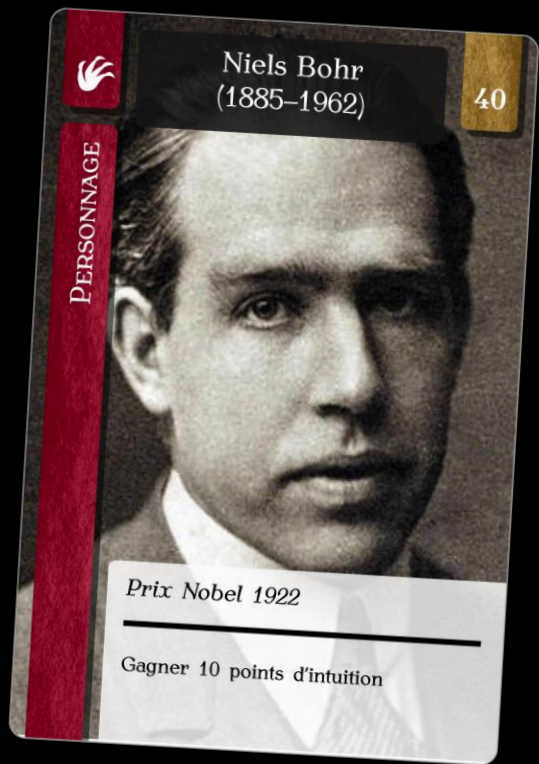


*1911 / Atome de Rutherford*  
*Prix Nobel de chimie 1925*

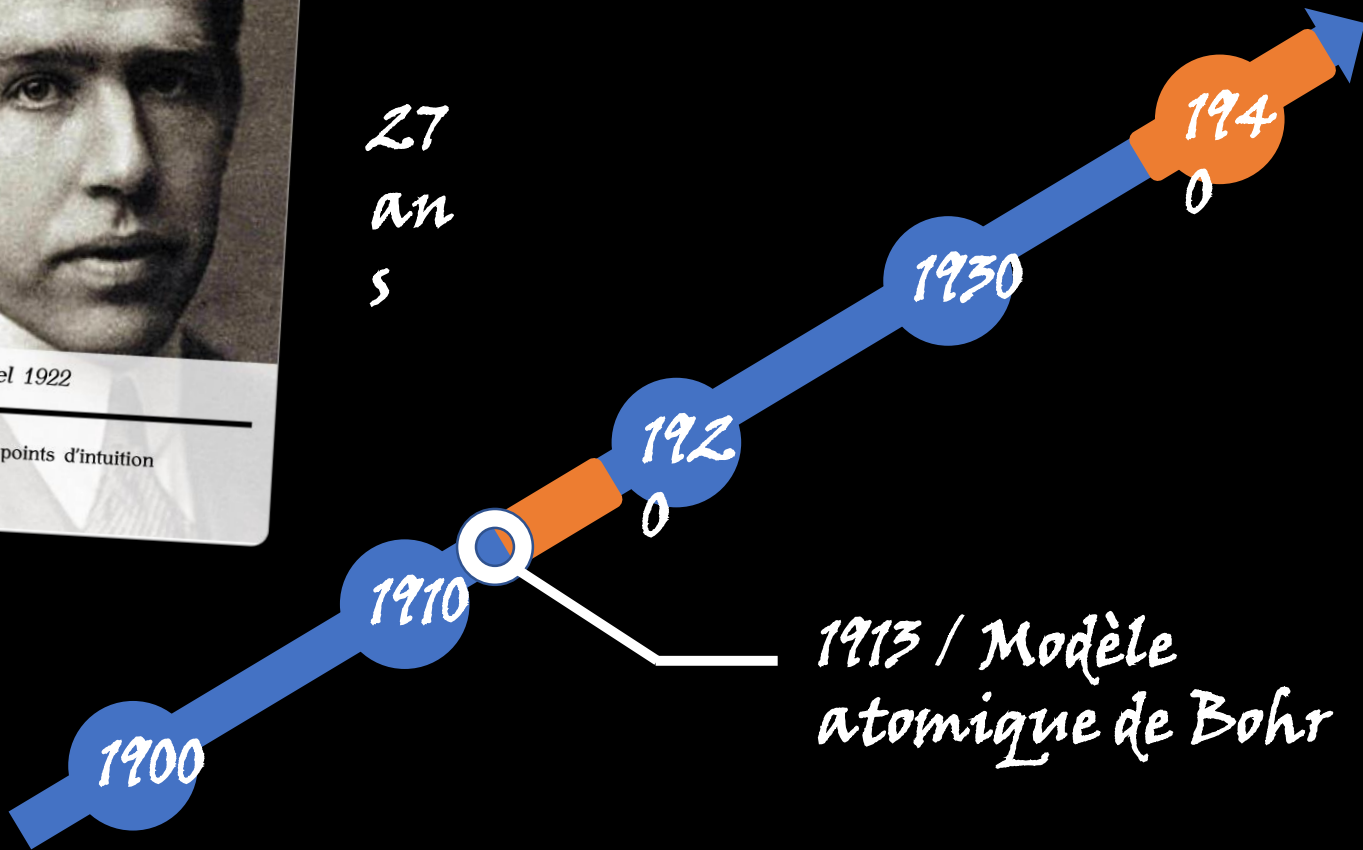
Une mouche dans une cathédrale

Modèle planétaire de l'atome





27  
ans





# 1913 / A tome 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 / A tome de Bohr

191  
6

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

# A

**ab initio** / **abaque** / Ernst **Abbe** / théorie d'**Abbe** / **aberration chromatique** / **aberration de sphéricité** / **aberration stellaire** / force d'**Abraham-Lorentz** / Alexei **Abrikosov** / **absorption** / **absorption** / **Académie des sciences** / **accélérateur circulaire** / **accélérateur d'ions lourds** / **accélérateur linéaire** / **accélérateur de particules** / **accélérateur à plasma** / **accélération** / **accélération de la pesanteur** / **accéléromètre** / **accommodation** / **accrétion** / **accumulateur électrique** / théorie des accès / **achromatique** / **acier** / **acoustique** / **acronyme** / **actinide** / **actinium** / **actinomètre** / **action** / **action à distance** / **activation** / **activation neutronique** / **activité optique** / **activité solaire** / **AdA** / John Couch **Adams** / **adaptation d'impédance** / **adiabaticité du son** / **adiabatique** / Franz **Aepinus** / **aérodynamique** / **aéronautique** / **âge sombre** / **âge de la Terre** / **âge de l'Univers** / **agitation thermique** / effet **Aharonov-Bohm** / **aile** / **aile de papillon** / **aimant** / aimantation / **air** / loi des **aires** / fonction d'**Airy** / George Biddell **Airy** / tache d'**Airy** / **alchimie** / **aléatoire** / **ALEPH** (détecteur) / Hannes **Alfvén** / onde d'**Alfvén** / **algèbre des courants** / **algèbre de Lie** / **Alhazen** / **ALICE** / **allées de von Karman** / **ALMA** (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) / **Almageste** / **alpha** (particule) / **ALPHA** / Ralph **Alpher** / **altimètre** / **aluminium** / Luis **Alvarez** / **AMANDA** / **amas stellaire** / **amas de galaxies** / **amas du Boulet** / **amas globulaire** / **amiante** / Guillaume **Amontons** / **amortissement** / **amortissement de Landau** / **amplificateur opérationnel** / **ampoule à incandescence** / **ampère** (unité) / André Marie **Ampère** / théorème d'**Ampère** / **AMS** (Alpha Magnetic Spectrometer) / **anaclastique** / **anagyre** / **analogie** / **analyse dimensionnelle** / **analyse de Fourier** / Carl David **Anderson** / localisation d'**Anderson** / Thomas **Andrews** / galaxie d'**Andromède** / **angle de Brewster** / **angle de contact** / **angle solide** / **ångström** / **anharmonique** / **anion** / **anneau planétaire** / **anneaux de Saturne** / **année** / **année tropique** / **annihilation** / **anode** / **anomalie** (astronomie) / **anomalie Pioneer** / **ansatz de Bethe** / **Antarès** / **antenne** / **antiatome** / **antibruit** / antibunching / mécanisme d'**Anticythère** / **antigravité** / **antihydrogène** / **antimatière** / **antimoine** / **antineutrino** / **antineutron** / **antiparticule** / **antiproton** / **anyon** / **apex** / **aplanétisme** / **apochromatique** / missions **Apollo** / Sir Edward Victor **Appleton** / **approximant de Padé** / **approximation** / **approximation adiabatique** / **approximation de Born-Oppenheimer** / **approximation WKB** / François **Arago** / **arc électrique** / **arc-en-ciel** / **archéomagnétisme** / **ARCHEOPS** / **Archimède** / **argon** / détecteur **ARGUS** / projet **Argus** / **Aristarque de Samos** / **Aristote** / **Arrhenius** / **arroseeur inversé** / **art** / **ascension droite** / expérience d'**Ashar** / Askap / expériences d'**Aspect** / **astate** / **astéroïde** / astigmatisme / **astrarium** / **astrochimie** / **astrolabe** / **astrologie** / **astrométrie** / **astronautique** / **astronavigation** / **astronomie** / **astronomie gamma** / **astronomie infrarouge** / **astronomie neutrino** / **astronomie UV** / **astronomie X** / **astrophysique** / **astrophysique des particules** / **astrophysique nucléaire** / **astrosismologie** / **ATHENA** / **ATLAS** / **atmosphère** / **atome** / **atome de Bohr** / **atome creux** / **atome exotique** / **atome froid** / **atome d'hydrogène** / **atome mésonique** / **atome muonique** / **atome de Nagaoka** / **atome primitif** / **atome de Rutherford** / **atome de Rydberg** / **atome de Thomson** / **ATRAP** / **atto-** / attoseconde / **attracteur** / **attracteur de Lorenz** / force d'**attraction** / Alexander **Aubert** / **audition** / **Auger** (expérience) / **aurore polaire** / **autocollimation** / **auto-diffractant** / **autofocalisation** / **auto-induction** / **avalanche** / **avance du périhélie de Mercure** / **avance du périhélie** / Amedeo **Avogadro** / nombre d'**Avogadro** / **AXAF** / **axe d'inertie** / **axe lent** / **axe optique** / **axicon** / **axion**

<http://www.dicodephysique.fr/index.php/bibliographie>

## atome de Bohr

- 1967 / *The Kossel-Sommerfeld Theory and the Ring Atom* / John L. Heilbron / *Isis* 58 (1967) p. 450 [[lien](#)]
- 1969 / *The Genesis of the Bohr Atom* / John L. Heilbron ; Thomas S. Kuhn / *Historical Studies in the Physical Sciences* 1 (1969) p. 211 [[doi](#)]
- 1979 / *Niels Bohr's Second Atomic Theory* / Helge Kragh / *Historical Studies in the Physical Sciences* 10 (1979) p. 123 [[doi](#)]
- 1980 / *Et pourtant ils ne tournent pas* / Alain Denis / *Bulletin de l'Union des Physiciens* 75 (1980) p. 397 [[lien](#)]
- 1980 / *Et pourtant ils ne tournent pas* / Georges Guinier / *Bulletin de l'Union des Physiciens* 75 (1980) p. 392 [[lien](#)]
- 1980 / *Et pourtant ils ne tournent pas* / Jean-Louis Izbicki ; Alain Pujos / *Bulletin de l'Union des Physiciens* 74 (1980) p. 1294 [[lien](#)]
- 1985 / *Bohr's First Theories of the Atom* / John L. Heilbron / *Physics Today* 38 (1985) p. 28 [[doi](#)]
- 1994 / *Prediction of the nature of hafnium from chemistry, Bohr's theory and quantum theory* / Eric R. Scerri / *Annals of Science* 51 (1994) p. 137 [[doi](#)]
- 1995 / *Bohr's theory of the atom 1913–1923: A case study in the progress of scientific research programmes* / Hinne Hettema / *Studies in History and Philosophy of Science* 26 (1995) p. 127 [[doi](#)]
- 2002 / *Ritz's Discovery of the Lyman Series before 1913 and Lyman's Indifference to the Bohr Theory* / Hiroyuki Konno / *Centaurus* 44 (2002) p. 127 [[doi](#)]
- 2011 / *Conceptual objections to the Bohr atomic theory — do electrons have a “free will” ?* / Helge Kragh / *European Journal of Physics H* 36 (2011) p. 327 [[doi](#)]
- 2011 / *Resisting the Bohr Atom: The Early British Opposition* / Helge Kragh / *Physics in Perspective* 13 (2011) p. 4 [[doi](#)]
- 2013 / *Early atomic models – from mechanical to quantum (1904–1913)* / C. Baily / *European Journal of Physics H* 38 (2013) p. 1 [[doi](#)]
- 2014 / *Bohr's molecular model, a century later* / Anatoly Svidzinsky ; Marlan Scully ; Dudley Herschbach / *Physics Today* 67 (2014) p. 33 [[doi](#)]
- 2014 / *How Sommerfeld extended Bohr's model of the atom (1913–1916)* / Michael Eckert / *European Journal of Physics H* 39 (2014) p. 141 [[doi](#)]
- 2014 / *Scientific biographies revisited: Thomsons' electrons and Bohr's quantum atoms* / Ana Simões / *Ambix* 61 (2014) p. 95 [[doi](#)]



## atome de Bohr

- 1967 / *The Kossel-Sommerfeld Theory and the Ring Atom* / John L. Heilbron / *Isis* 58 (1967) p. 450 [[lien](#)]
- 1969 / *The Genesis of the Bohr Atom* / John L. Heilbron ; Thomas S. Kuhn / *Historical Studies in the Physical Sciences* 1 (1969)
- 1979 / *Niels Bohr's Second Atomic Theory* / Helge Kragh / *Historical Studies in the Physical Sciences* 10 (1979) p. 123 [[doi](#)]
- 1980 / *Et pourtant ils ne tournent pas* / Alain Denis / *Bulletin de l'Union des Physiciens* 75 (1980) p. 397 [[lien](#)]
- 1980 / *Et pourtant ils ne tournent pas* / Georges Guinier / *Bulletin de l'Union des Physiciens* 75 (1980) p. 392 [[lien](#)]
- 1980 / *Et pourtant ils ne tournent pas* / Jean-Louis Izbicki ; Alain Pujos / *Bulletin de l'Union des Physiciens* 74 (1980) p. 1294 [[lien](#)]
- 1985 / *Bohr's First Theories of the Atom* / John L. Heilbron / *Physics Today* 38 (1985) p. 28 [[doi](#)]
- 1994 / *Prediction of the nature of hafnium from chemistry, Bohr's theory and quantum theory* / Eric R. Scerri / *Annals of Science*
- 1995 / *Bohr's theory of the atom 1913–1923: A case study in the progress of scientific research programmes* / Hinne Hettema / *Studies in the History and Philosophy of Science*
- 2002 / *Ritz's Discovery of the Lyman Series before 1913 and Lyman's Indifference to the Bohr Theory* / Hiroyuki Konno / *Centaurus*
- 2011 / *Conceptual objections to the Bohr atomic theory – do electrons have a “free will” ?* / Helge Kragh / *European Journal of Science and Technology*
- 2011 / *Resisting the Bohr Atom: The Early British Opposition* / Helge Kragh / *Physics in Perspective* 13 (2011) p. 4 [[doi](#)]
- 2013 / *Early atomic models – from mechanical to quantum (1904–1913)* / C. Baily / *European Journal of Physics H* 38 (2013) p. 012001 [[doi](#)]
- 2014 / *Bohr's molecular model, a century later* / Anatoly Svidzinsky ; Marlan Scully ; Dudley Herschbach / *Physics Today* 67 (2014) p. 30 [[doi](#)]
- 2014 / *How Sommerfeld extended Bohr's model of the atom (1913–1916)* / Michael Eckert / *European Journal of Physics H* 39 (2014) p. 012001 [[doi](#)]
- 2014 / *Scientific biographies revisited: Thomsons' electrons and Bohr's quantum atoms* / Ana Simões / *Ambix* 61 (2014) p. 95 [[doi](#)]

James Franck  
(1882-1964) 20

PERSONNAGE



Prix Nobel 1925

Valeur doublée si Hertz

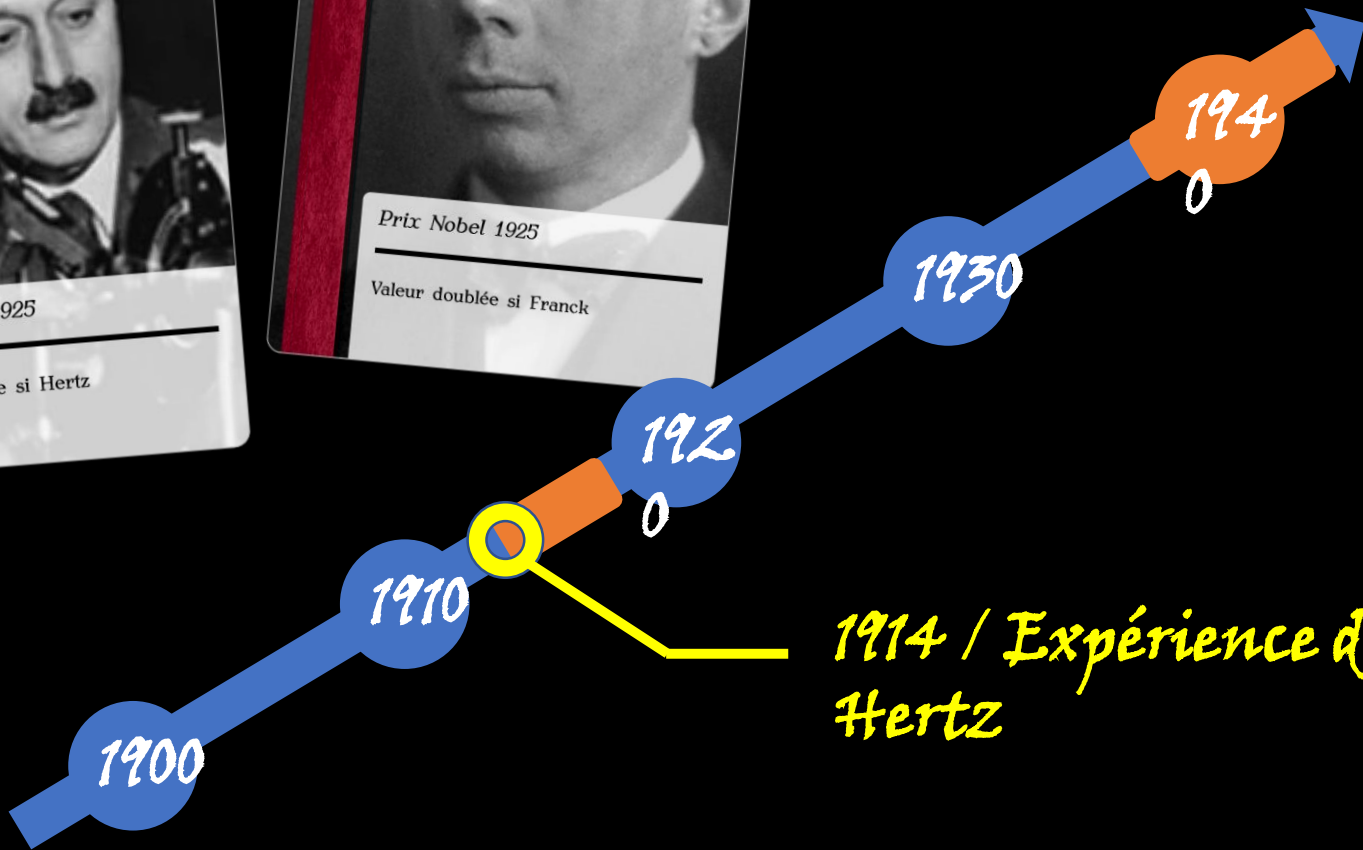
Gustav Hertz  
(1887-1975) 20

PERSONNAGE



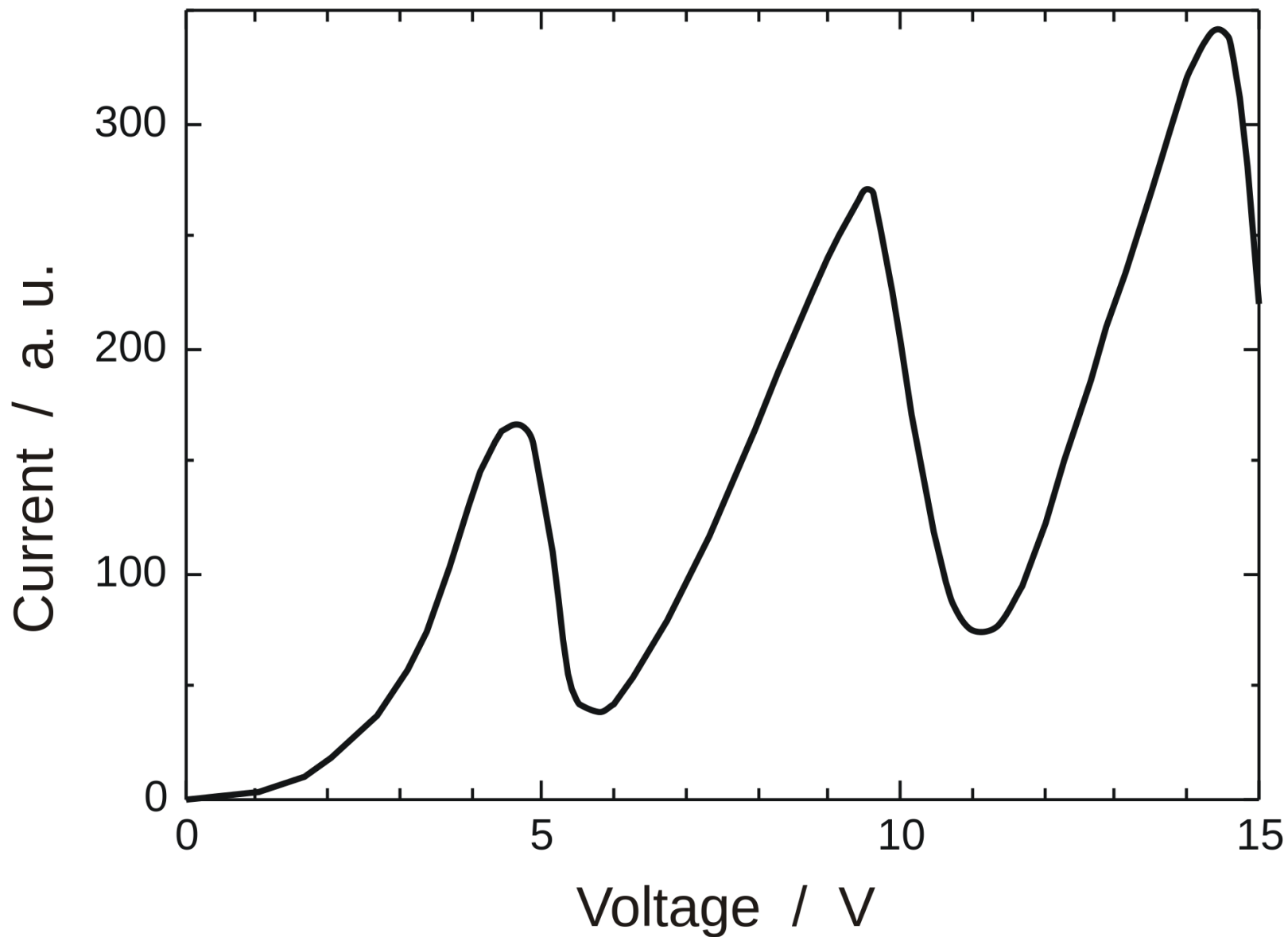
Prix Nobel 1925

Valeur doublée si Franck



1914 / Expérience de Franck Hertz

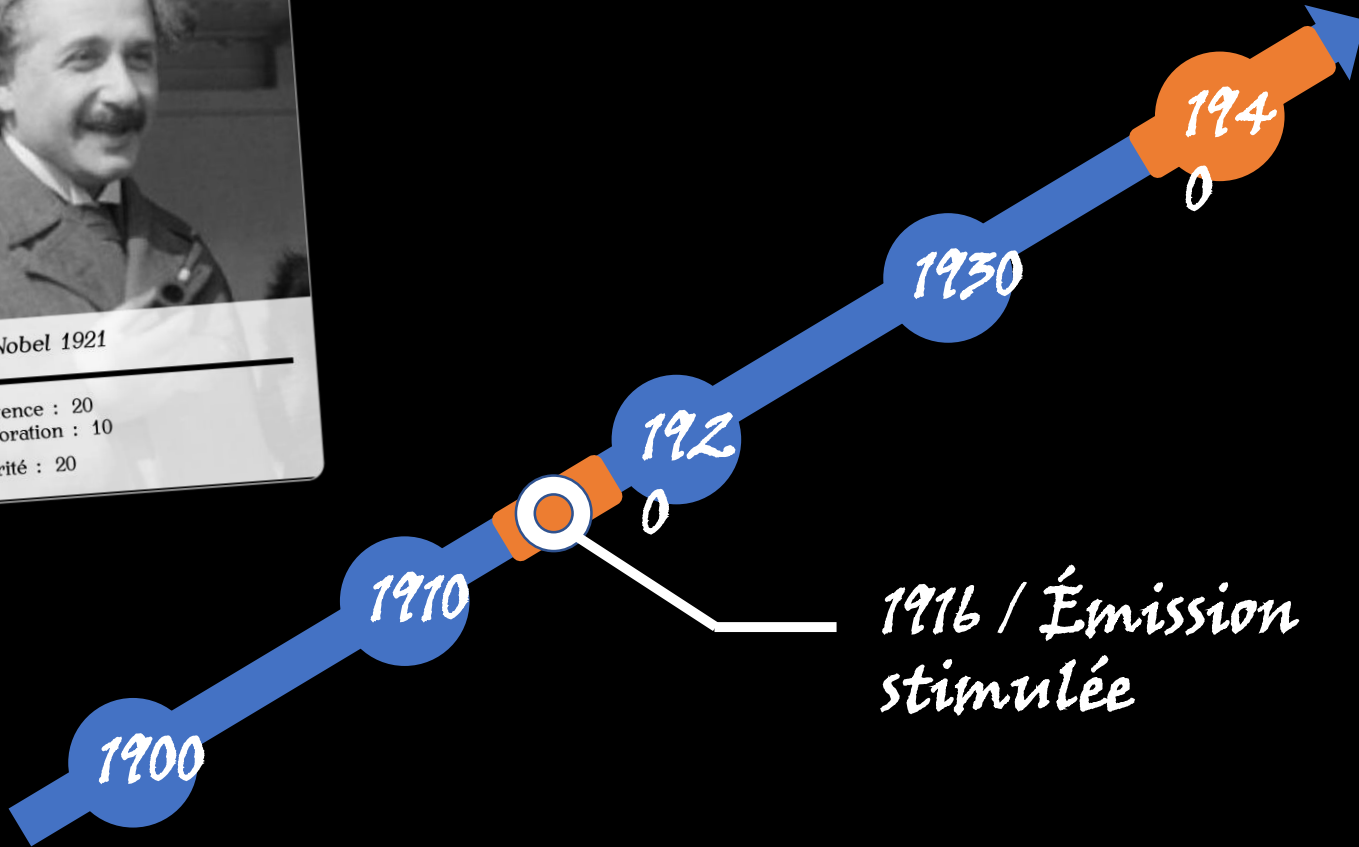
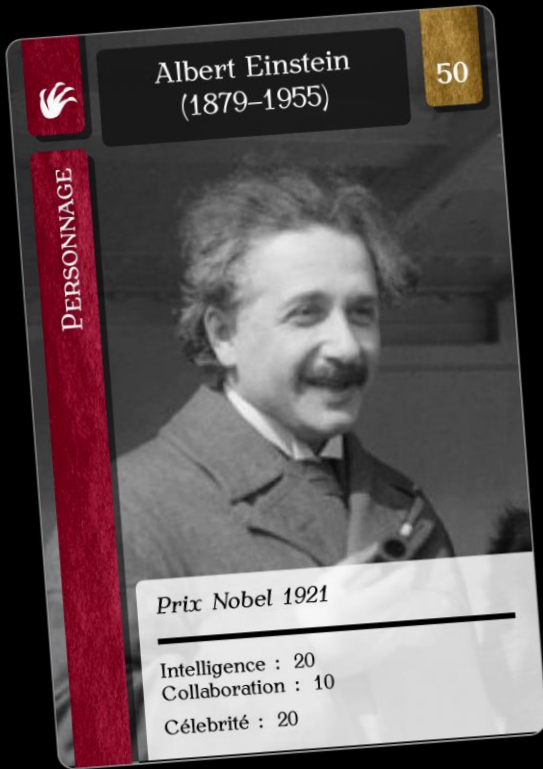
# 1914 / Expérience de Frank & Hertz



# 1914 / Expérience de Frank & Hertz

## Prix Nobel de physique 1925

Confirme la quantification des niveaux d'énergie des atomes,  
indépendamment de celle de la lumière



# 1916 / Émission stimulée

Trois modes d'interaction atome/lumière

1

**Absorption** 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

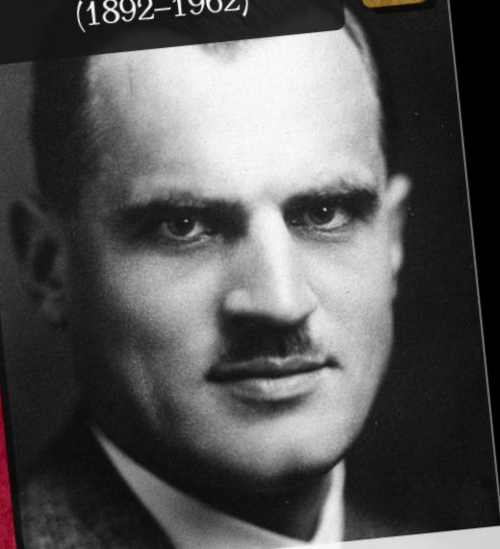
**Émission stimulée** d'un quantum lumineux  
L'atome soumis à un quantum d'énergie  $E_n - E_m$  passe du niveau  $E_n$  à  $E_m$  en émettant un quantum identique au quantum incident

Permet de retrouver la loi de Planck

Retombée en 1960 : inversion de population + émission stimulée = rayonnement LASER

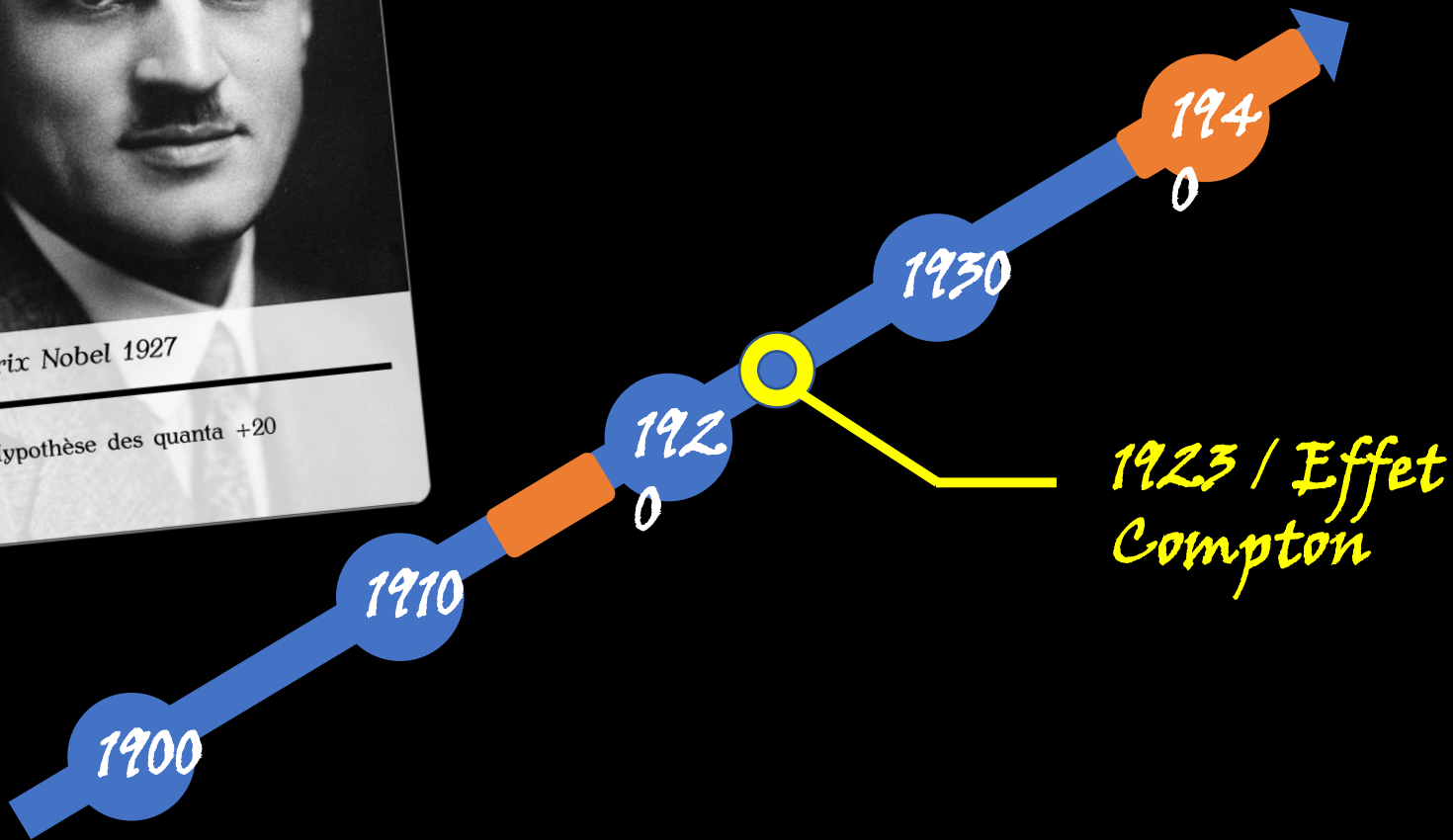
Arthur Compton  
(1892-1962) 25

PERSONNAGE



Prix Nobel 1927

Hypothèse des quanta +20






# 1923 / Effet Compton


Confirme la quantification de l'énergie de la lumière

Les quanta de lumière se comportent comme des particules

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$

 Louis de Broglie  
(1892-1987) 35

PERSONNAGE

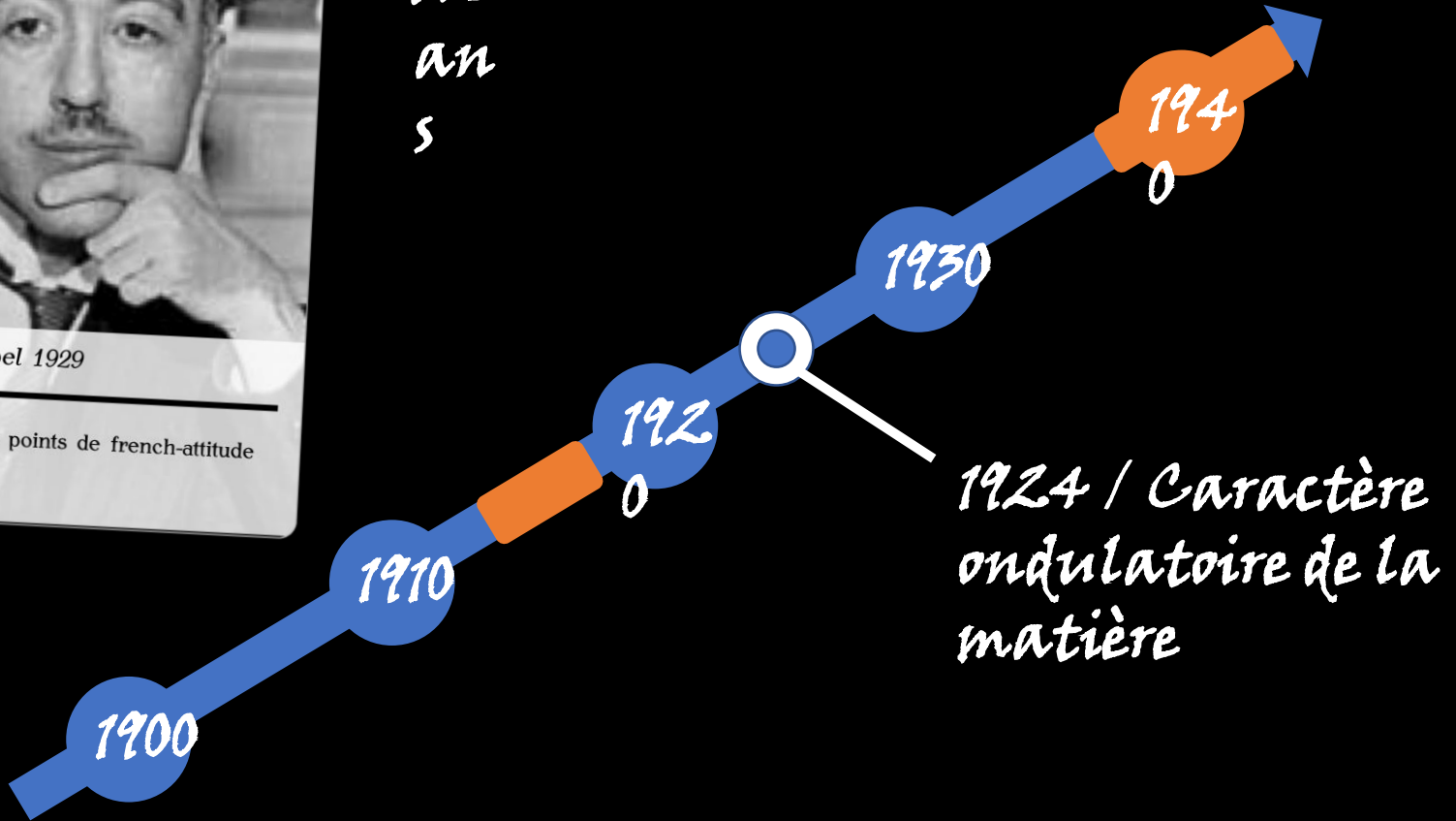


Prix Nobel 1929

---

Gagner 10 points de french-attitude

32  
ans



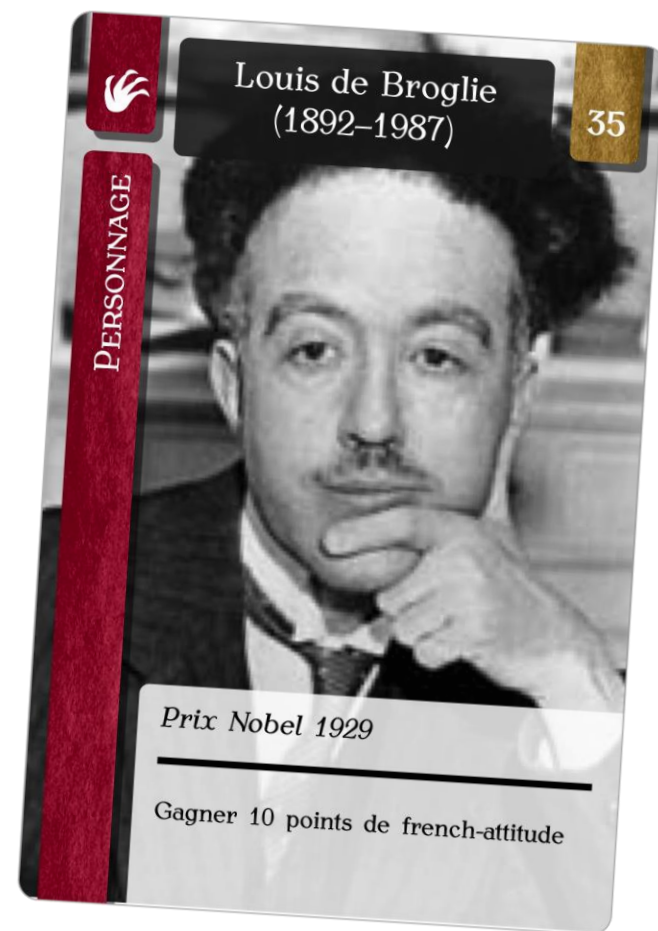
# 1924 / Louis de Broglie

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



# 1925 / L'assaut mathématique

Les mathématiques prennent le pas sur l'intuition

**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

23  
ans

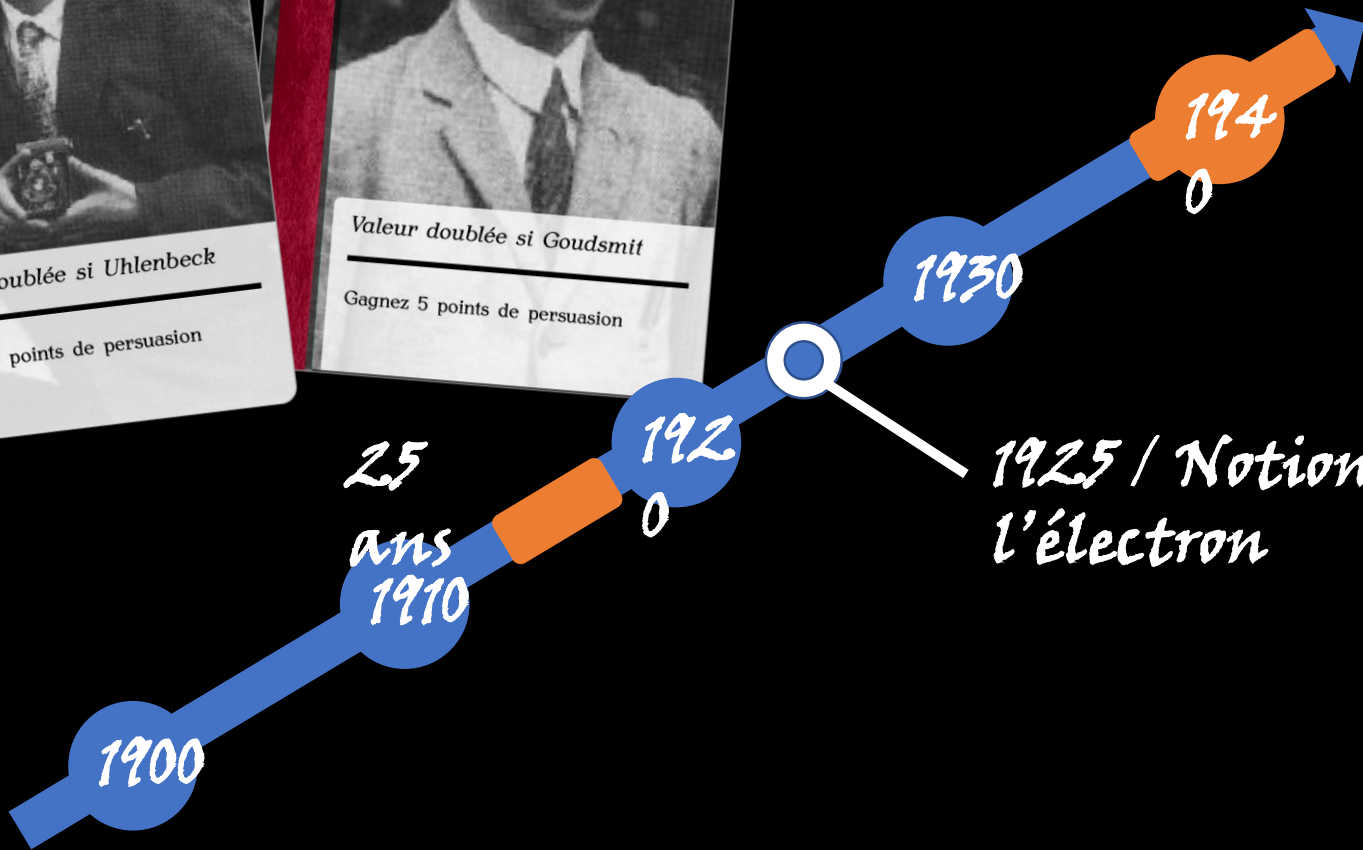
25  
ans  
1910

1920

1930


1940

1925 / Notion de spin de l'électron



**Werner Heisenberg**  
(1901–1976) 40


PERSONNAGE



Prix Nobel 1932  
Gagnez 10 points d'initiative


**Pascual Jordan**  
(1902–1980) 15

PERSONNAGE



Gagnez un sort d'invisibilité

**Max Born**  
(1882–1970) 25

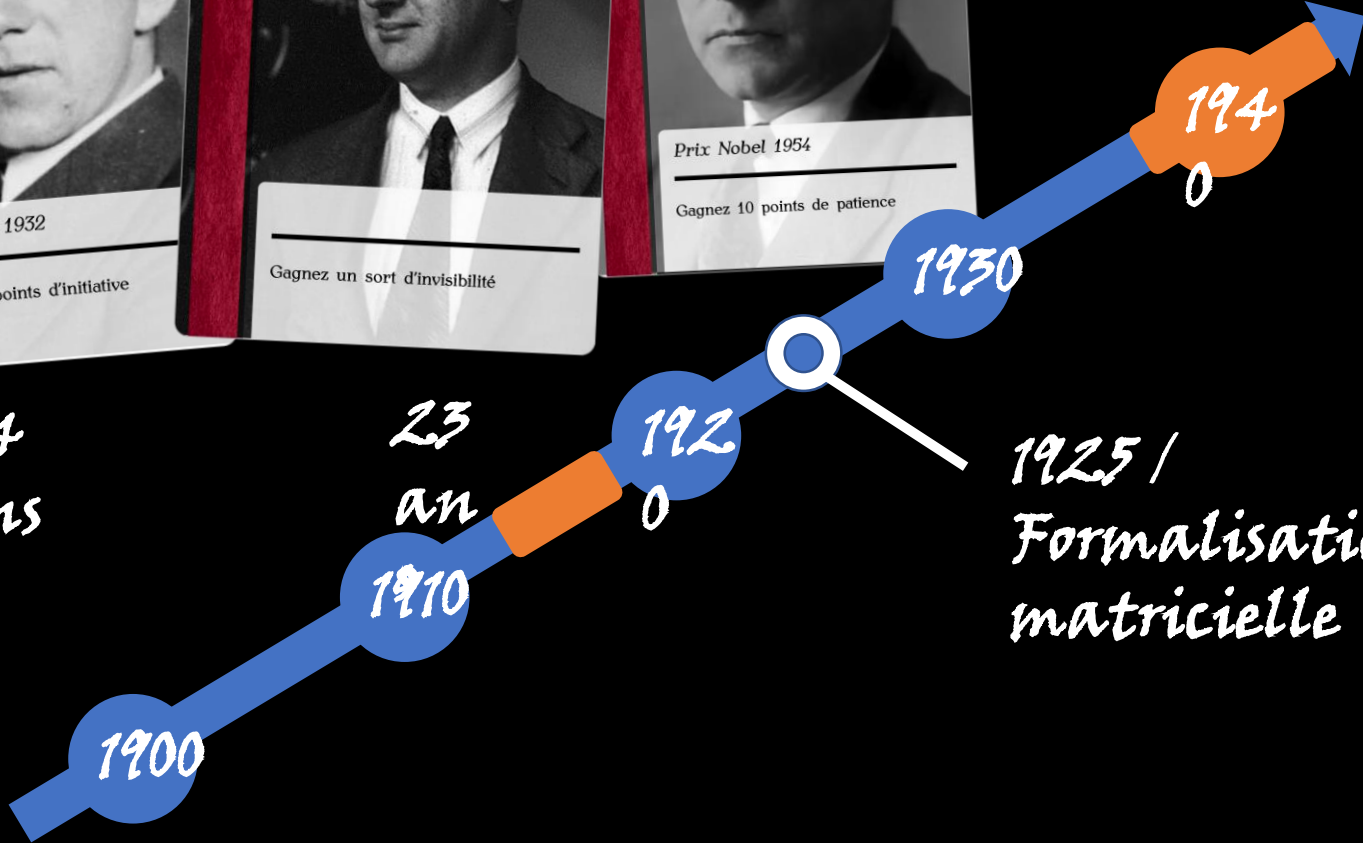


Prix Nobel 1954  
Gagnez 10 points de patience

43  
ans

24  
ans

23  
an



1910

1920

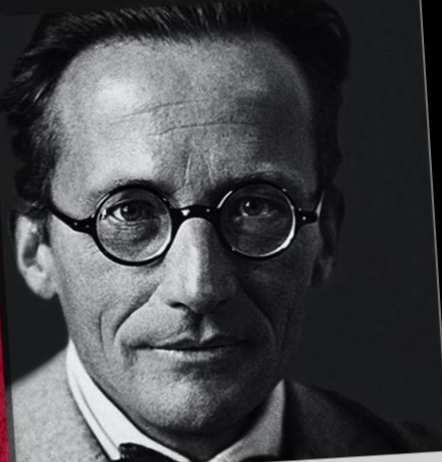
1930

1940

1925 /  
Formalisation  
matricielle

Erwin Schrödinger  
(1887-1961) 25

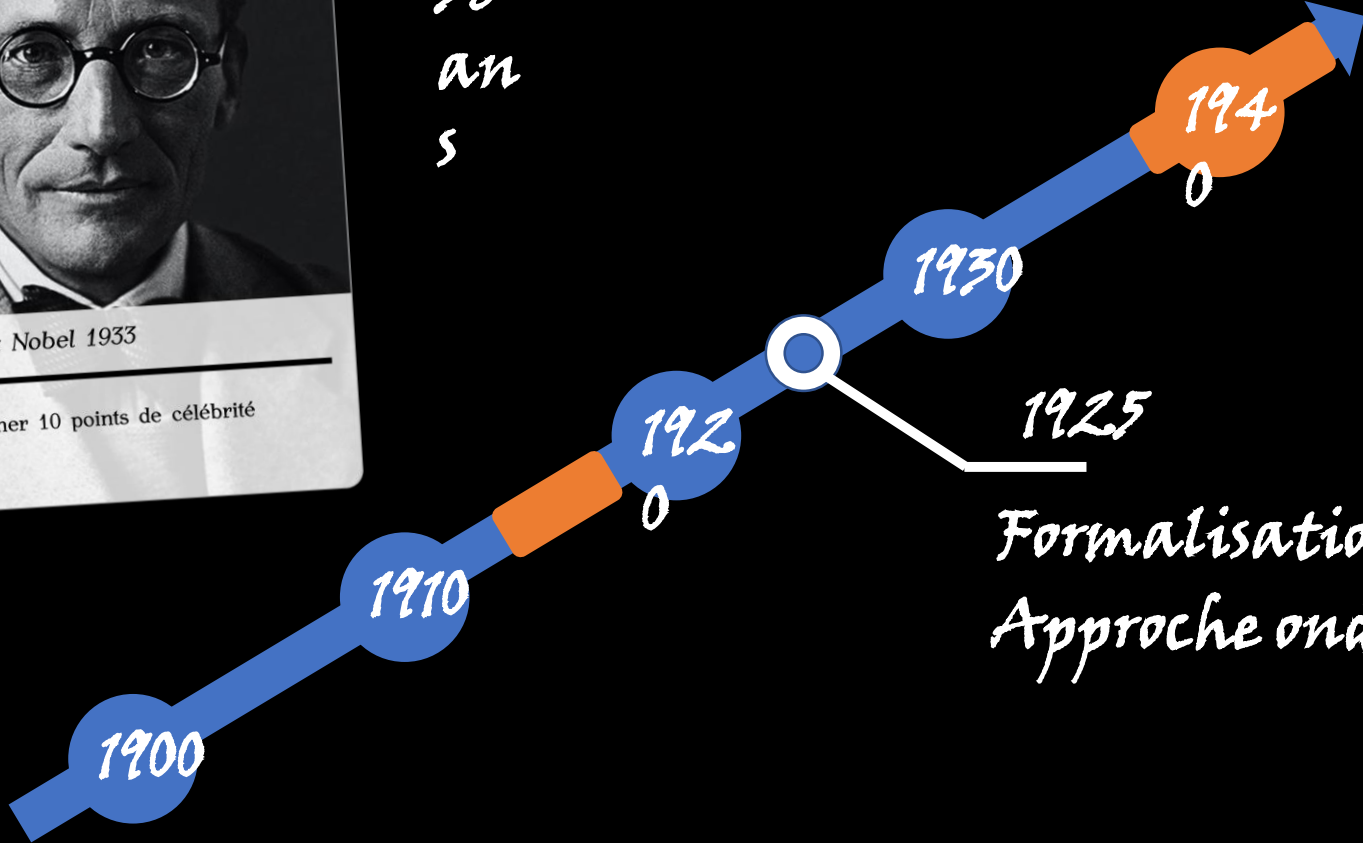
PERSONNAGE



Prix Nobel 1933

Gagner 10 points de célébrité

38  
ans



1925  
Formalisation  
Approche ondulatoire

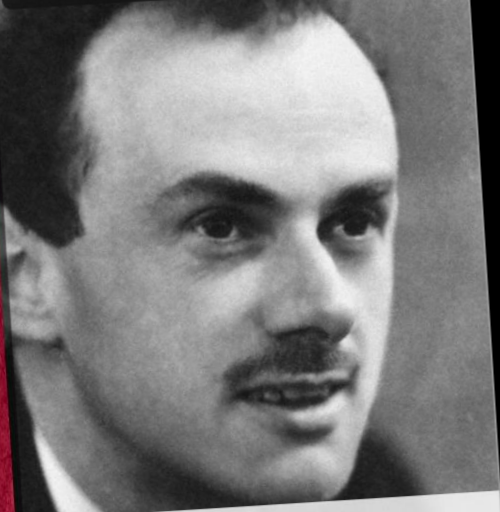




Paul Dirac  
(1902-1984)

40

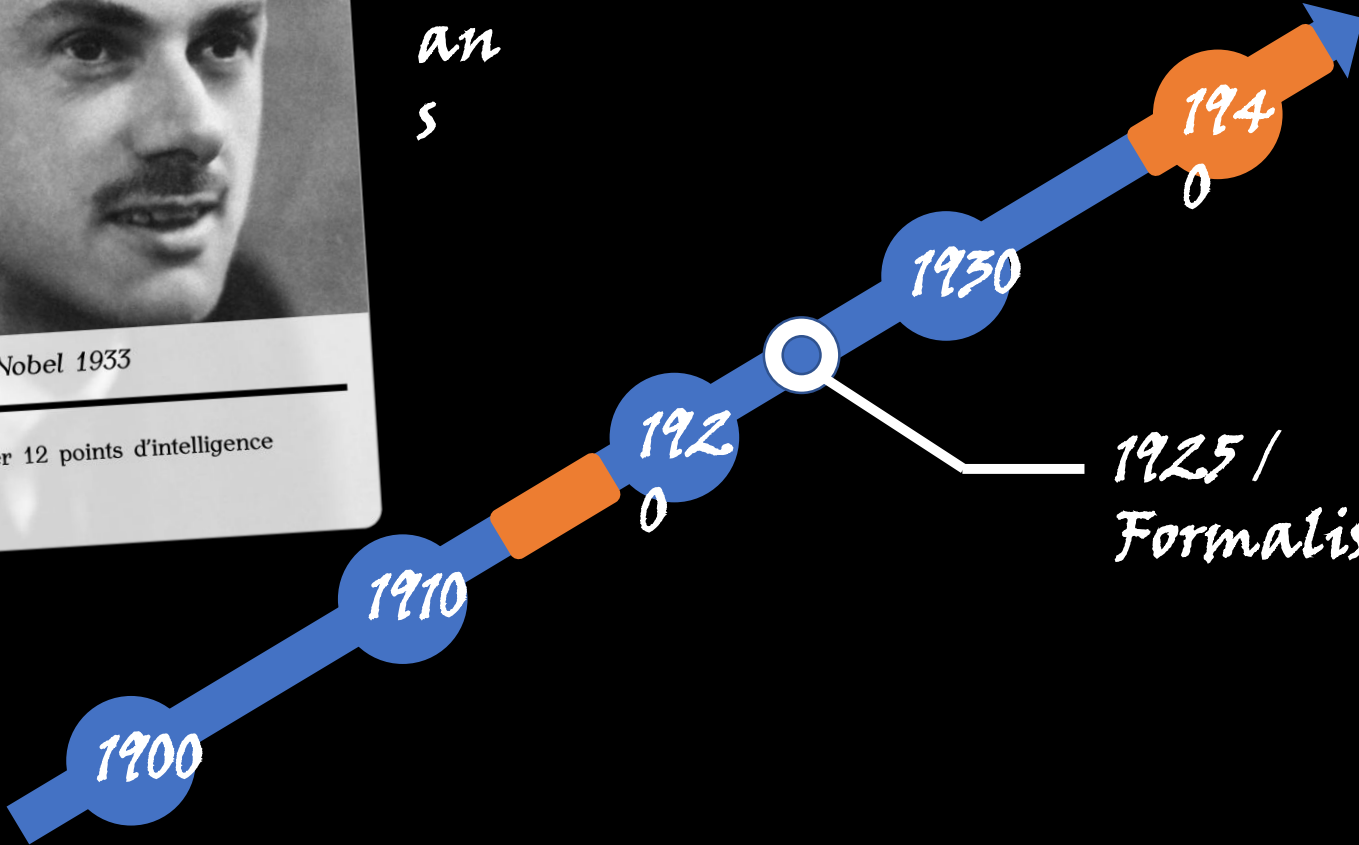
PERSONNAGE



Prix Nobel 1933

Gagner 12 points d'intelligence

23  
ans



1925 /  
Formalisation

## 1925 / Formalisation de Dirac

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


# 1925 / Formalisation de Dirac

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

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

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

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

 Wolfgang Pauli  
(1900–1958) 30

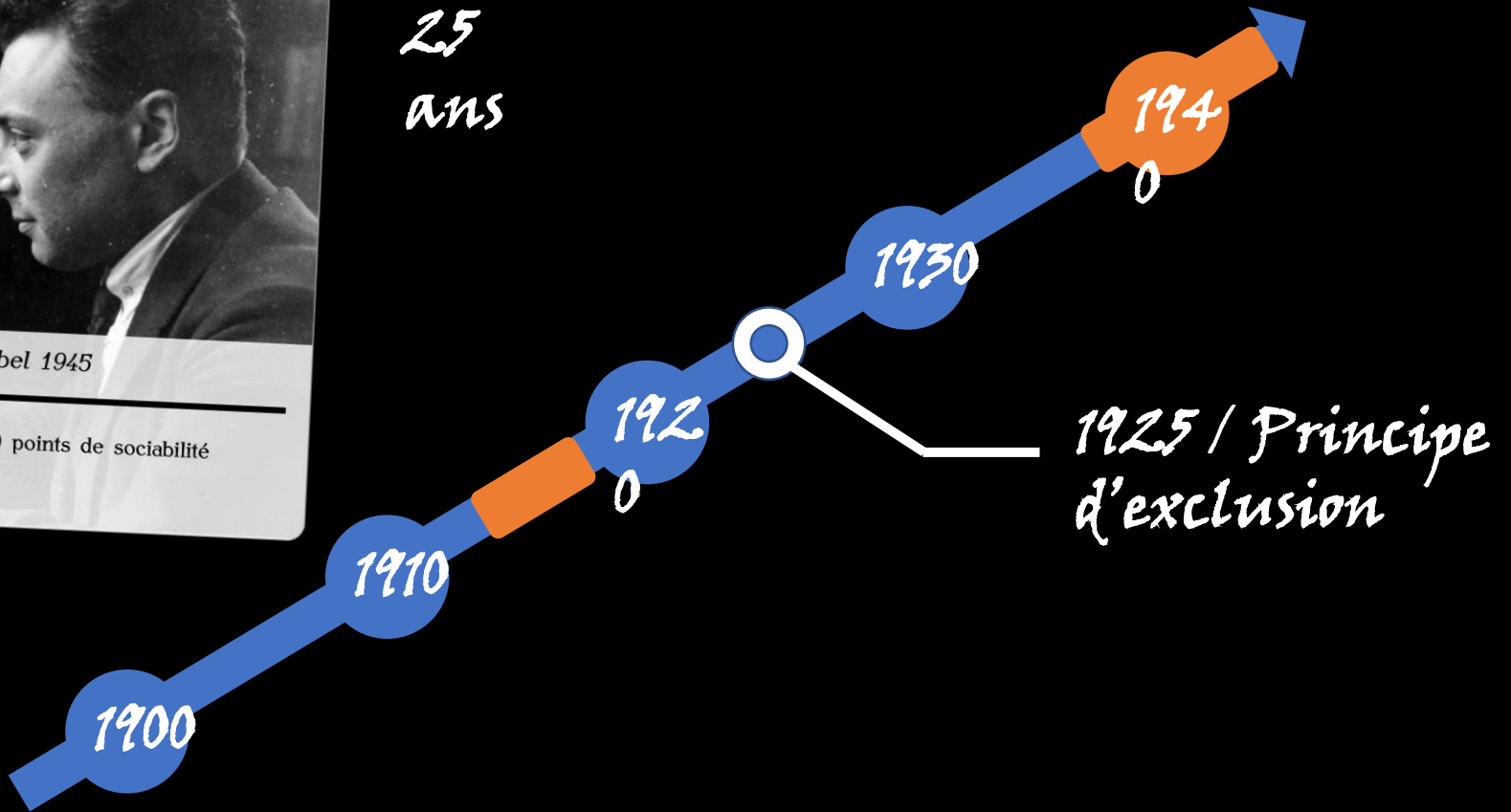
PERSONNAGE




Prix Nobel 1945

Perdre 10 points de sociabilité


25  
ans



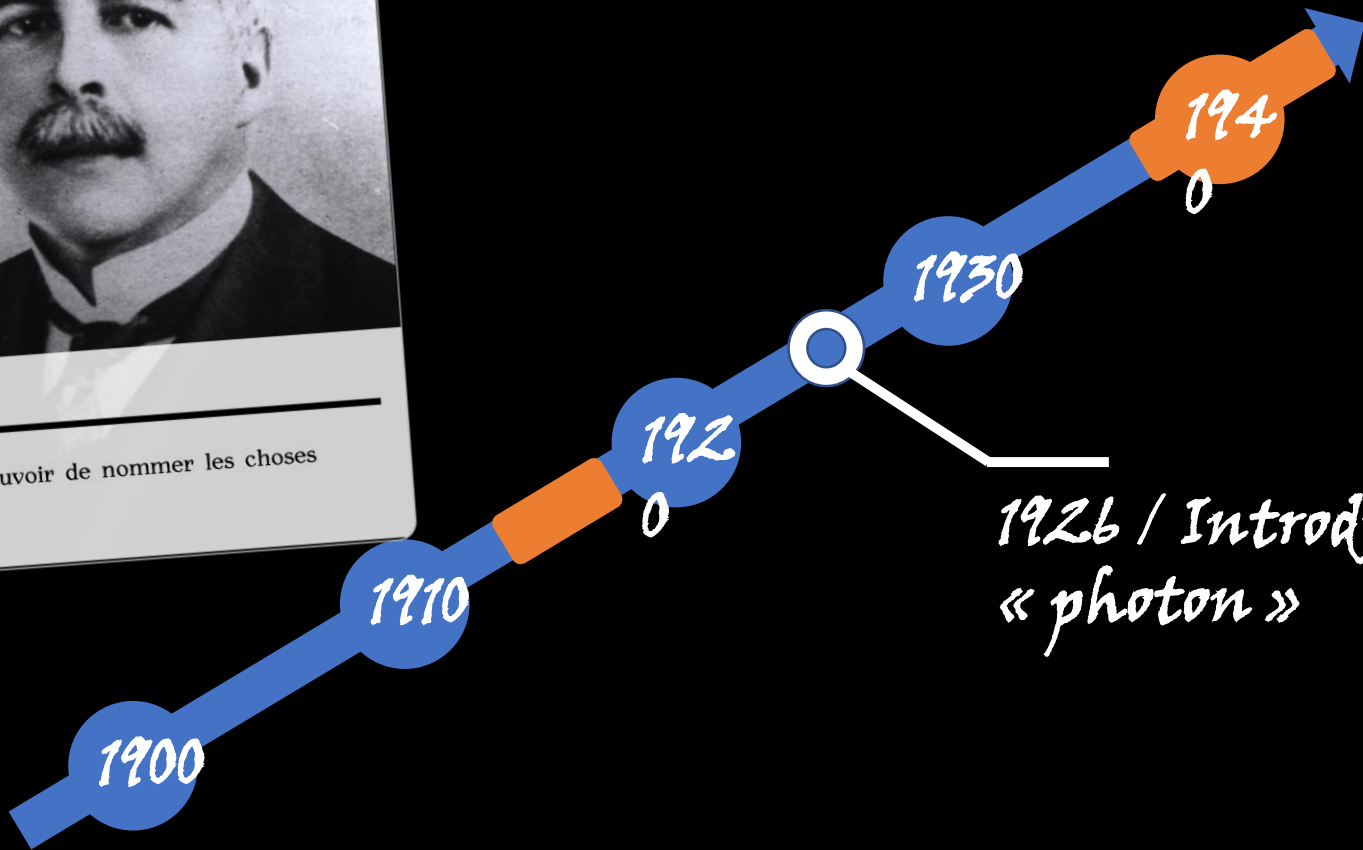
1925 / Principe  
d'exclusion

 Gilbert Lewis  
(1875-1946) 15

PERSONNAGE



Pouvoir de nommer les choses



 Expérience de  
Davisson & Germer  
1927 25

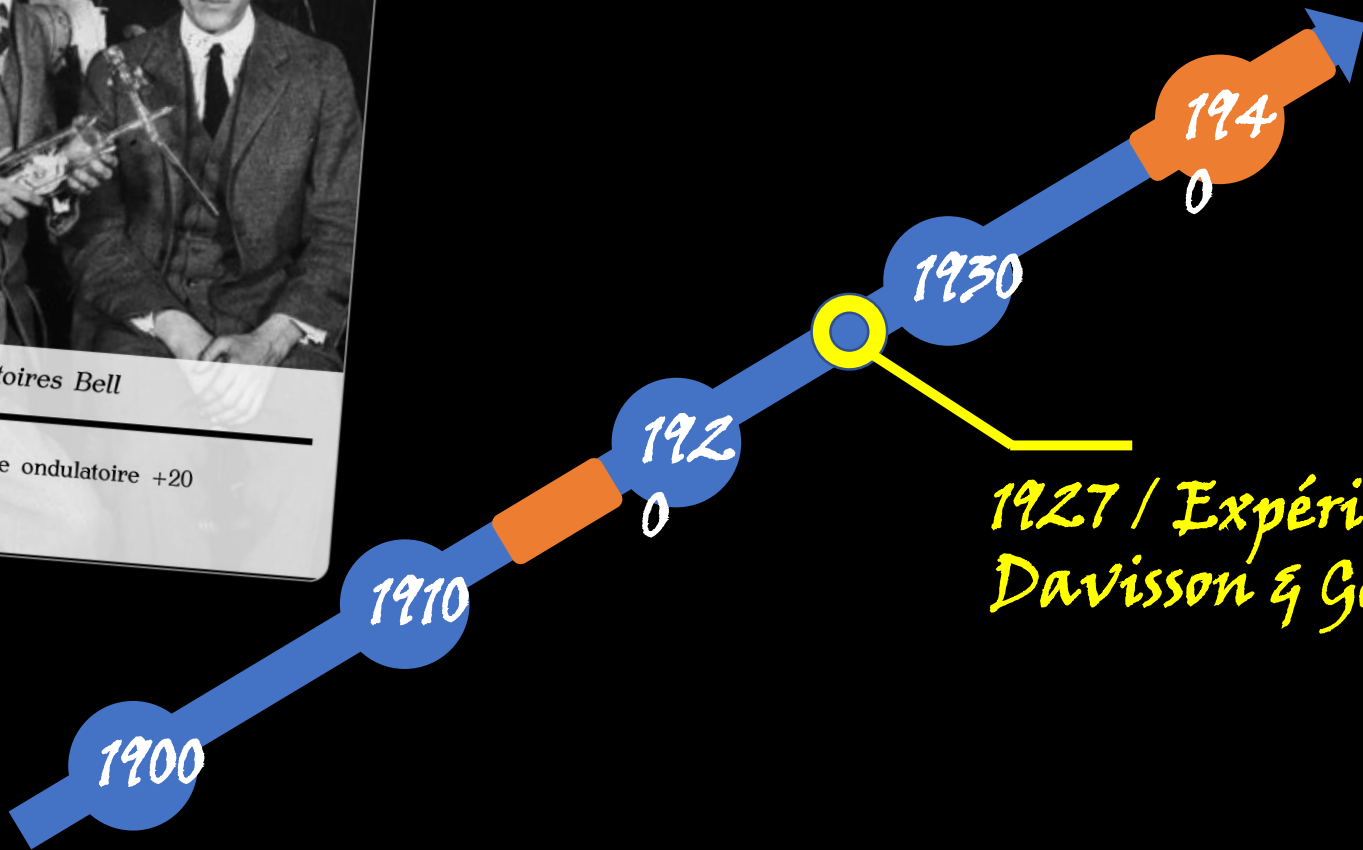
**EXPÉRIENCE**



Laboratoires Bell

---

Hypothèse ondulatoire +20

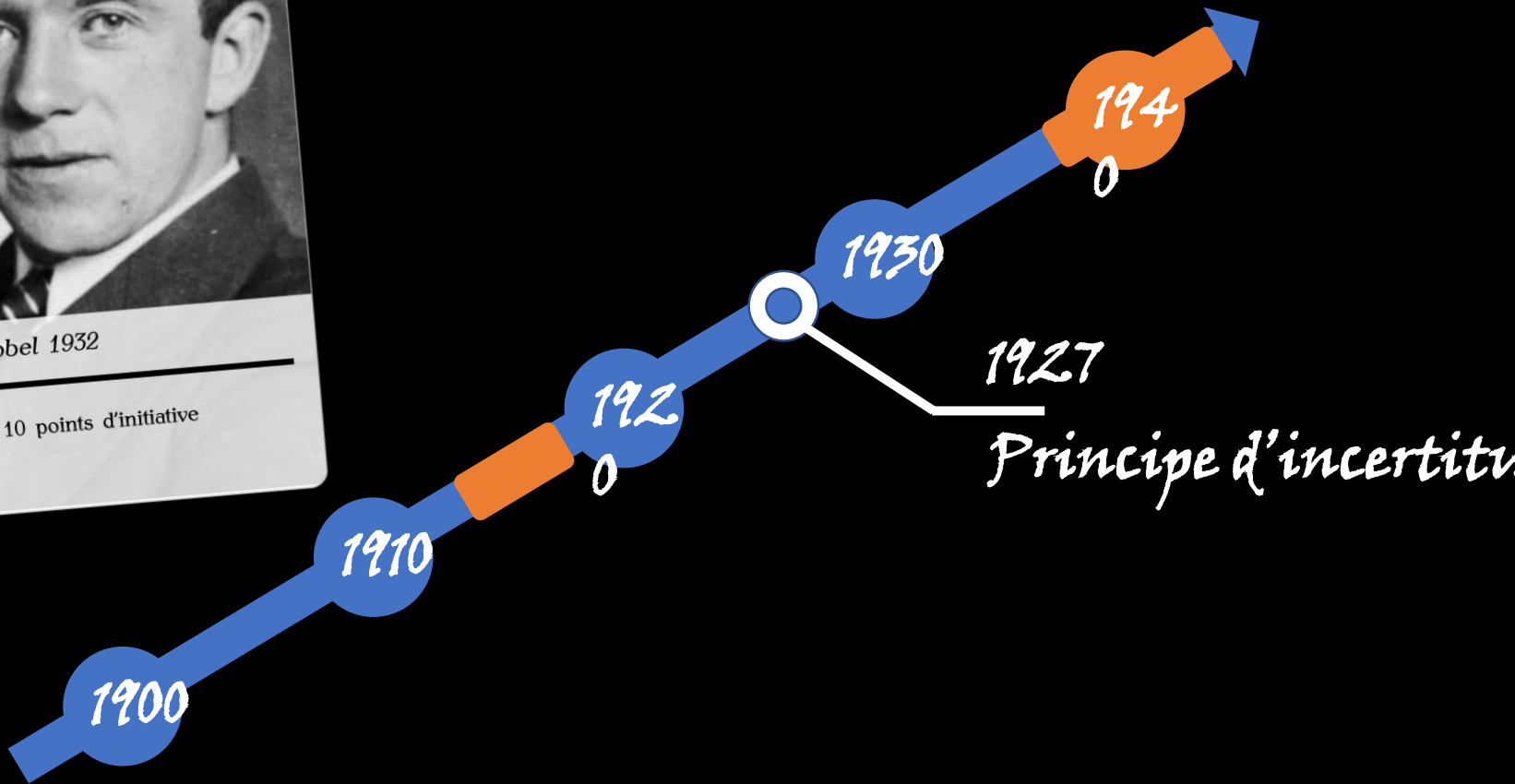


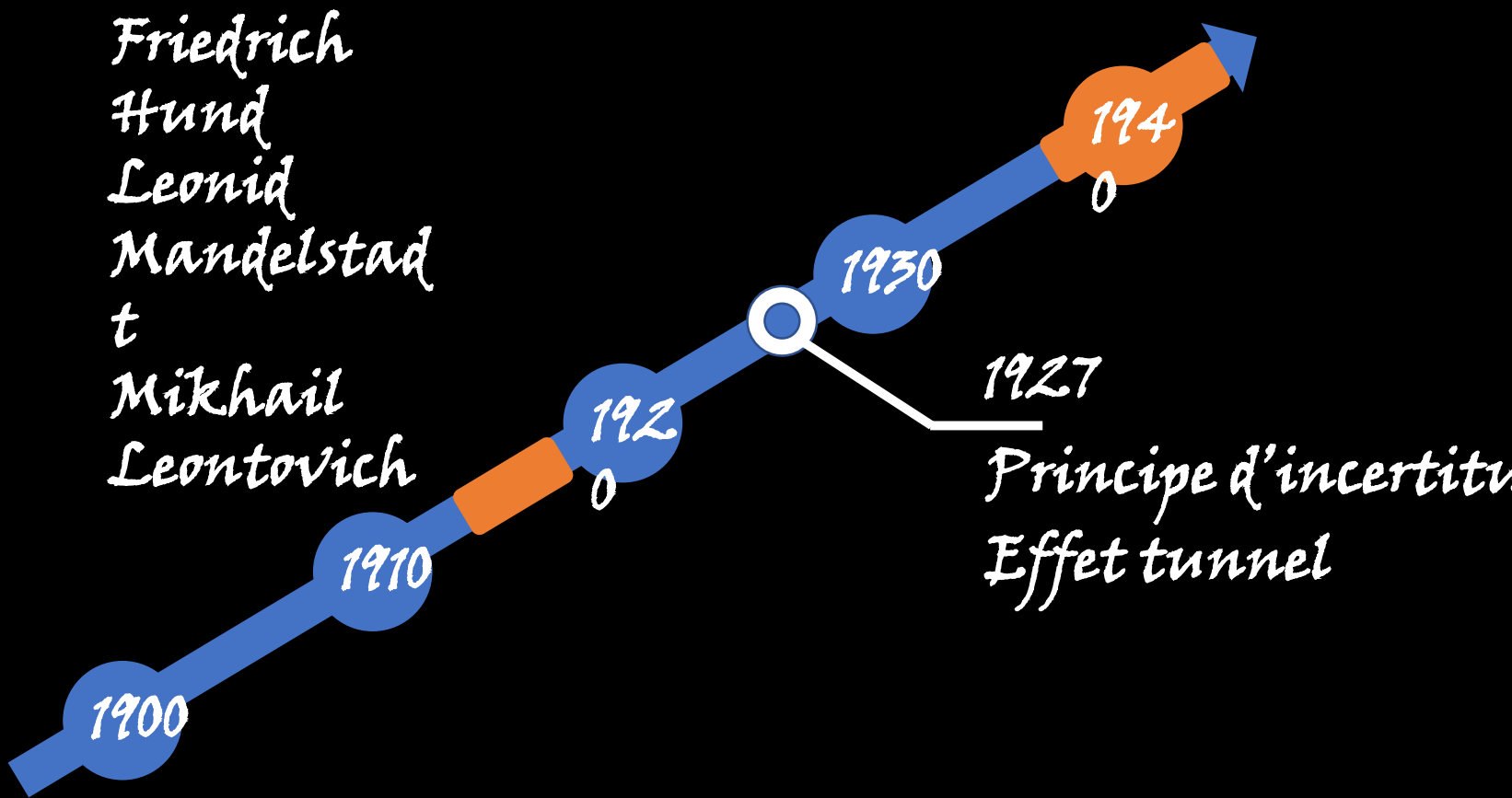
 Werner Heisenberg  
(1901-1976) 40

PERSONNAGE

Prix Nobel 1932

Gagnez 10 points d'initiative









Paul Dirac  
(1902-1984)

40

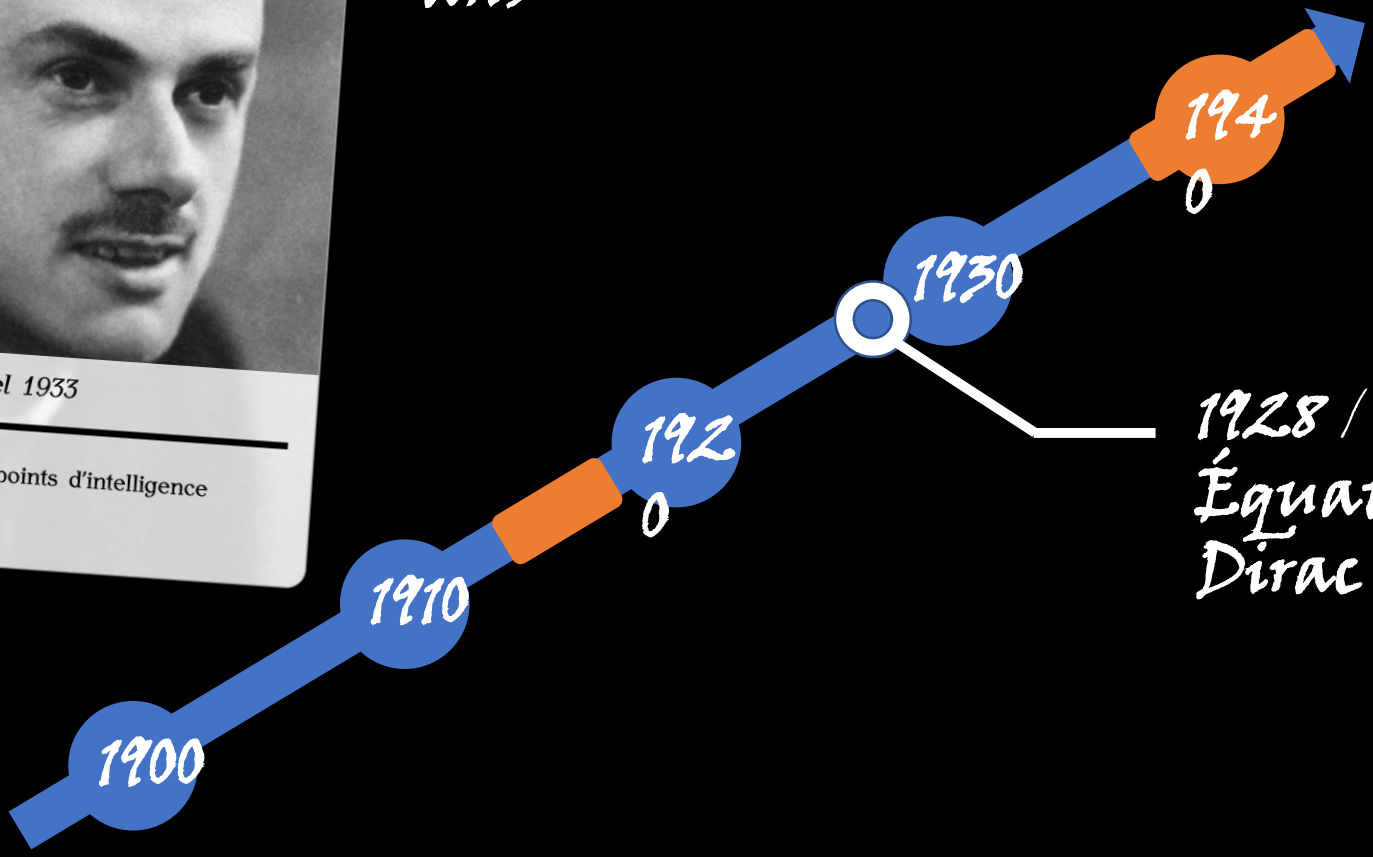
PERSONNAGE



Prix Nobel 1933

Gagner 12 points d'intelligence

26  
ans



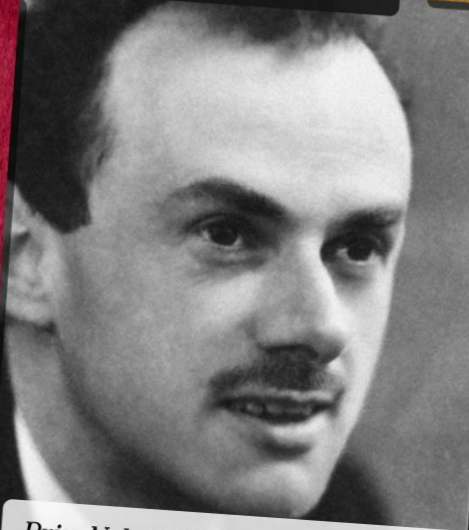
1928 /  
Équation de  
Dirac



Paul Dirac  
(1902-1984)

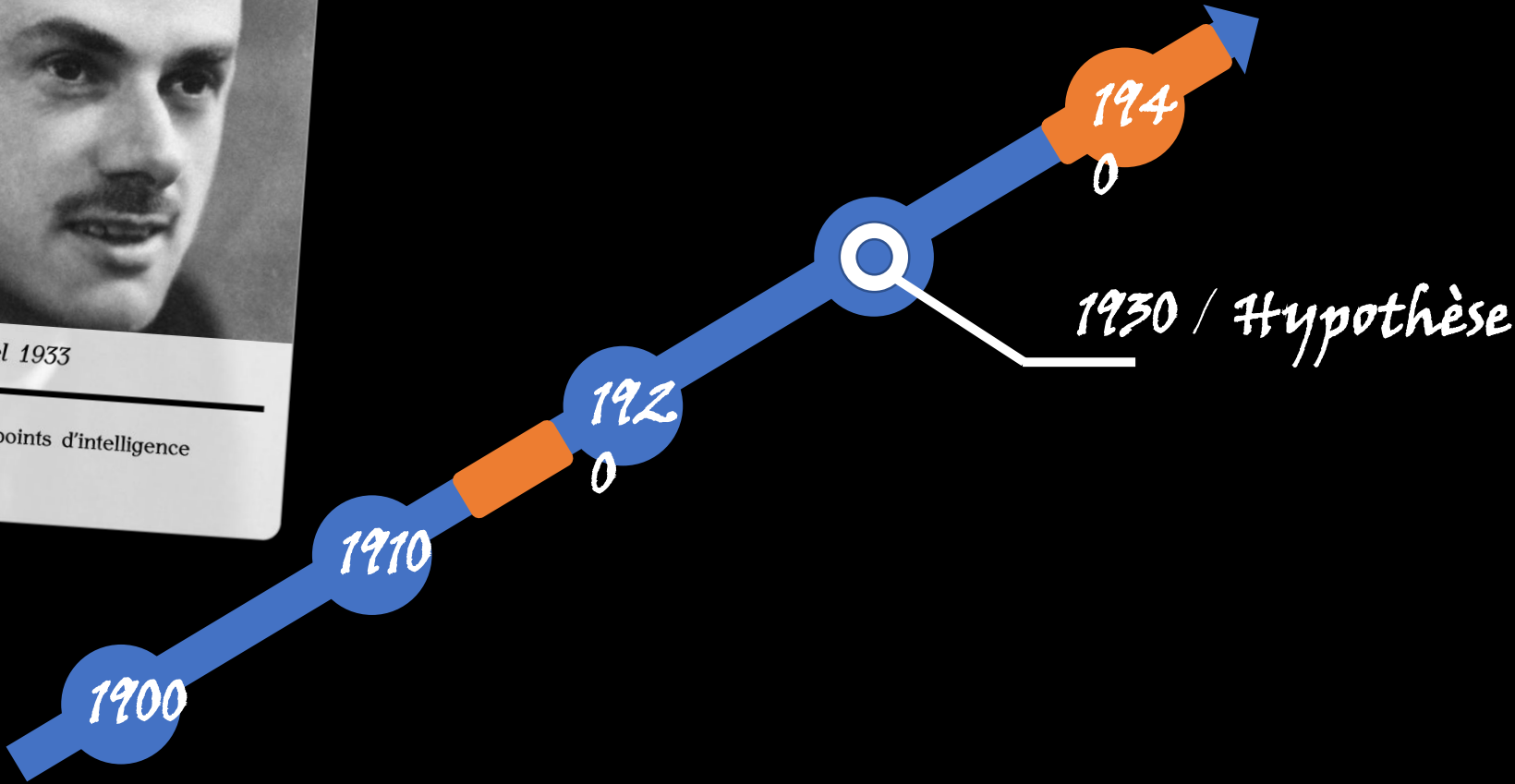
40

PERSONNAGE




Prix Nobel 1933

Gagner 12 points d'intelligence



**Carl David Anderson**  
(1905–1991) 30

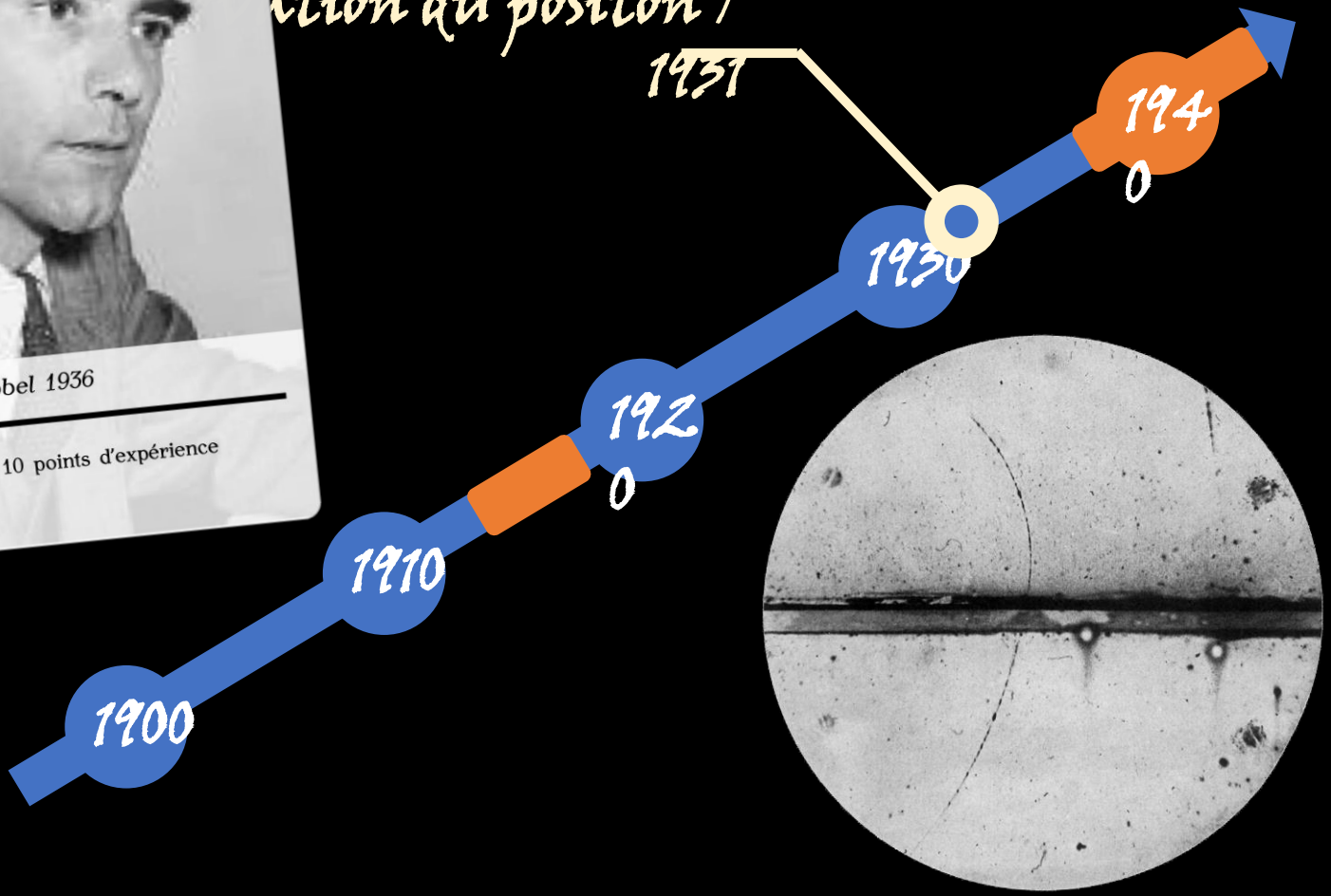
**PERSONNAGE**



Prix Nobel 1936


Gagner 10 points d'expérience

*Evolution du positon /*

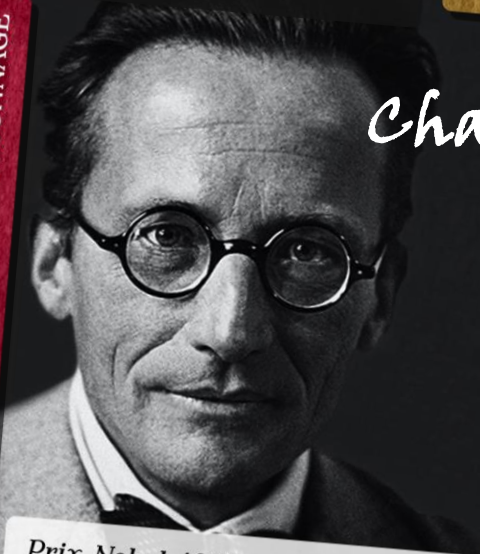


# 1931 / Observation du positon

Séquence prédiction / observation qui va établir la force de cette mise en œuvre de la méthode scientifique, en physique

 Erwin Schrödinger  
(1887–1961) 25

PERSONNAGE



Prix Nobel 1933

---

Gagner 10 points de célébrité

Chat de Schrödinger /



# 1935 / Le chat de Schrödinger

« 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  $\psi$ -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



Albert Einstein  
(1879-1955)

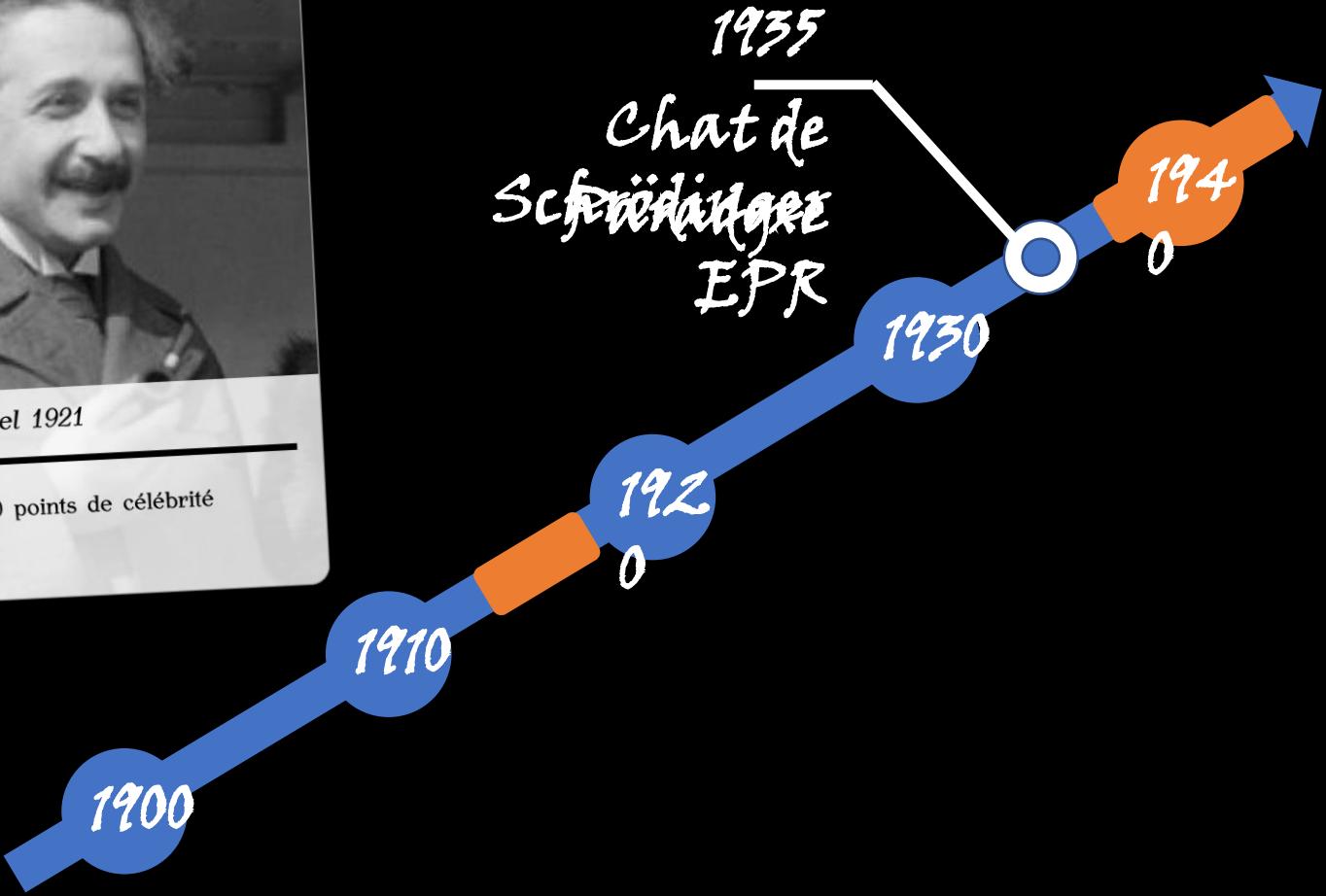
50

PERSONNAGE



Prix Nobel 1921

Gagner 10 points de célébrité



1900 / Planck formule

l'hypothèse des quanta

Atome l'effet photo-électrique

Rutherford / 1911 / Modèle

Expérience atomique de Bohr

Franck & Hertz / 1916 / Émission stimulée

Expérience de 1914

Stern et Gerlach / 1922 / Principe de correspondance

1924 / Caractère ondulatoire de la

matière / Statistique de Bose-Einstein

Expériences de Davisson et Spin / Approche ondulatoire

Germer / 1927 /

Prédiction de la création de positon

Observation du Dirac

positon / 1932 / Chat de Schrödinger /

1935 /



Ce qui  
manque,  
1961 / Inégalités de  
1981 / Expériences  
d'Aspect

Électrodynamique quantique

Physique nucléaire

Physique des particules

Cryptographie quantique

Interférences avec des grosses molécules

Développement des ordinateurs quantiques

Supraconductivité

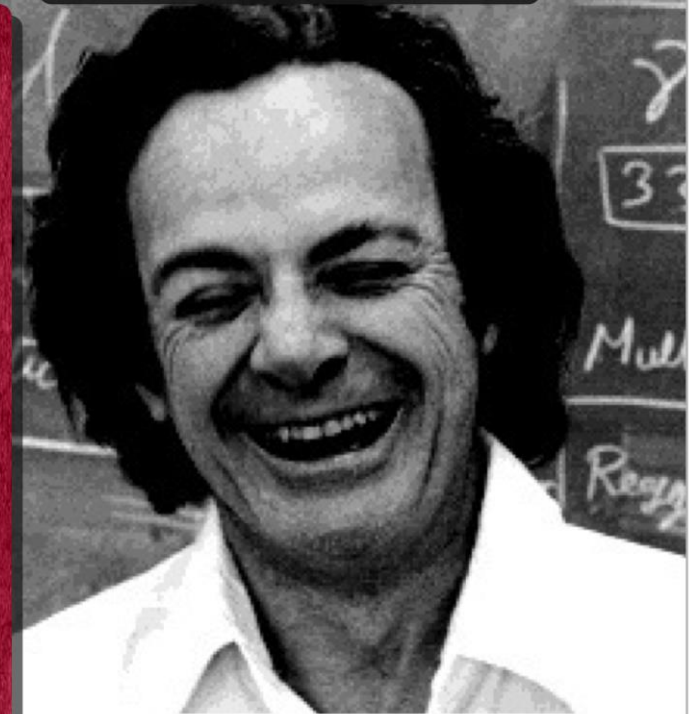
Superfluidité



Richard Feynman  
(1918–1988)

50

PERSONNAGE



*Prix Nobel 1965*

---

Gagnez 10 points de charisme

# Repères épistémologiques

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

Interprétation de Copenhague

Théorie de Bohm

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.

# *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

# Interprétations

## Would Bohr be born if Bohm were born before Born?

Hrvoje Nikolić<sup>a)</sup>

*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]

The Copenhagen interpretation of quantum mechanics was the first interpretation of quantum mechanics that achieved significant recognition among physicists. It was proposed very early by the developers of quantum mechanics, especially Bohr and Heisenberg.<sup>1</sup> Later, many other interpretations of quantum mechanics were proposed, such as the statistical ensemble interpretation,<sup>2</sup> the Bohm (pilot wave) interpretation,<sup>3</sup> the Nelson (stochastic dynamics) interpretation,<sup>4</sup> the Ghirardi-Rimini-Weber (spontaneous collapse) interpretation,<sup>5</sup> the quantum logic interpretation,<sup>6</sup> the information theoretic interpretation,<sup>7</sup> the consistent histories interpretation,<sup>8</sup> the many-world (relative state) interpretation,<sup>9</sup> and the relational interpretation.<sup>10</sup> All of these interpretations are consistent with experiment, as well as with the pragmatic and minimal “shut-up-and-calculate interpretation.”

# *Physique et réalité*

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



# Physique et réalité

0

10



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.

# Physique et réalité

0

10



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.

Shut-up and calculate ?

# Physique et réalité

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

Richard Feynman, 1964

Que signifie « comprendre » ?

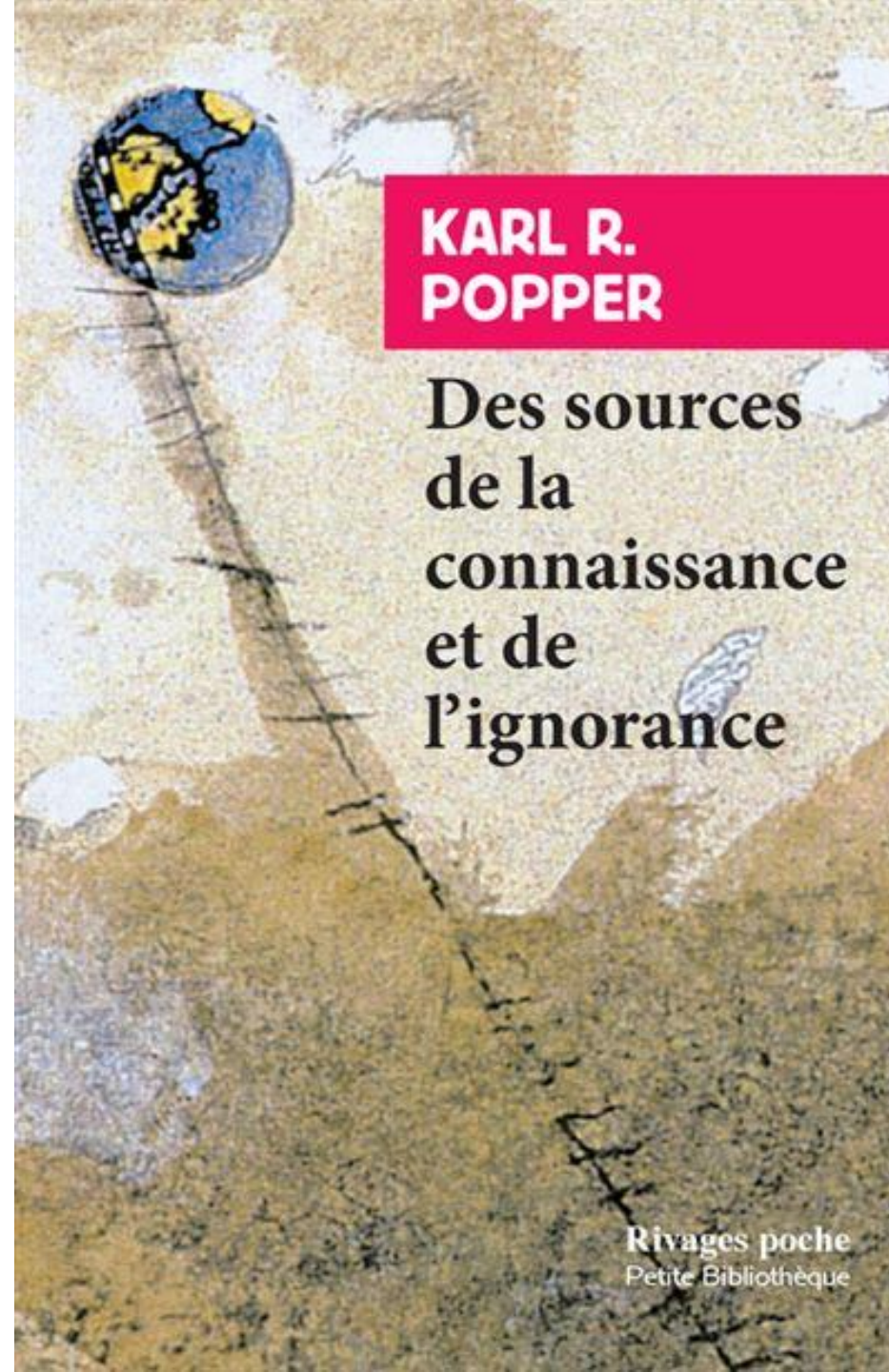
Qui « comprend vraiment » la mécanique newtonienne ?

# Épine épistémologi- que

Peut-on savoir qu'une affirmation est vraie ?

Proposition de Karl Popper : falsificationnisme

La place de la mécanique quantique



**KARL R.  
POPPER**

**Des sources  
de la  
connaissance  
et de  
l'ignorance**

Rivages poche  
Petite Bibliothèque

AN  
INTRODUCTION TO  
THE  
HISTORIOGRAPHY  
OF  
SCIENCE

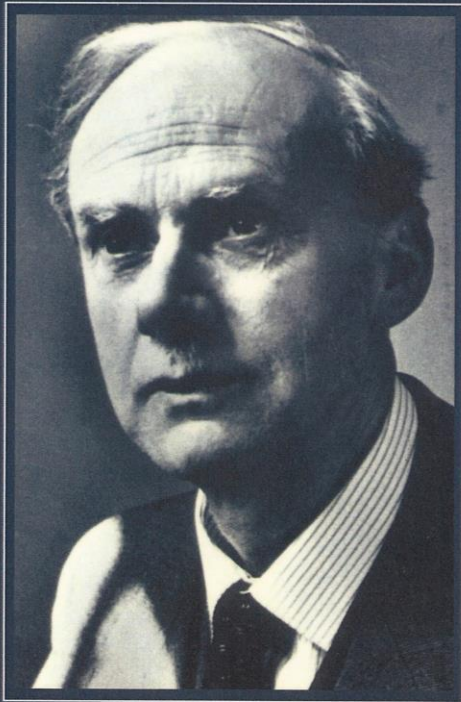
HELGE KRAGH

*De*  
*l'importance*  
*des contextes*



# DIRAC

## A Scientific Biography



Helge S. Kragh

## Contexte / trajectoires personnelles

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

MANJIT  
**KUMAR**  
Le Grand Roman de  
la physique quantique  
Einstein, Bohr... et le débat  
sur la nature de la réalité



Champs sciences

# 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 entre 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 connexions 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 / débats Bohr-Einstein

L'énergie lumineuse est-elle quantifiée ?

La physique est-elle probabiliste ?

*Voir la page wikipedia « Bohr-Einstein debates »*

# 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.

»

# Contexte / transversalité

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 / hasard*



Expérience de  
Davisson & Germer  
1927

25

EXPÉRIENCE



*Laboratoires Bell*

---

Hypothèse ondulatoire +20

*Contexte / utilité*

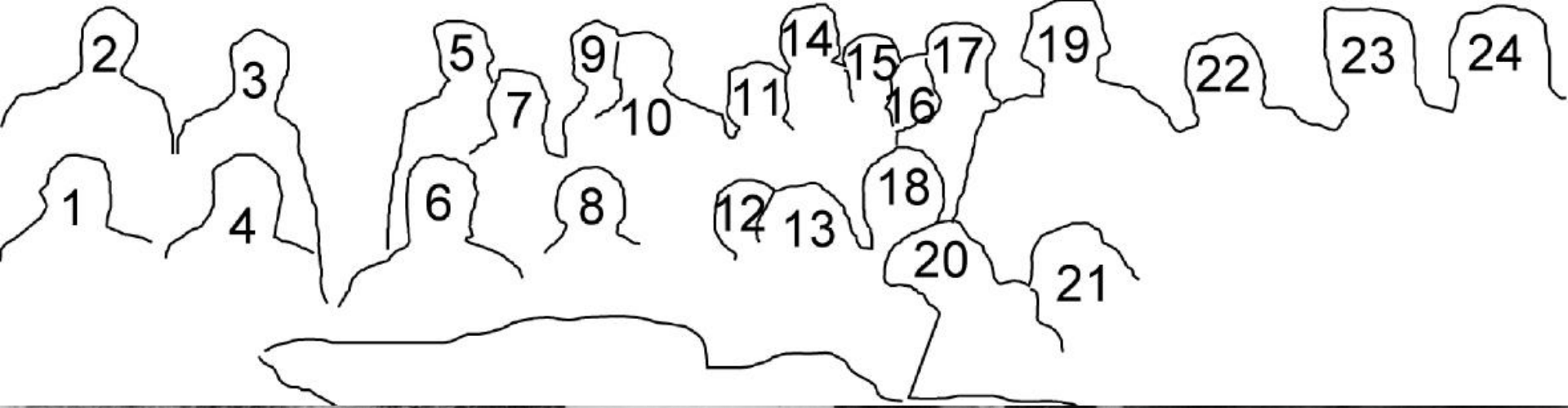
*1931 / microscope électronique*



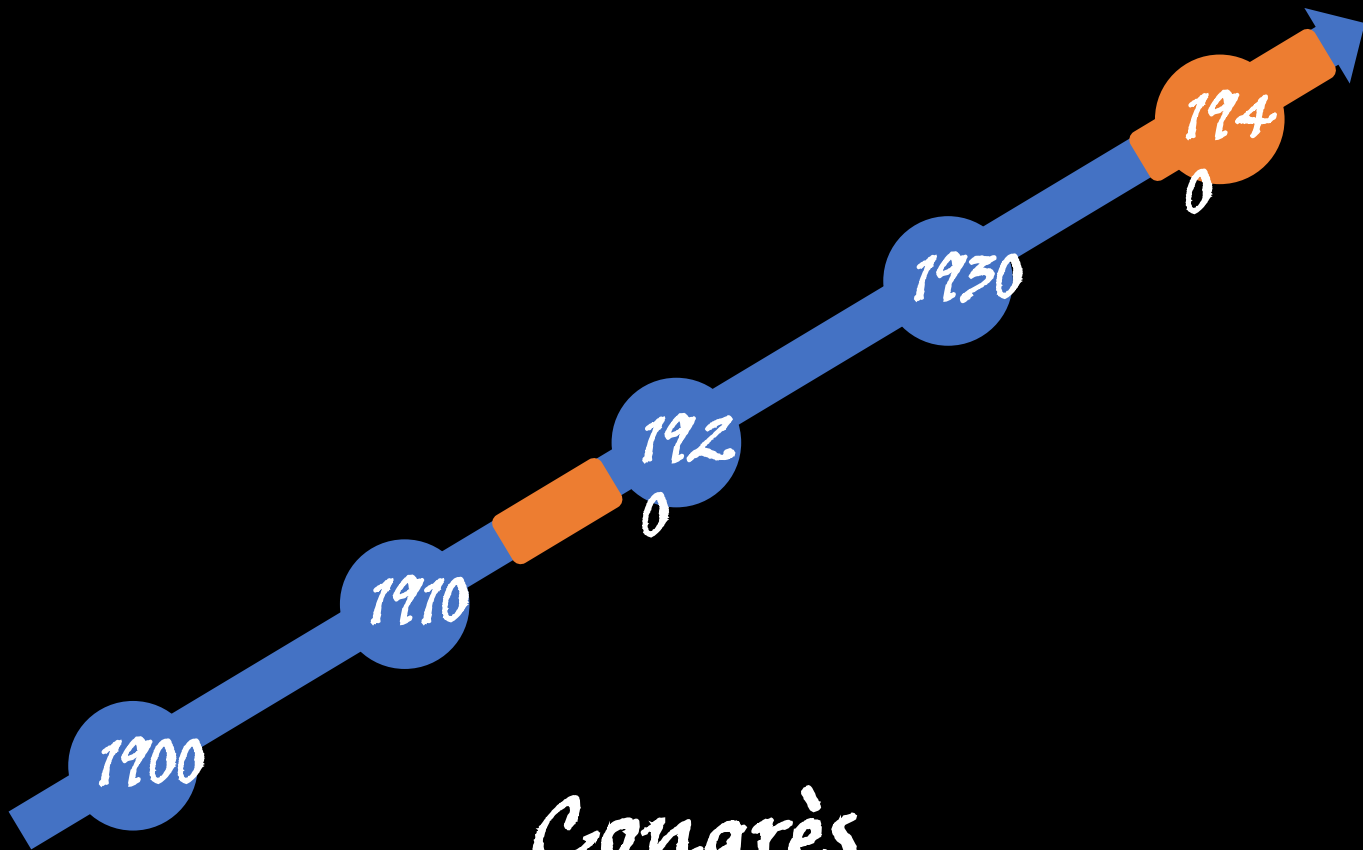
Congrès  
Solvay 1911



Congrès  
Solvay

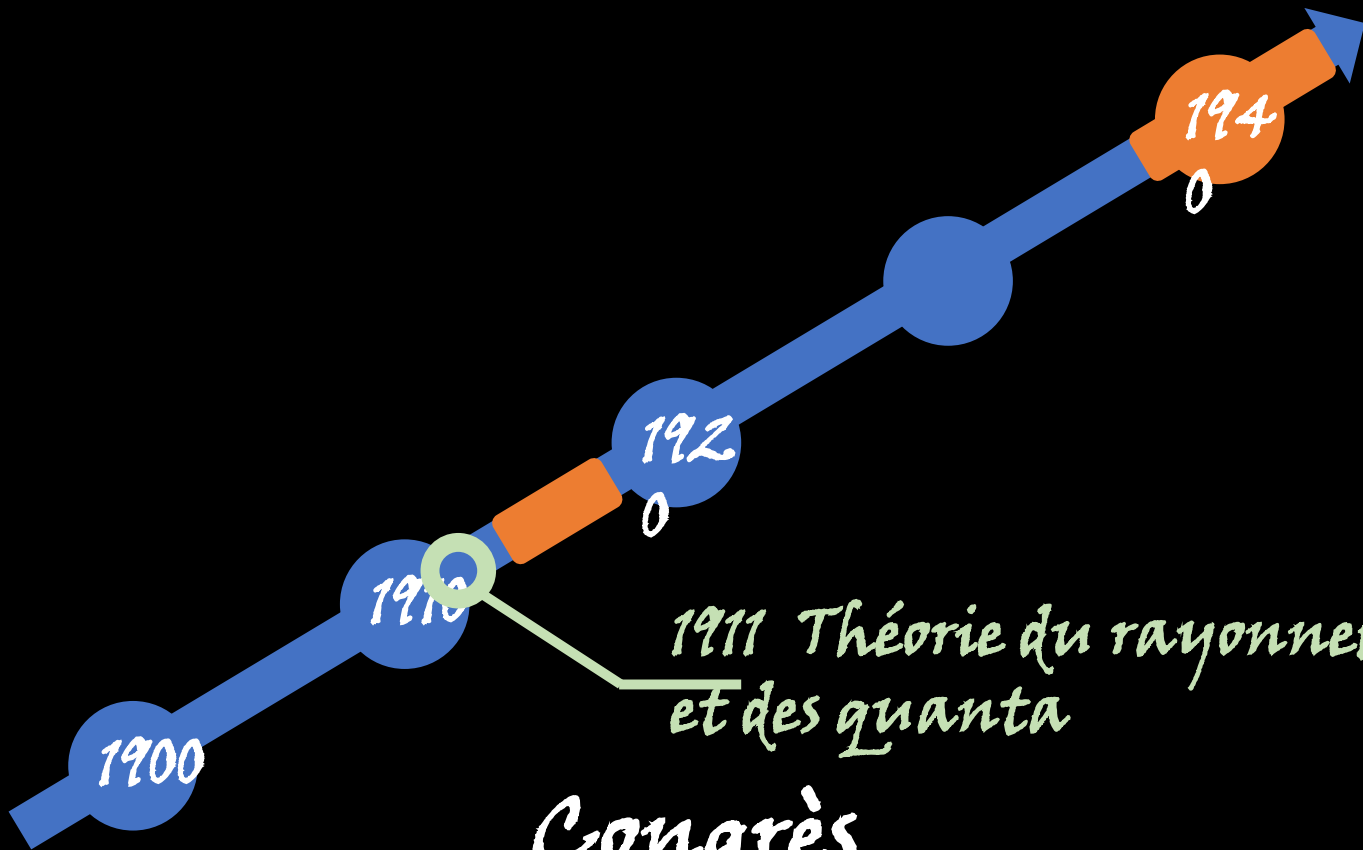


**Participants au premier Congrès Solvay de 1911.** 1 Walther Nernst 2 Robert Goldschmidt 3 Max Planck 4 Marcel Brillouin 5 Heinrich Rubens 6 Ernest Solvay 7 Arnold Sommerfeld 8 Hendrik Antoon Lorentz 9 Frederick Lindemann 10 Maurice de Broglie 11 Martin Knudsen 12 Emil Warburg 13 Jean-Baptiste Perrin 14 Friedrich Hasenöhr 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



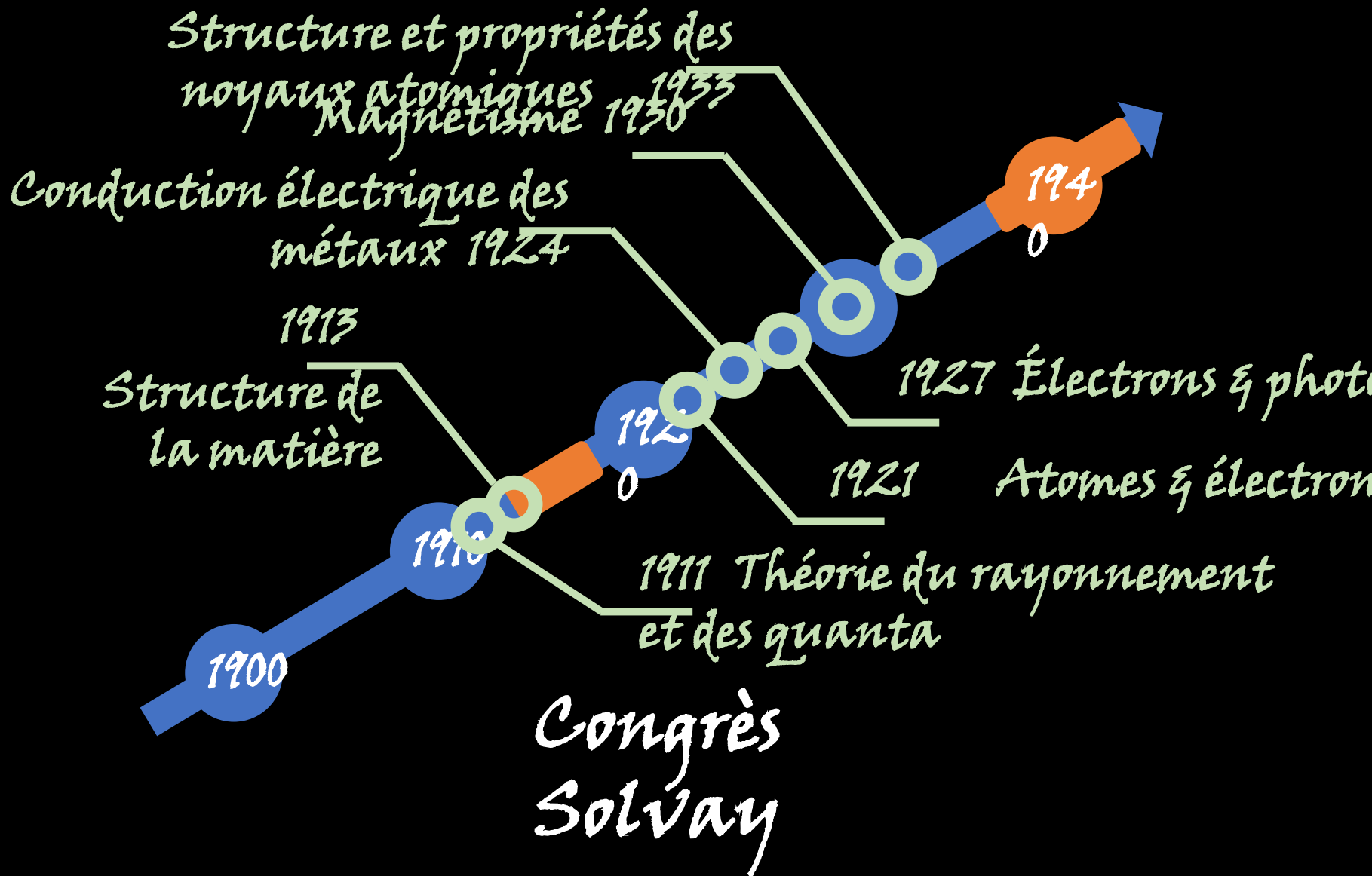
*Congrès  
Solvay*





1911 Théorie du rayonnement  
et des quanta

Congrès  
Solvay



Congrès  
Solvay  
1927



Questions / remarques : [taillet@laph.cnrs.fr](mailto:taillet@laph.cnrs.fr)