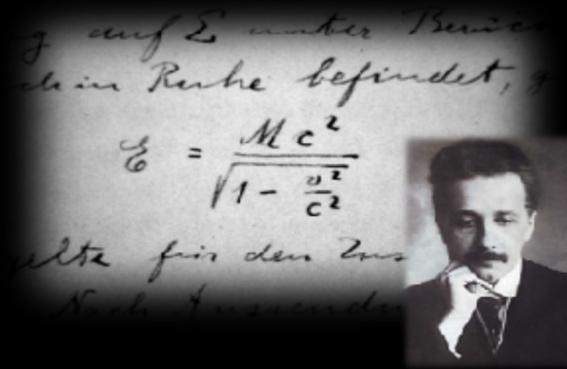


Fiat quantum et photon fuit

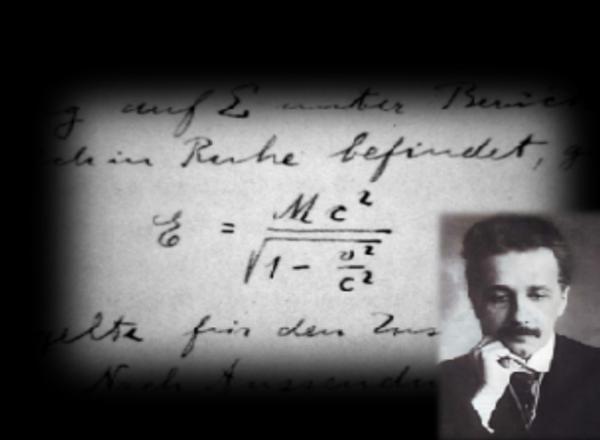
Albert Einstein, 1905



Ce qu'il fallait retenir

Ce qu'il fallait retenir

Fiat quantum et photon fuit
Albert Einstein, 1905



- Planck : les échanges d'énergie sont quantifiés
- Einstein : la lumière est quantifiée

la matière est discontinue

espace et temps sont relatifs

$$E = mc^2$$

- Bohr : l'atome est quantifiée

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/seconde}$$

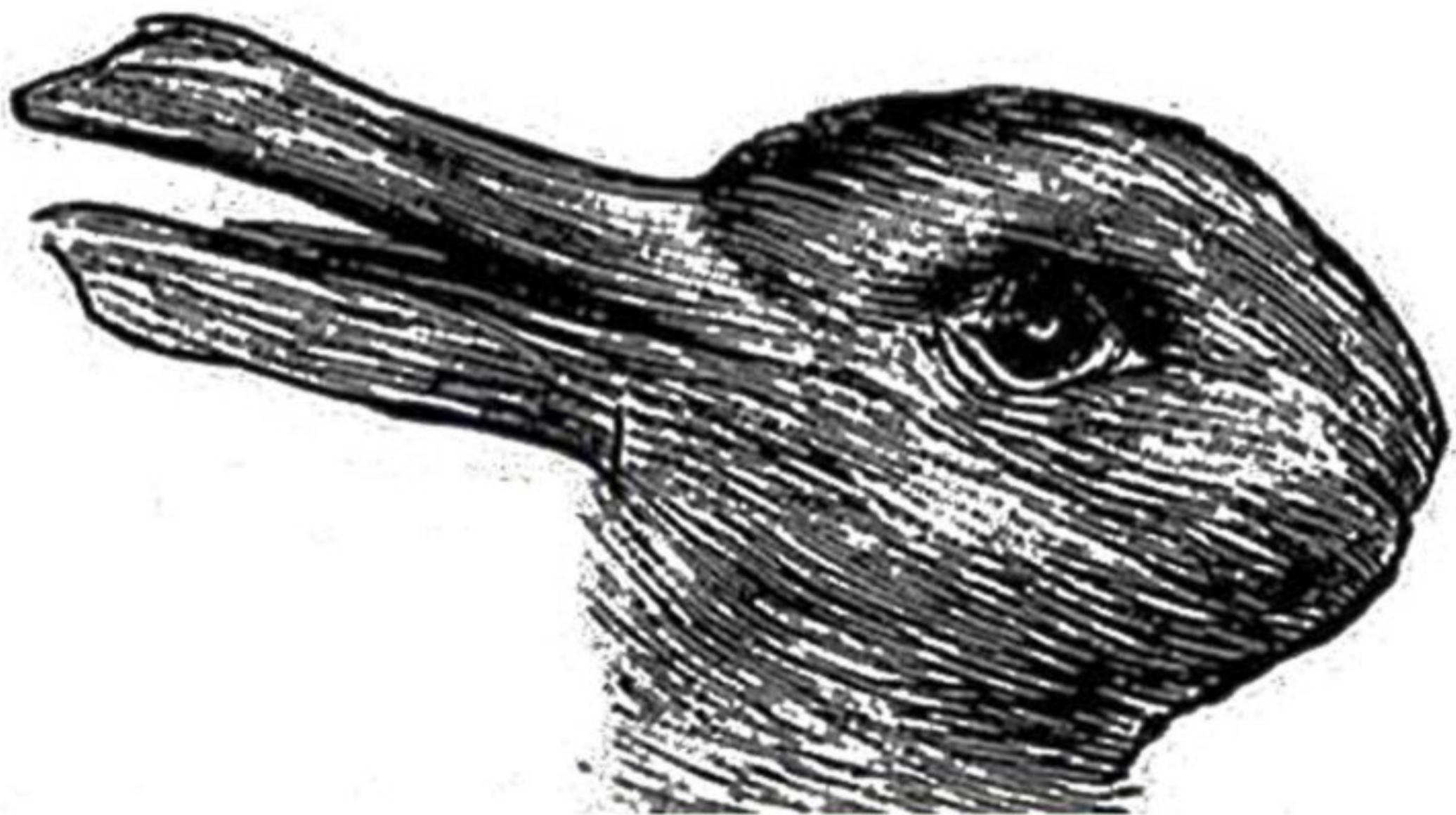
$$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ joules} \times \text{secondes}$$



Physique quantique

Ancien Testament (avant 1925)

- L'atomisme a conquis les esprits ... pour le moment
- La théorie des quanta trace (difficilement) son chemin, la physique classique tient bon
- Le mystérieux statut de la lumière



Physique quantique

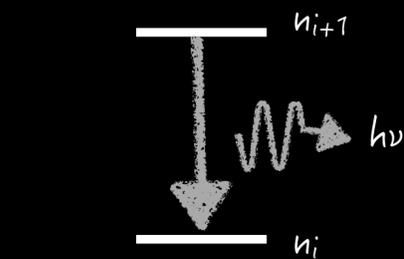
Ancien Testament (avant 1925)

- L'atomisme a conquis les esprits ... pour le moment
- La théorie des quanta trace (difficilement) son chemin, la physique classique tient bon
- Le mystérieux statut de la lumière
- L'absurde atome quantique

L'atome quantique

Bohr

émission spontanée



Série de Paschen
(infrarouge)

$n=5$

$n=4$

$n=3$

$n=2$

$n=1$

Série de Lyman
(ultraviolet)

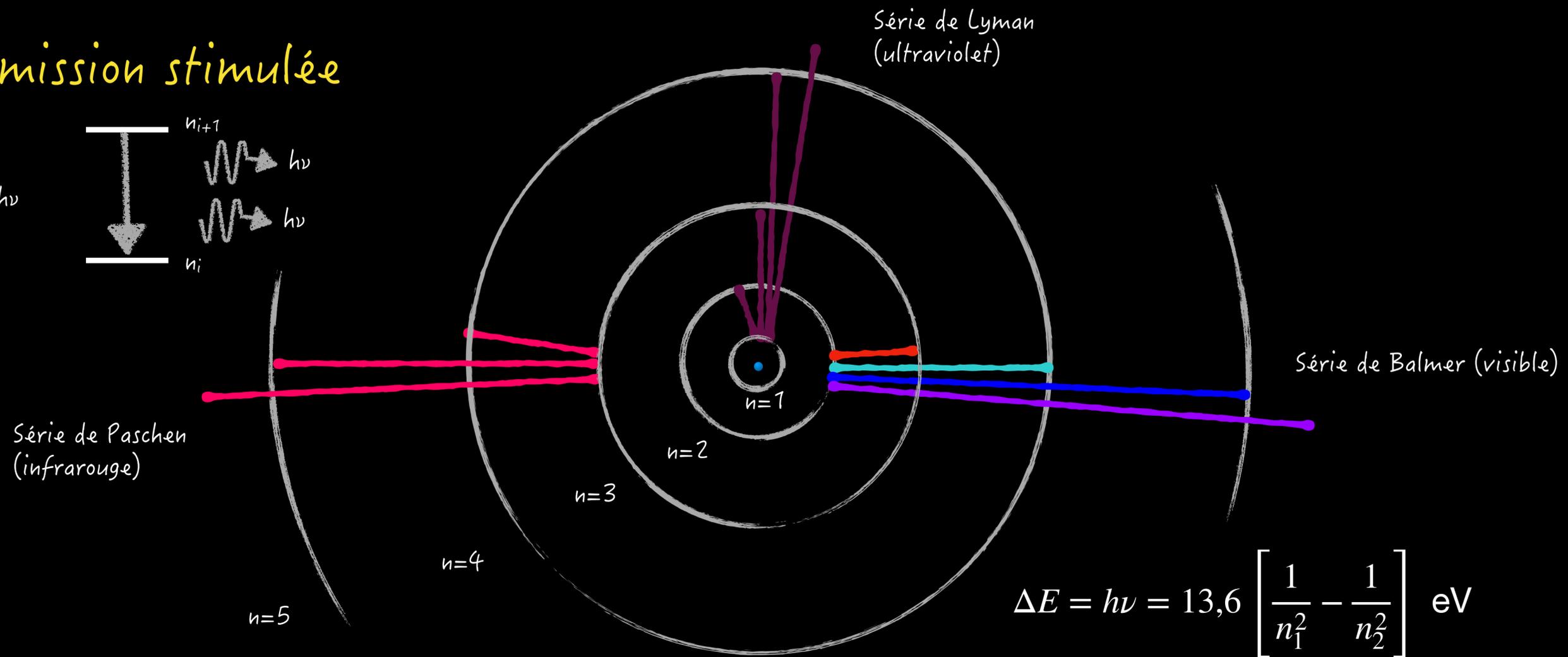
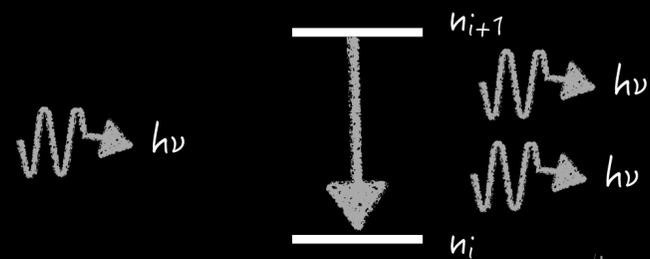
Série de Balmer (visible)

$$\Delta E = h\nu = 13,6 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right] \text{ eV}$$

L'atome quantique

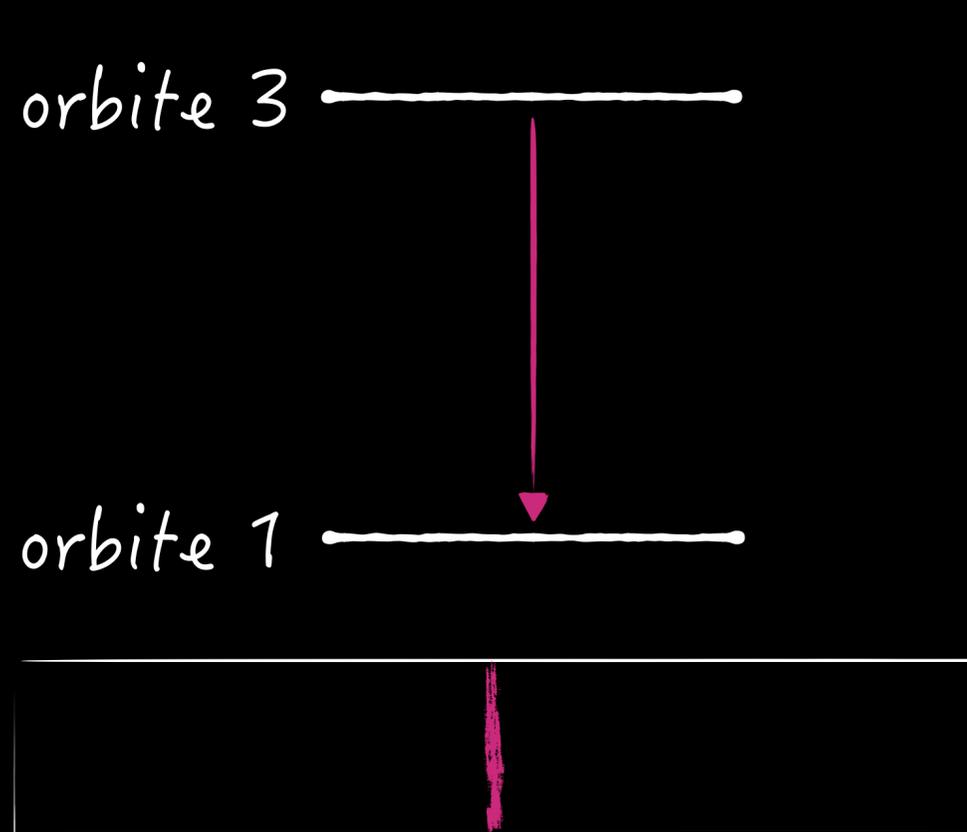
Bohr

émission stimulée

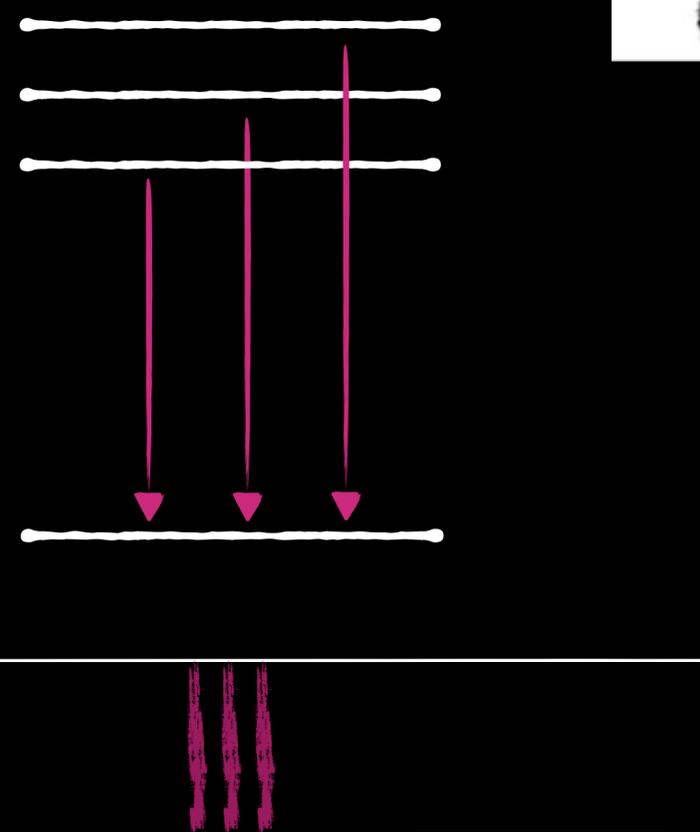


L'atome quantique

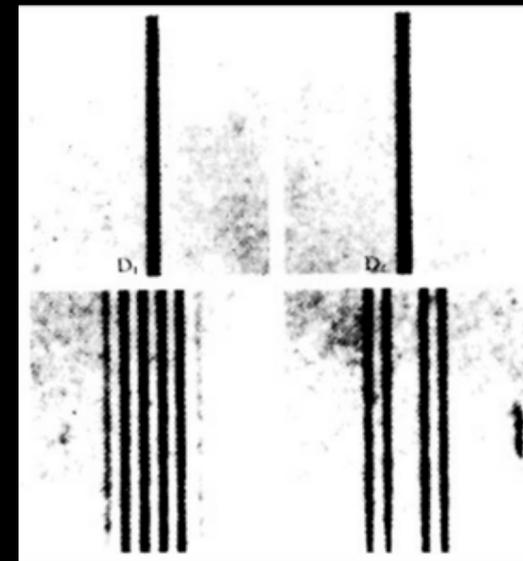
Effet Zeeman (normal)



sans champ magnétique



Avec champ magnétique

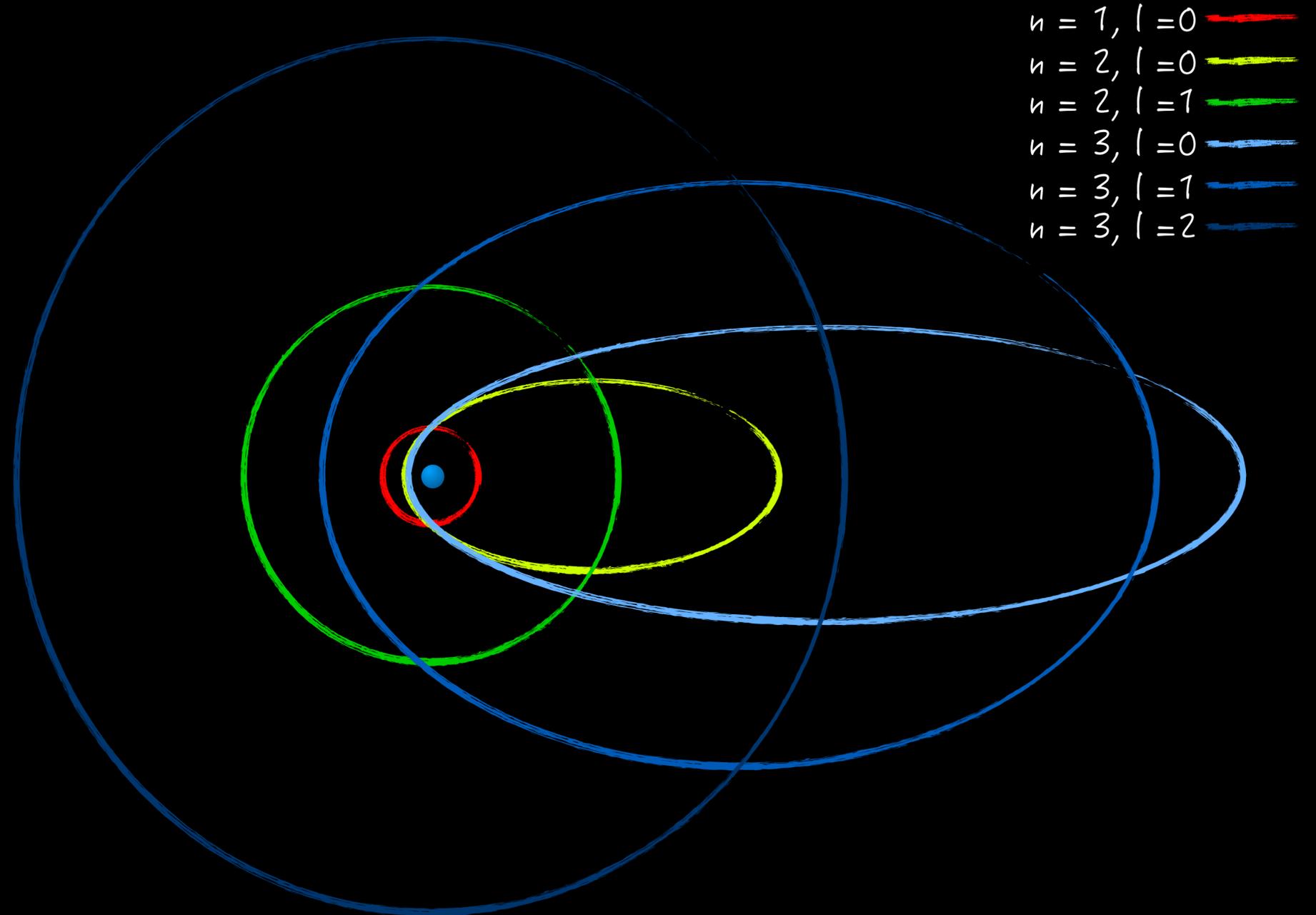


L'atome quantique

Bohr-Sommerfeld

3 nombres quantiques :

- taille ($n = 0, 1, 2, \dots$)
- forme ($l = 0, 1, \dots, n-1$)
- orientation ($m = -l, \dots, +l$)



De l'atome antique à l'atome quantique

La nature insolite de l'univers quantique

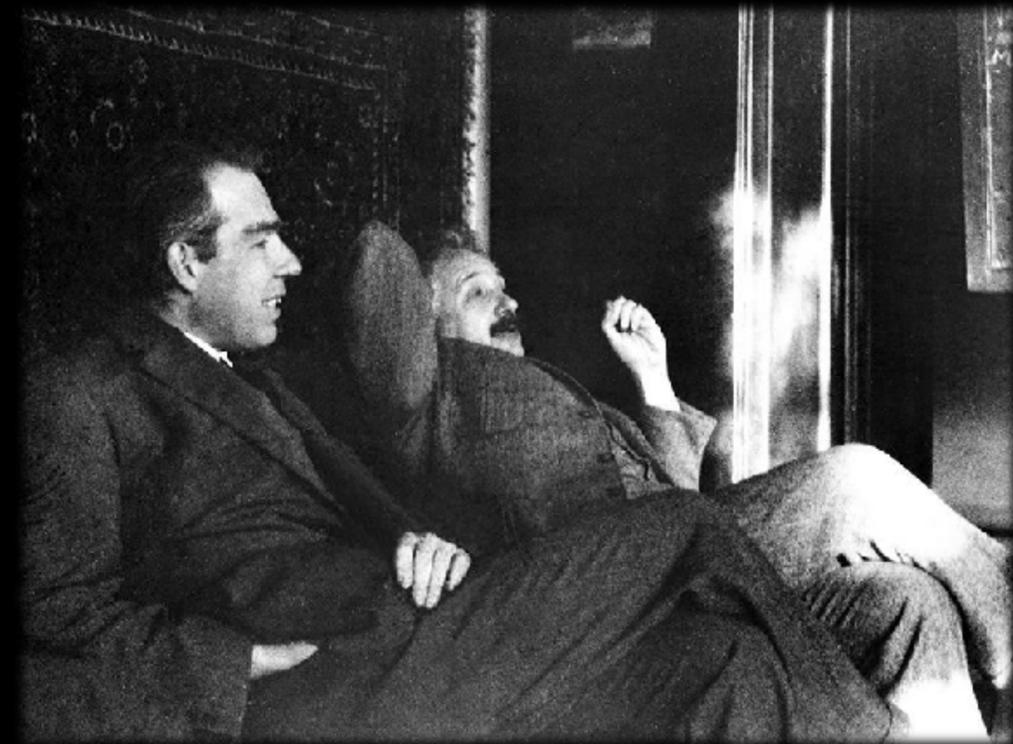
1. Il moto è come nullo, Galileo Galilei, 1610
2. Fiat quantum et photon fuit, Albert Einstein, 1905
3. Gott würfelt nicht, Albert Einstein vs Niels Bohr, 1927
4. Le jeu de Bell, Alain Aspect, 1982
5. La masse est dite ! CERN, 2012

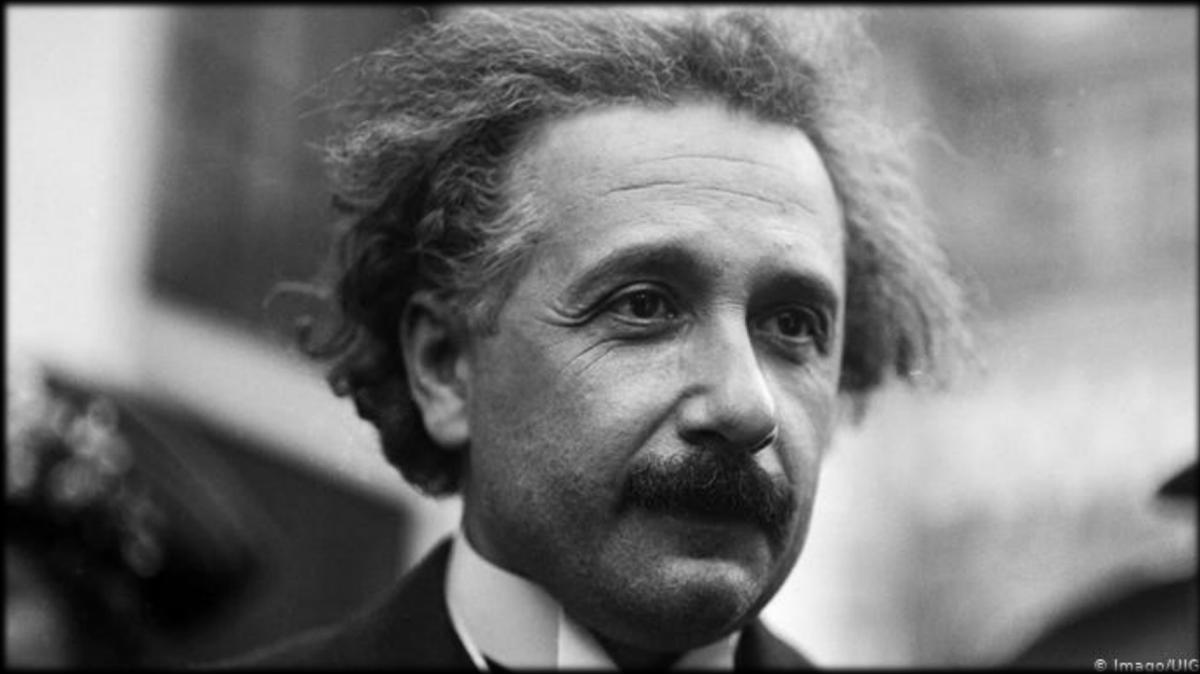
De l'atome antique à l'atome quantique

Epoque 3

Gott würfelt nicht

Albert Einstein vs Niels Bohr, 1927





1921 - P

Einstein & Bohr



1922 - P



Physique quantique

Ancien Testament (avant 1925)

- L'atomisme a conquis les esprits ... pour le moment
- La théorie des quanta trace (difficilement) son chemin, la physique classique tient bon
- Le mystérieux statut de la lumière
- L'absurde atome quantique

« Un lamentable pot pourri d'hypothèses, de principes de théorèmes et de recettes de calcul plutôt qu'une théorie logique et cohérente »

Wolfgang Pauli

Physique quantique

Knabenphysik : le nouveau testament

Halte au bricolage : concepts quantiques + physique classique

- Wolfgang Pauli
- Werner Heisenberg
- Max Born
- Erwin Schrödinger
- Paul Adrien Maurice Dirac
- Louis de Broglie
- ... et d'autres

Wolfgang Pauli (1900-1958)



Gottes Geissel

- 1921 :
 - Article de synthèse sur la Relativité (Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften)
 - Thèse de Doctorat : met en défaut l'atome de Bohr appliqué à H_2 ionisé 1^+

Wolfgang Pauli (1900-1958)



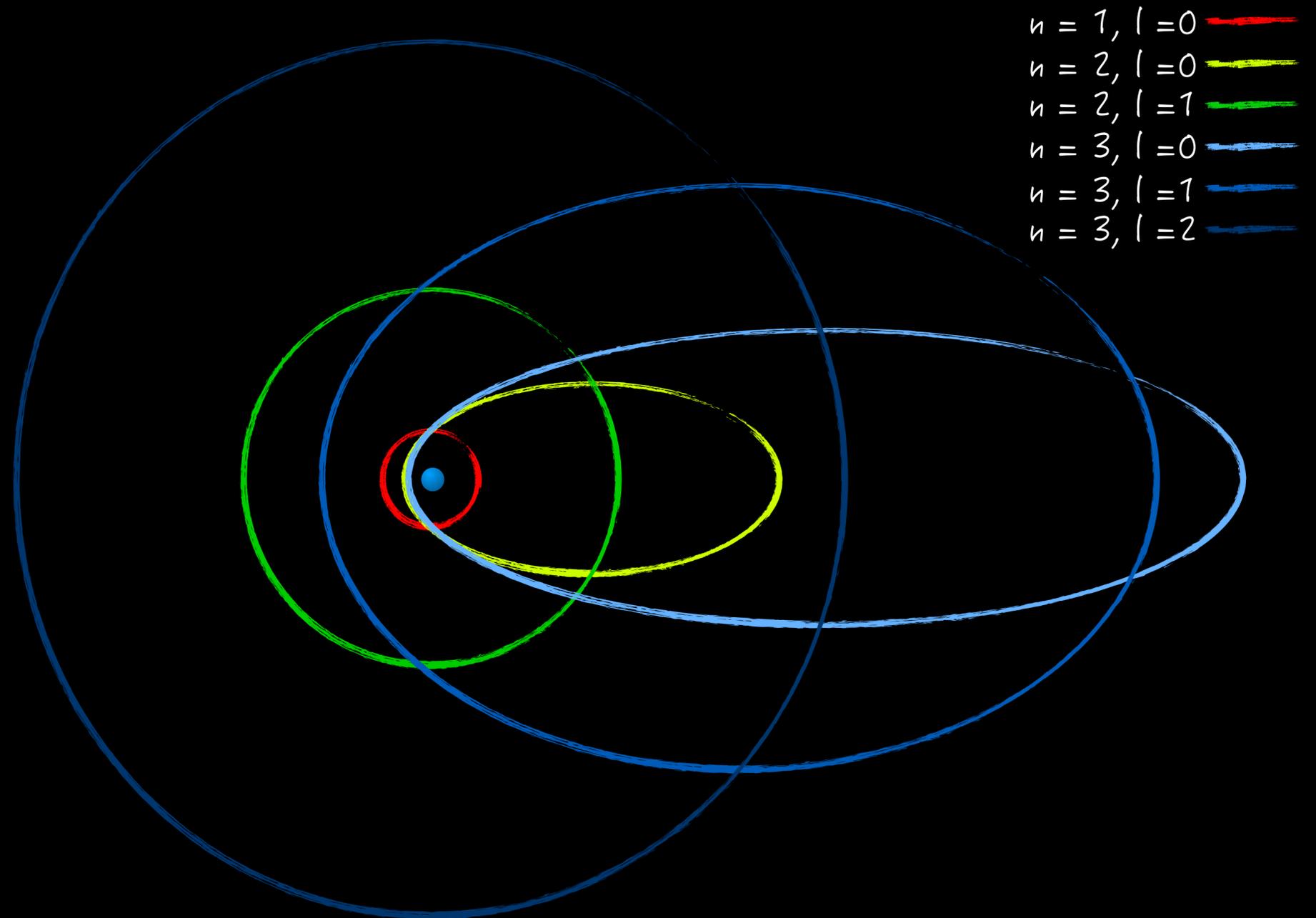
Gottes Geissel

- 1921 :
 - Article de synthèse sur la Relativité (Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften)
 - Thèse de Doctorat : met en défaut l'atome de Bohr appliqué à H_2 ionisé 1^+
- 1923 :
 - Un quatrième nombre quantique ambivalent (Zweideutigkeit)

Wolfgang Pauli

4 nombres quantiques :

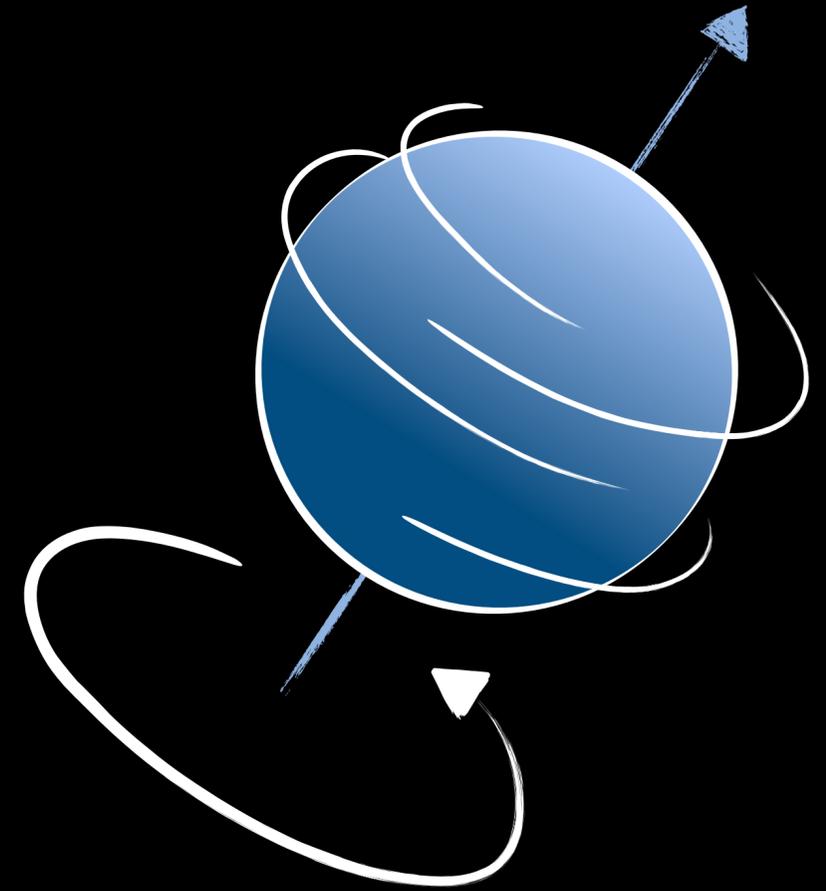
- taille ($n = 0, 1, 2, \dots$)
- forme ($l = 0, 1, \dots, n-1$)
- orientation ($m = -l, \dots, +l$)
- Ambivalence



Spin

Samuel Goodsmiit et George Uhlenbeck

- Ambivalence = propriété intrinsèque de l'électron (spin)
- $S = +\hbar/2$ ou $-\hbar/2$
- Effet magnétorésistif géant, Albert Fert



Wolfgang Pauli

Gottes Geissel

- 1921 :
 - Article de synthèse sur la Relativité (Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften)
 - Thèse de Doctorat : met en défaut l'atome due Bohr appliqué à H_2 ionisé 1^+
- 1923 :
 - Un quatrième nombre quantique ambivalent (Zweideutigkeit)
- 1925 :
 - Principe d'exclusion

Wolfgang Pauli

Principe d'exclusion

- Les électrons appartenant à un même atome ne peuvent pas se trouver simultanément dans un même état quantique
- Les fermions :
 - particules de spin demi-entier,
 - assujetties au principe d'exclusion (2 particules indiscernables ne peuvent occuper simultanément un même état quantique)
- Conséquences en astrophysique

Wolfgang Pauli

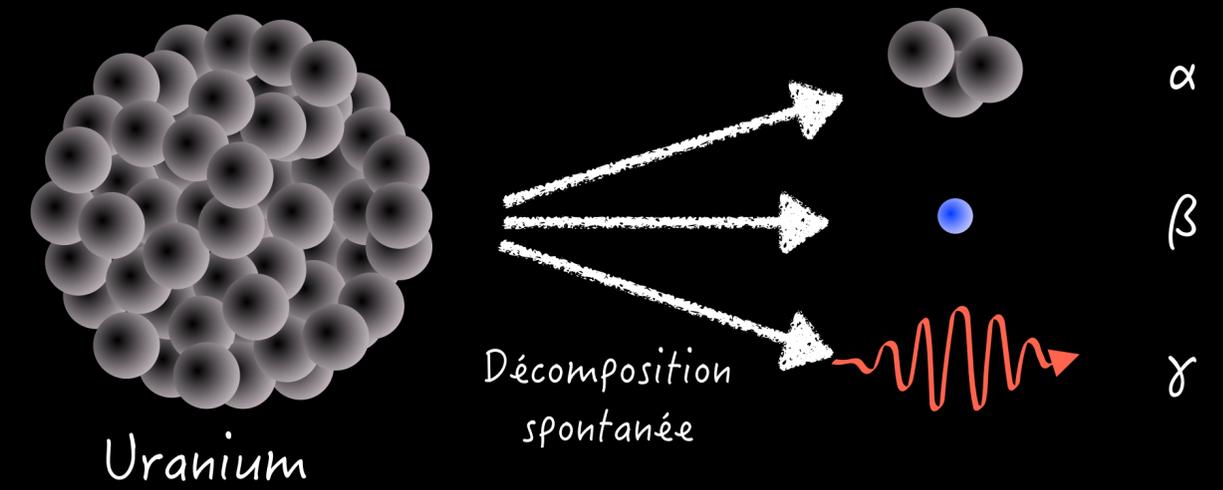
Gottes Geissel

- 1921 :
 - Article de synthèse sur la Relativité (Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften)
 - Thèse de Doctorat : met en défaut l'atome due Bohr appliqué à H_2 ionisé 1^+
- 1923 : Un quatrième nombre quantique ambivalent (Zweideutigkeit)
- 1925 : Principe d'exclusion  1945 - P
- 1930 : Invente le neutrino

Wolfgang Pauli

Neutrino

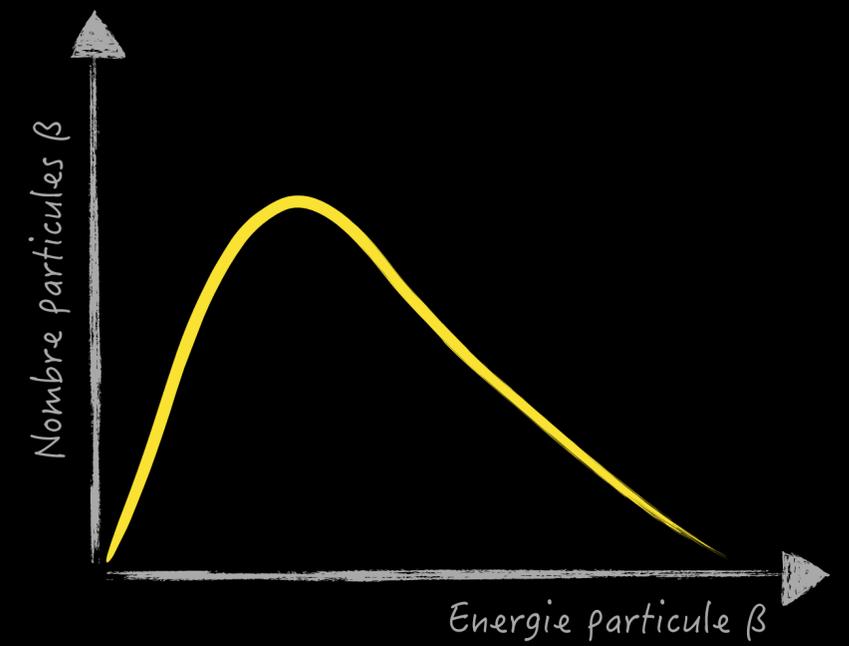
- 1896-1902 : Radioactivité β : $X_i \rightarrow X_f + \text{électron}$



Wolfgang Pauli

Neutrino

- 1896-1902 : Radioactivité β : $X_i \rightarrow X_f + \text{électron}$
- 1914 : $M(X_i) - M(X_f) > E(\text{électron})$!!!



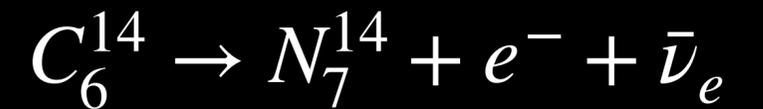
Wolfgang Pauli

Neutrino

- 1896-1902 : Radioactivité β : $X_i \rightarrow X_f + \text{électron}$
- 1914 : $M(X_i) - M(X_f) > E(\text{électron})$
- 1930 : Pauli invente une particule neutre, légère et de faible interaction (le neutron ?)

Wolfgang Pauli

Neutrino



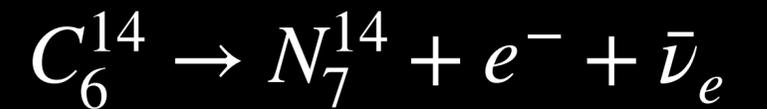
Mesdames et messieurs les radioactifs,

Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le messenger de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la mauvaise statistique des noyaux N et Li-6 et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons par ce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle neutrons. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeurs que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0,01 de la masse du proton. Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante ...

J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable, car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagne, et le gravité de la situation, due à la nature continue des spectres, est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, Monsieur Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts ». Dorénavant on doit discuter sérieusement toute voie d'issue ...

Wolfgang Pauli

Neutrino



Mesdames et messieurs les radioactifs,

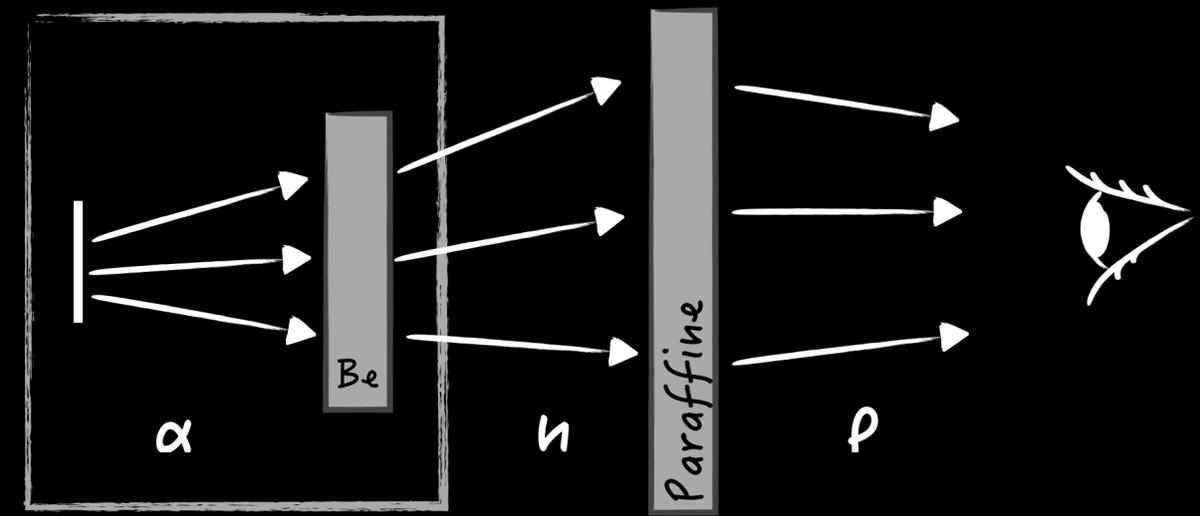
Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le messenger de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la mauvaise statistique des noyaux N et Li-6 et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons par ce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle neutrons. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeurs que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0,01 de la masse du proton. Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante ...

J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable, car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagne, et le gravité de la situation, due à la nature continue des spectres, est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, Monsieur Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts ». Dorénavant on doit discuter sérieusement toute voie d'issue ...

Wolfgang Pauli

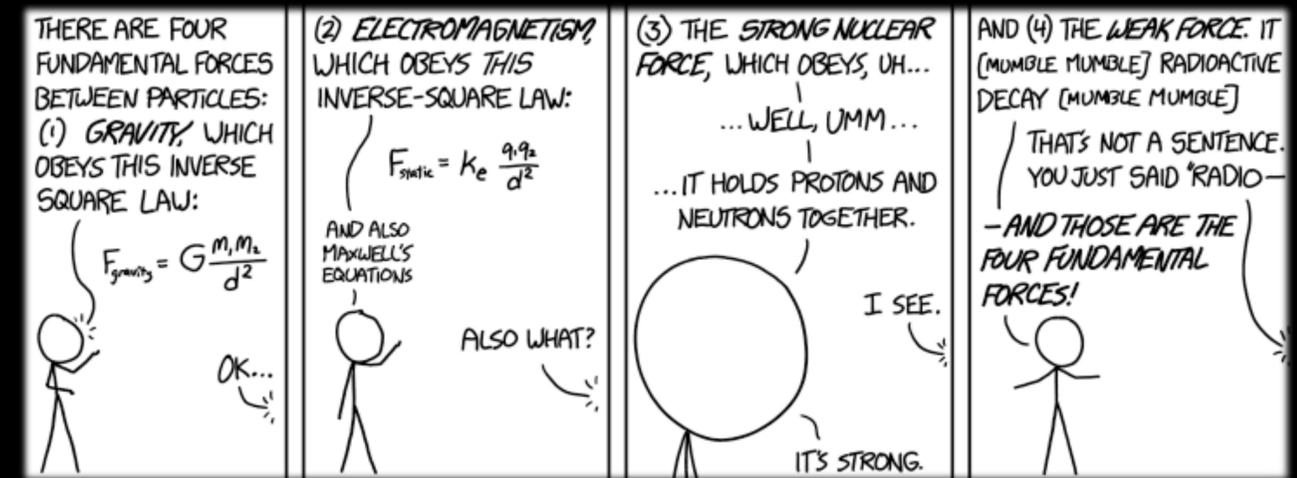
Neutrino

- 1896-1902 : Radioactivité β : $X_i \rightarrow X_f + \text{électron}$
- 1914 : $M(X_i) - M(X_f) > E(\text{électron})$
- 1930 : Pauli invente une particule neutre, légère et de faible interaction (le neutron ?)
- 1932 : Chadwick découvre le neutron  1935 - P



Wolfgang Pauli

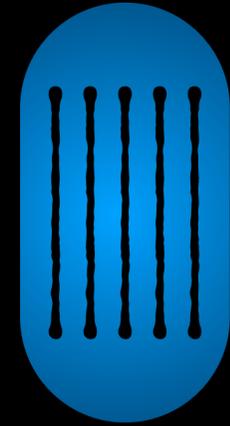
Neutrino



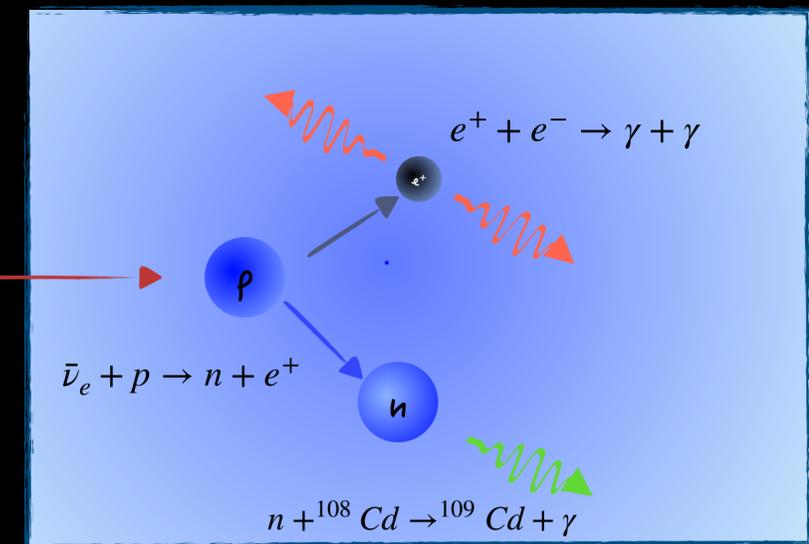
- 1896-1902 : Radioactivité β : $X_i \rightarrow X_f + \text{électron}$
- 1914 : $M(X_i) - M(X_f) > E(\text{électron})$
- 1930 : Pauli invente une particule neutre, légère et de faible interaction (le neutron ?)
- 1932 : Chadwick découvre le neutron
- 1933 : Enrico Fermi lui donne son nom et théorise l'interaction faible

Wolfgang Pauli

Neutrino



$\bar{\nu}_e$



- 1896-1902 : Radioactivité β : $X_i \rightarrow X_f + \text{électron}$
- 1914 : $M(X_i) - M(X_f) > E(\text{électron})$
- 1930 : Pauli invente une particule neutre, légère et de faible interaction (le neutron ?)
- 1932 : Chadwick découvre le neutron
- 1933 : Enrico Fermi lui donne son nom et théorise l'interaction faible
- 1956 : Mise en évidence par Frederik Reines et Clyde Cowan



1995 - P

Wolfgang Pauli

Gottes Geissel

- 1921 :
 - Article de synthèse sur la Relativité (Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften)
 - Thèse de Doctorat : met en défaut l'atome due Bohr appliqué à H_2 ionisé 1^+
- 1923 : Un quatrième nombre quantique ambivalent (Zweideutigkeit)
- 1925 : Principe d'exclusion
- 1930 : Invente le neutrino

Werner Heisenberg (1901-1976)



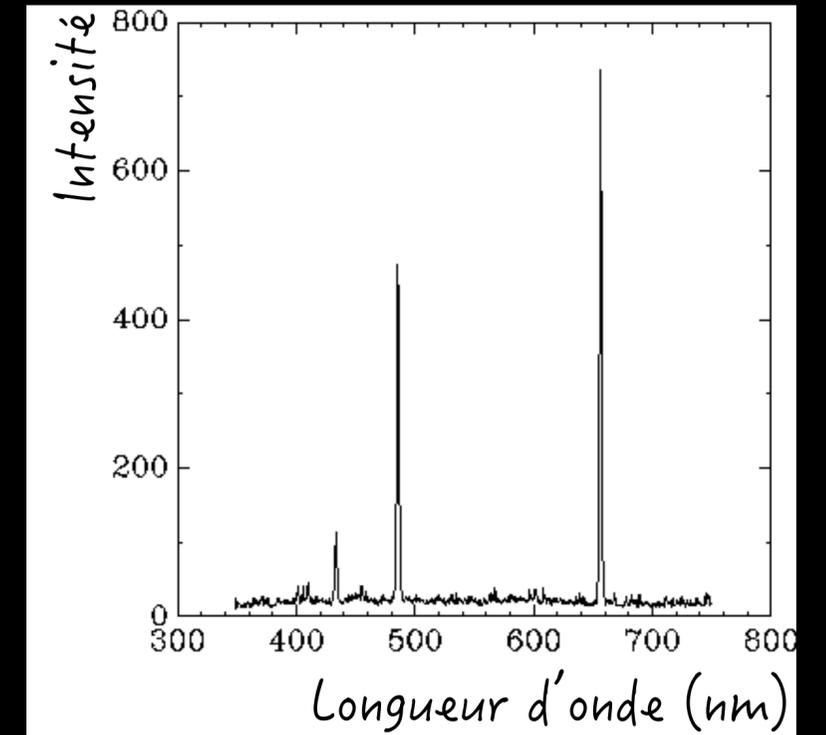
- 1920 : auditeur chez Arnold Sommerfeld à Munich, rencontre Wolfgang Pauli
- 1922 : rencontre Bohr
- 1923 : études de physique en 3 ans, thèse
- 1924 : assistant de Max Born à Göttingen, lecteur à Copenhague chez Niels Bohr



- 1927 : professeur d'université à Leipzig

Werner Heisenberg

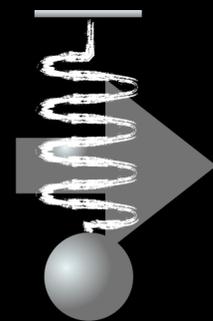
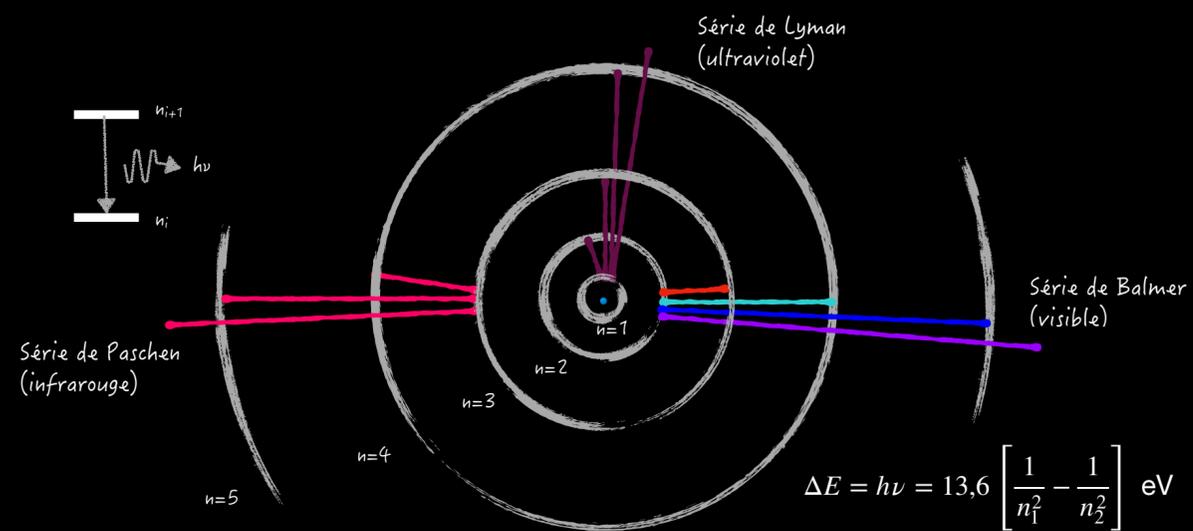
1925 : les fondements de la mécanique quantique (matricielle)



- Description mathématique abstraite des orbites de Bohr et des mystérieux sauts quantiques
- Plus besoin de visualiser l'atome
- Position p et quantité de mouvement q de l'électron remplacé par des matrices

Werner Heisenberg

1925 : les fondements de la mécanique quantique (matricielle)



$$\begin{pmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m,1} & p_{m,2} & \cdots & p_{m,n} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & \cdots & q_{1,n} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & \cdots & q_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_{m,1} & q_{m,2} & \cdots & q_{m,n} \end{pmatrix}$$

Werner Heisenberg

1925 : les fondements de la mécanique quantique (matricielle)

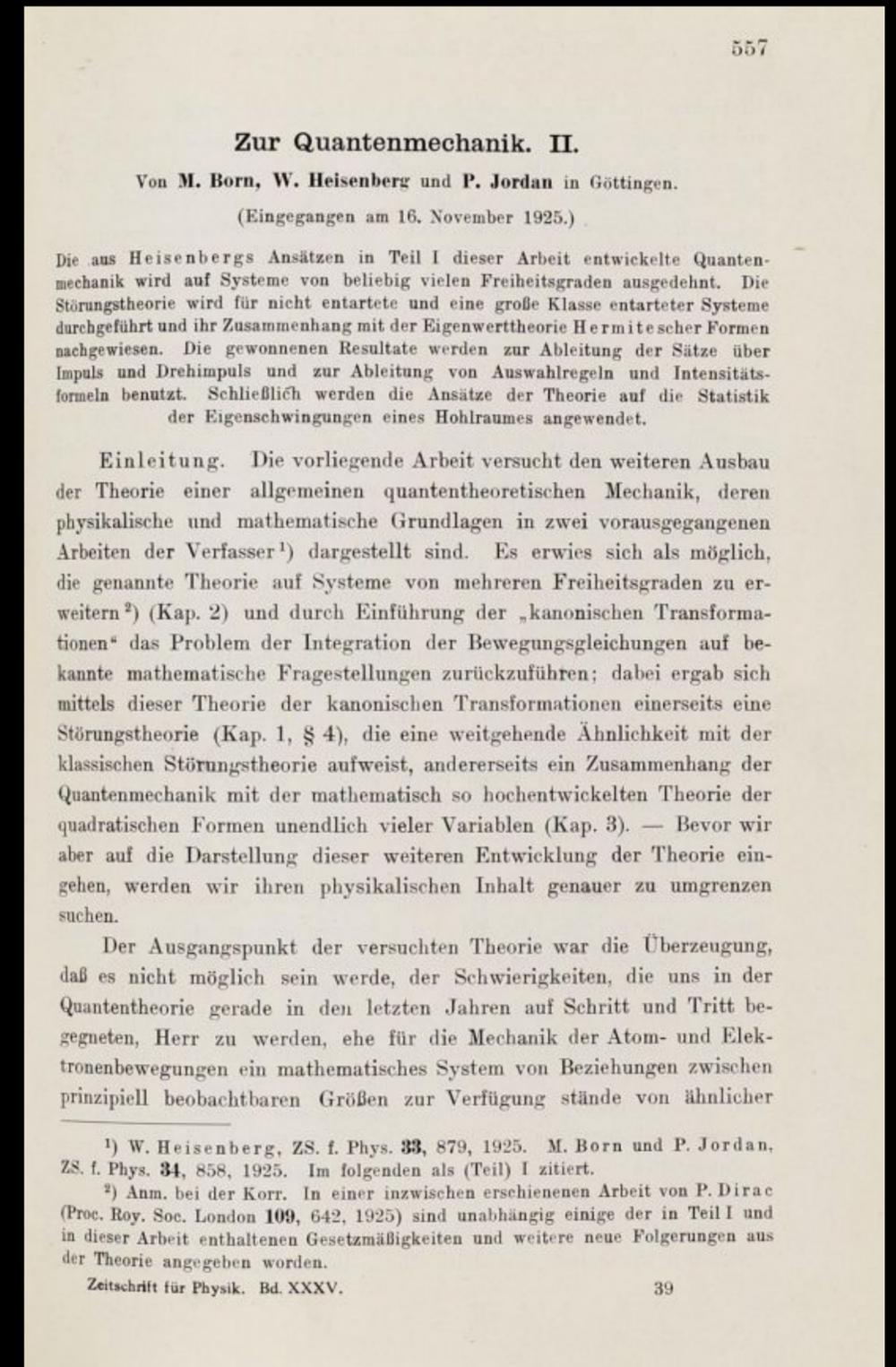
- Description mathématique abstraite des orbites de Bohr et des mystérieux sauts quantiques
- Position p et quantité de mouvement q de l'électron remplacé par des matrices
- Plus besoin de visualiser l'atome
- Calcule états quantiques de l'atome et les amplitudes de transition entre états

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} I$$

La Mécanique quantique

Dreimännerarbeit, 1925

- Max Born  1954 - P, Pascual Jordan, Werner Heisenberg
- Ça marche pour l'He
- Einstein & Schrödinger 
- Dirac 



Zeitschrift für Physik. Vol. 35, pp.557-615

Paul Adrien Maurice Dirac 1933 - P

Mécanique Quantique

- Ingénieur à 19 ans, Licencié en Mathématiques à 21 ans
- 1925 : Thésard à Cambridge
 - Rencontre Bohr et Heisenberg
 - Elabore Les Equations de la Mécanique Quantique

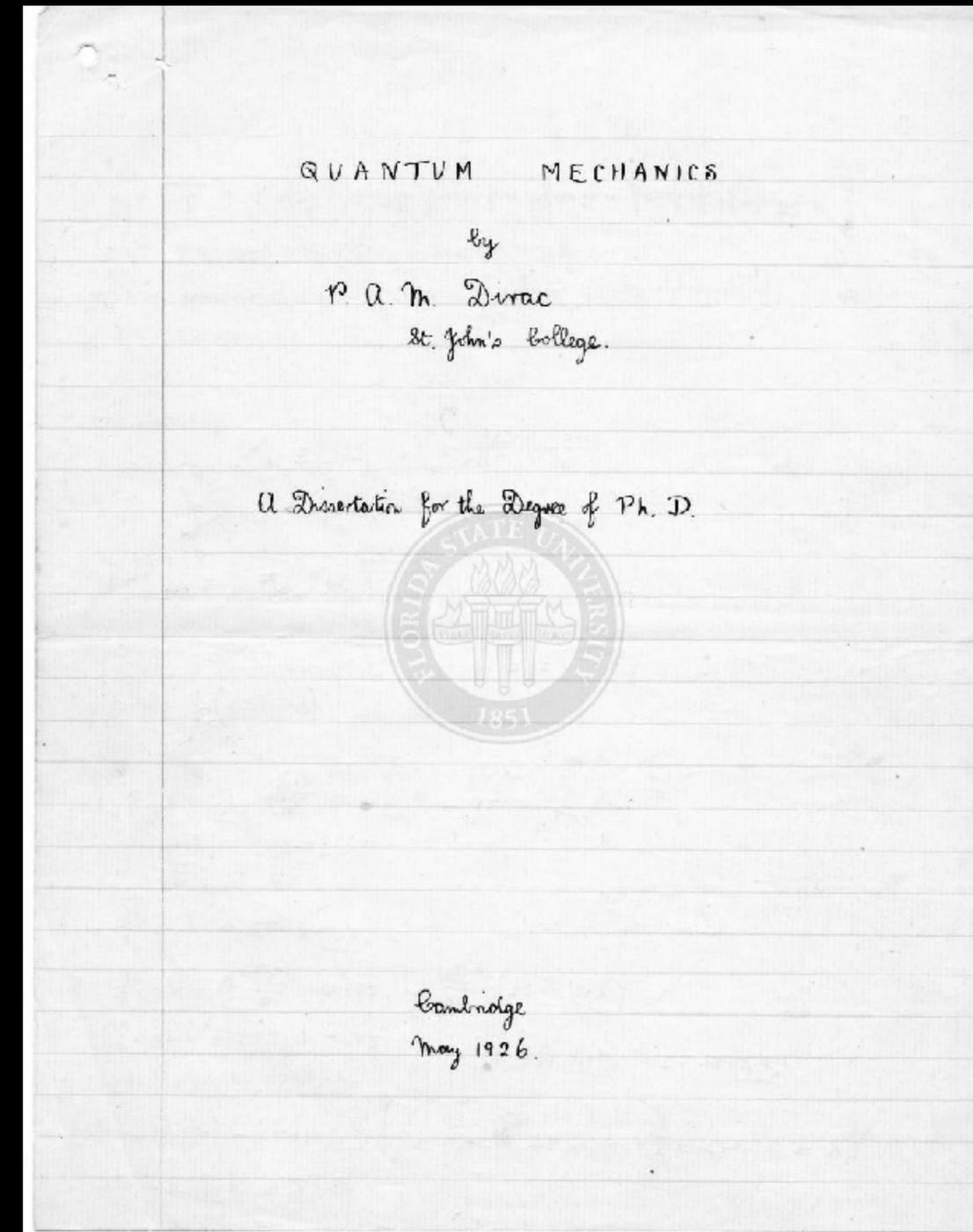
$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} I$$

Paul Adrien Maurice Dirac



Mécanique Quantique

- Ingénieur à 19 ans, Licencié en Mathématiques à 21 ans
- 1925 : Thésard à Cambridge
 - Rencontre Bohr et Heisenberg
 - Elabore Les Equations de la Mécanique Quantique
- 1926 : Doctorat à 23 ans



La Mécanique ondulatoire

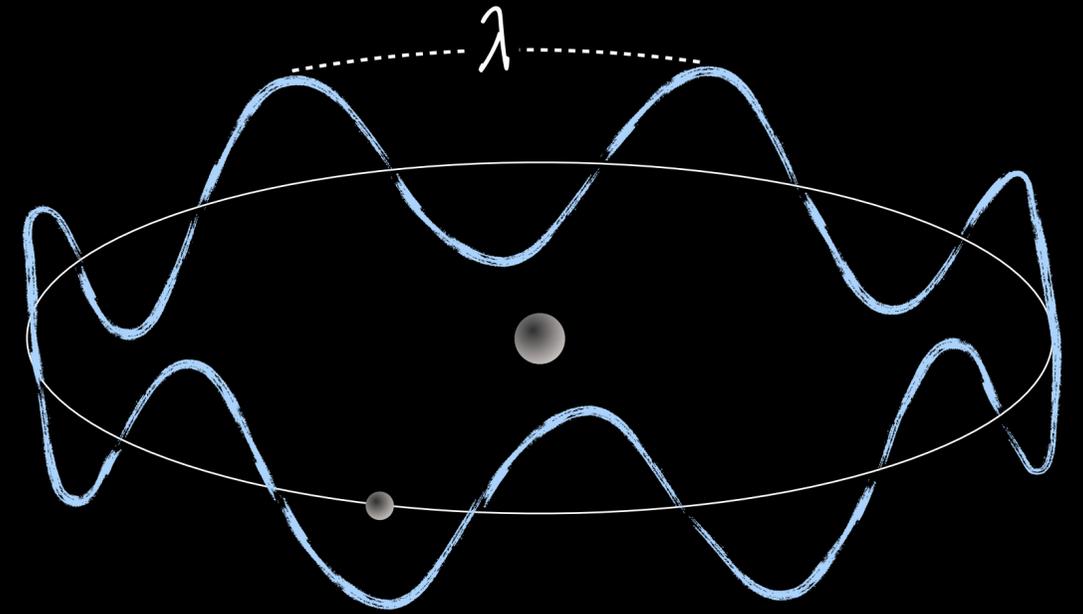
1923 : Louis de Broglie (1892-1987)



Après une longue réflexion dans la solitude, j'eus soudain l'idée que la découverte faite par Einstein en 1905 devrait être étendue à toutes les particules massives, y compris l'électron.

La Mécanique ondulatoire

1923 : Louis de Broglie (1892-1987)



$$2\pi r_n = n\lambda$$

- Une particule est aussi une onde
- L'onde pilote

La Mécanique ondulatoire

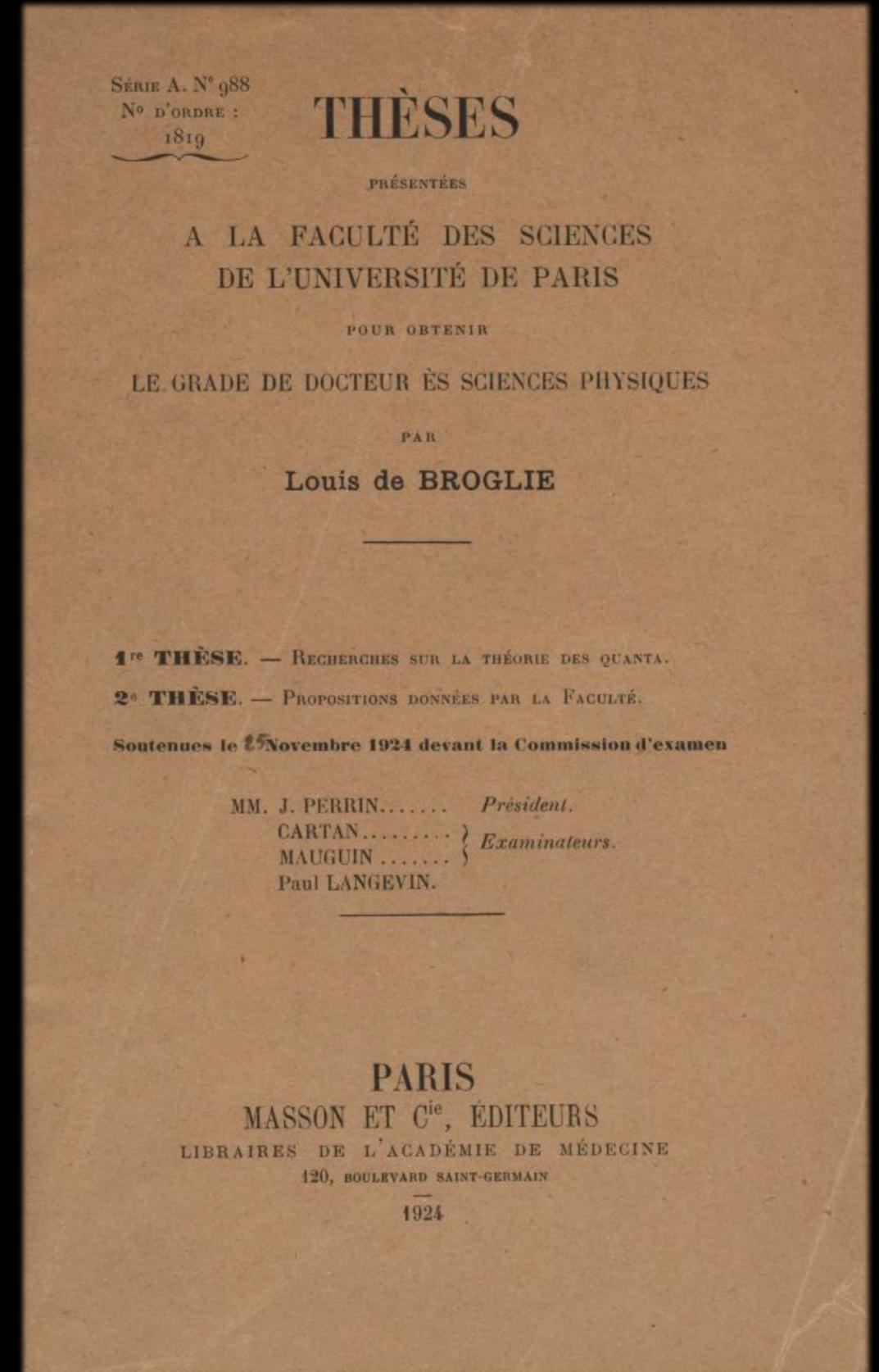
1923 : Louis de Broglie (1892-1987)



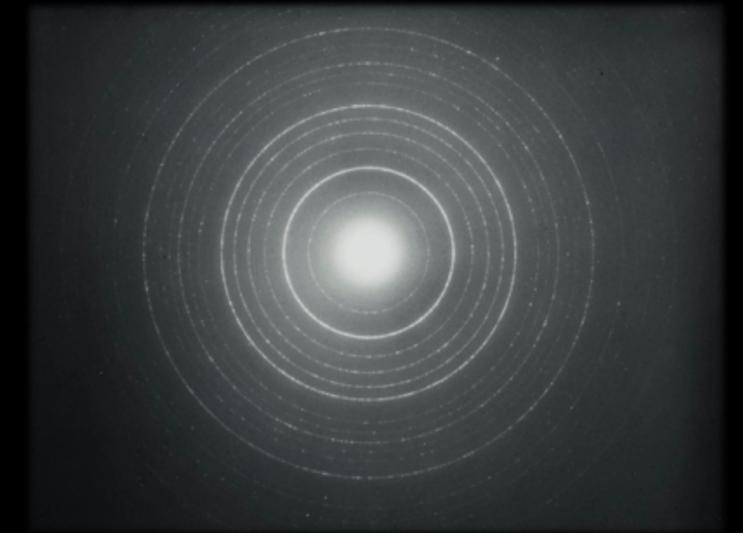
1929 - P

- Une particule est aussi une onde
- L'onde pilote

$$\nu = \frac{E}{h}$$
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v}$$



La Mécanique ondulatoire



- L'onde pilote
- Une particule est aussi une onde
- Clinton Davisson (1925), George Paget Thomson (1927)  1937 - P

diffraction des électrons, interprétation de Walter Elsasser

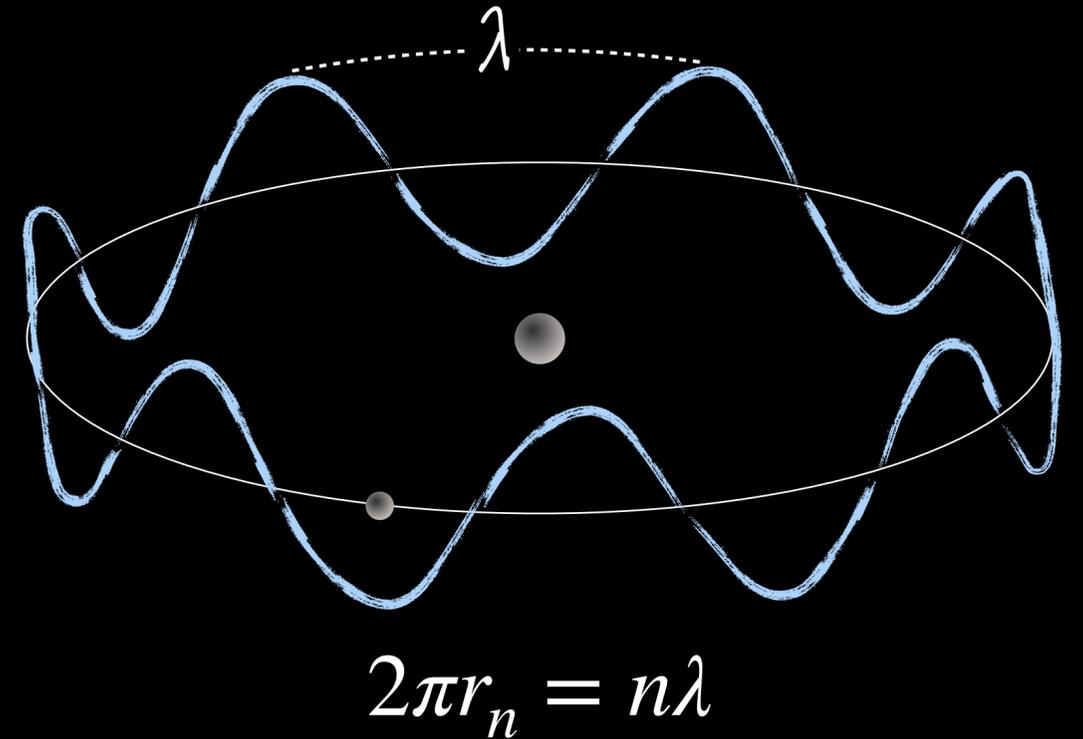
$$\nu = \frac{E}{h}$$
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v}$$

La Mécanique ondulatoire

1925 : Erwin Schrödinger (1887-1961)



- Système d'ondes associé à l'ensemble de toutes les particules du système



La Mécanique ondulatoire

1925 : Erwin Schrödinger (1887-1961)



1933 - P

- Une onde associée à l'ensemble de toutes les particules du système
- Son évolution dans le temps

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{x}, t)}{\partial t} = \left[\frac{\vec{p}^2}{2m} + V(\vec{x}, t) \right] \psi(\vec{x}, t)$$

3. Quantisierung als Eigenwertproblem; von E. Schrödinger.

(Erste Mitteilung.)

§ 1. In dieser Mitteilung möchte ich zunächst an dem einfachsten Fall des (nichtrelativistischen und ungestörten) Wasserstoffatoms zeigen, daß die übliche Quantisierungsvorschrift sich durch eine andere Forderung ersetzen läßt, in der kein Wort von „ganzen Zahlen“ mehr vorkommt. Vielmehr ergibt sich die Ganzzahligkeit auf dieselbe natürliche Art, wie etwa die Ganzzahligkeit der *Knotenanzahl* einer schwingenden Saite. Die neue Auffassung ist verallgemeinerungsfähig und rührt, wie ich glaube, sehr tief an das wahre Wesen der Quantenvorschriften.

Die übliche Form der letzteren knüpft an die Hamiltonsche partielle Differentialgleichung an:

$$(1) \quad H\left(q, \frac{\partial S}{\partial q}\right) = E.$$

Es wird von dieser Gleichung eine Lösung gesucht, welche sich darstellt als *Summe* von Funktionen je einer einzigen der unabhängigen Variablen q .

Wir führen nun für S eine neue unbekanntes ψ ein derart, daß ψ als ein *Produkt* von eingriffigen Funktionen der einzelnen Koordinaten erscheinen würde. D. h. wir setzen

$$(2) \quad S = K \lg \psi.$$

Die Konstante K muß aus dimensionellen Gründen eingeführt werden, sie hat die Dimension einer *Wirkung*. Damit erhält man

$$(1') \quad H\left(q, \frac{K}{\psi} \frac{\partial \psi}{\partial q}\right) = E.$$

Wir suchen nun *nicht* eine Lösung der Gleichung (1'), sondern wir stellen folgende Forderung. Gleichung (1') läßt sich bei Vernachlässigung der Massenveränderlichkeit stets, bei Berücksichtigung derselben wenigstens dann, wenn es sich um das *Ein*-elektronenproblem handelt, auf die Gestalt bringen: quadratische

La Mécanique classique

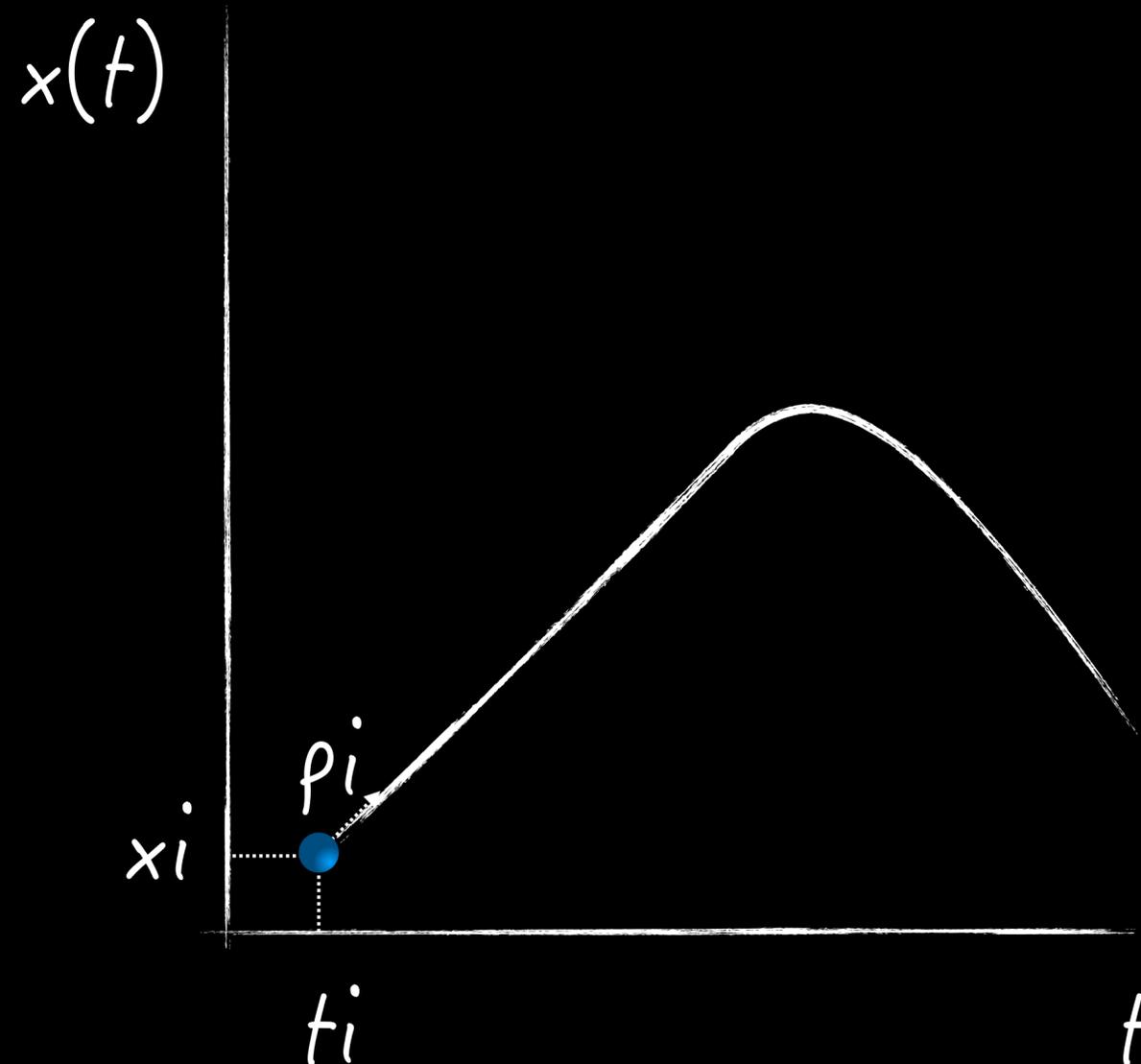
Corpuscule



- x, p

- Déterminisme classique :

$$x_i, p_i \rightarrow x(t), p(t)$$

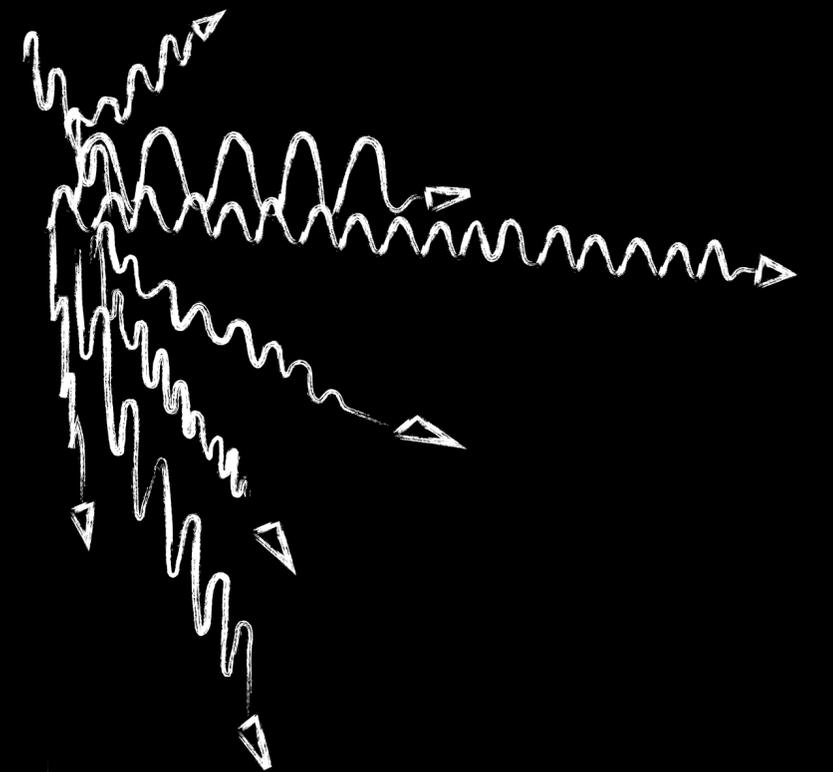
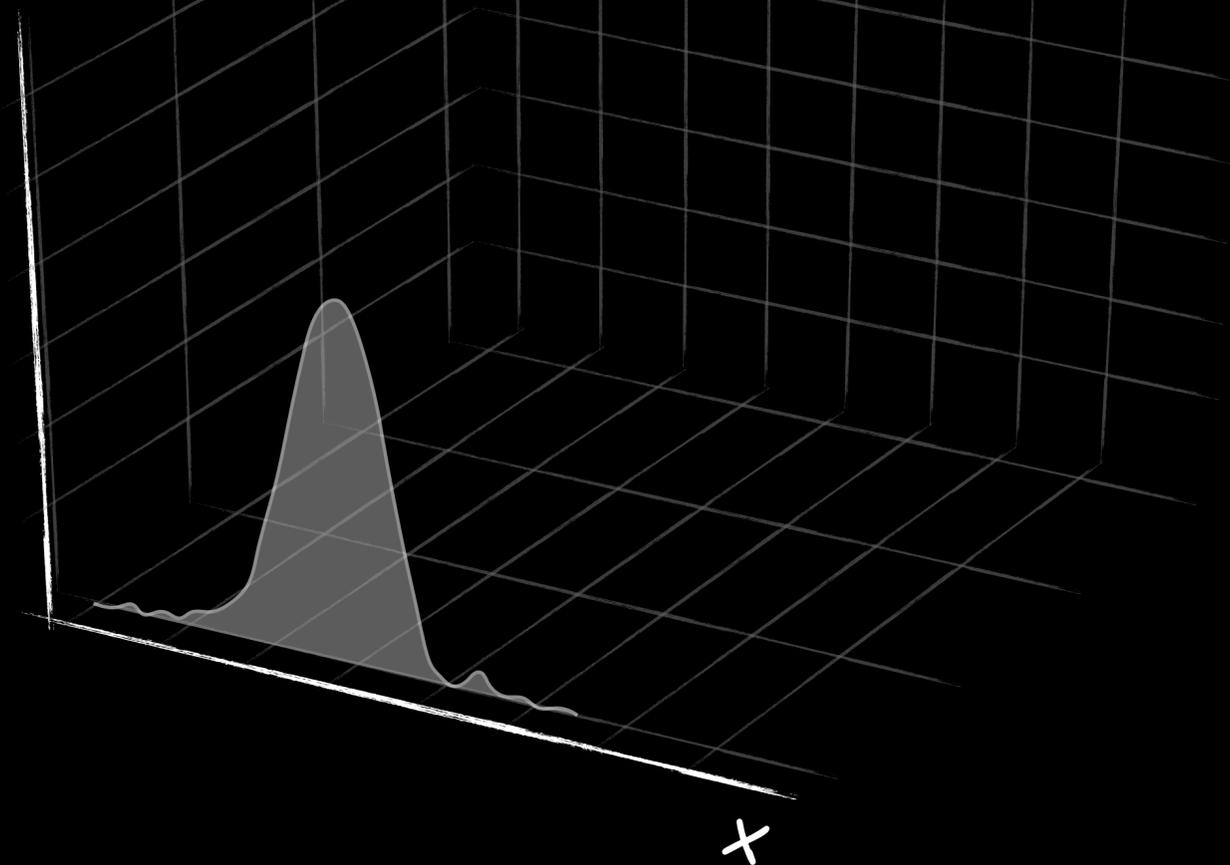


La Mécanique ondulatoire

1926 : Erwin Schrödinger

- La matière est faite d'ondes
- Densité de présence en x à l'instant t

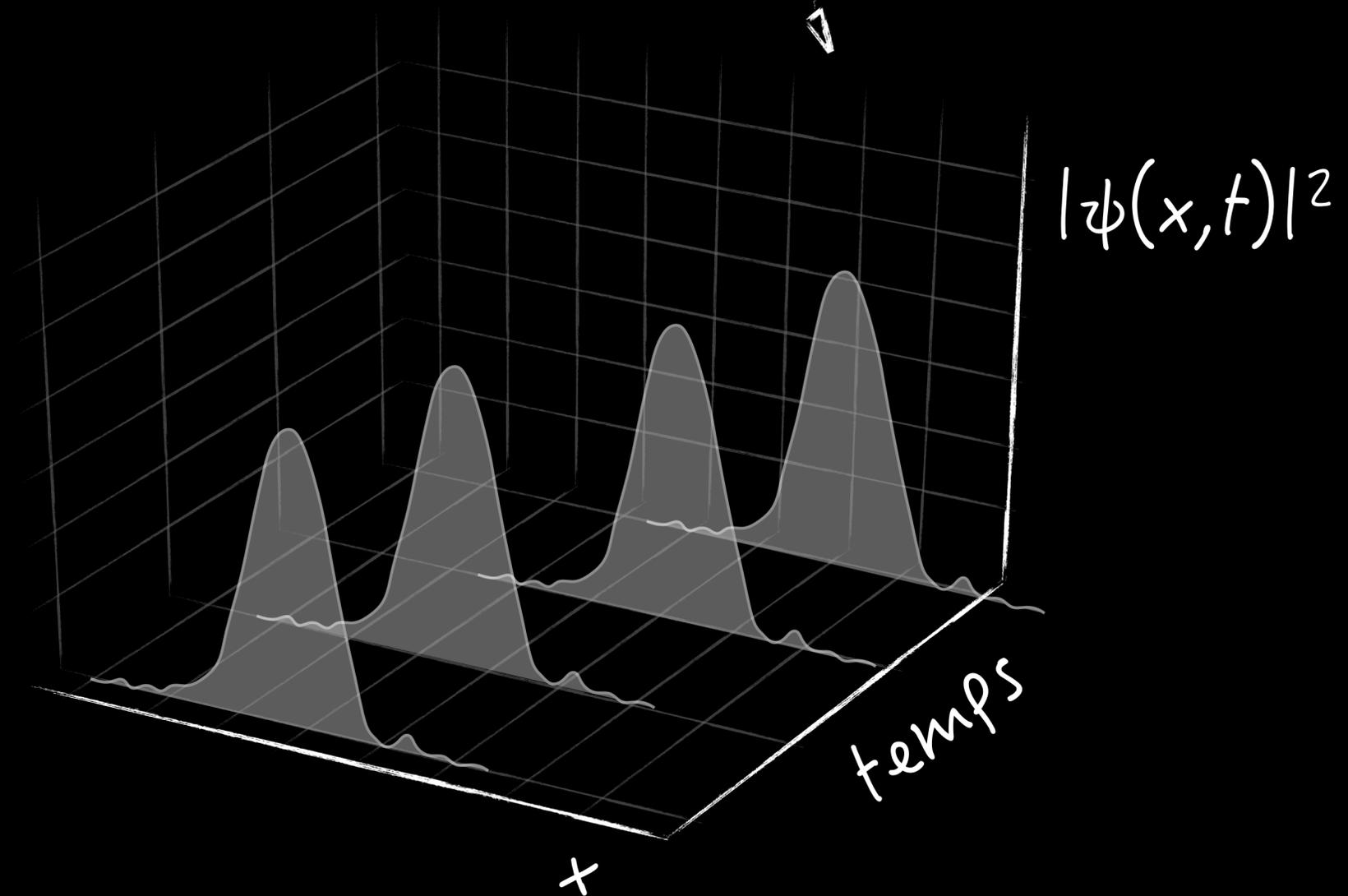
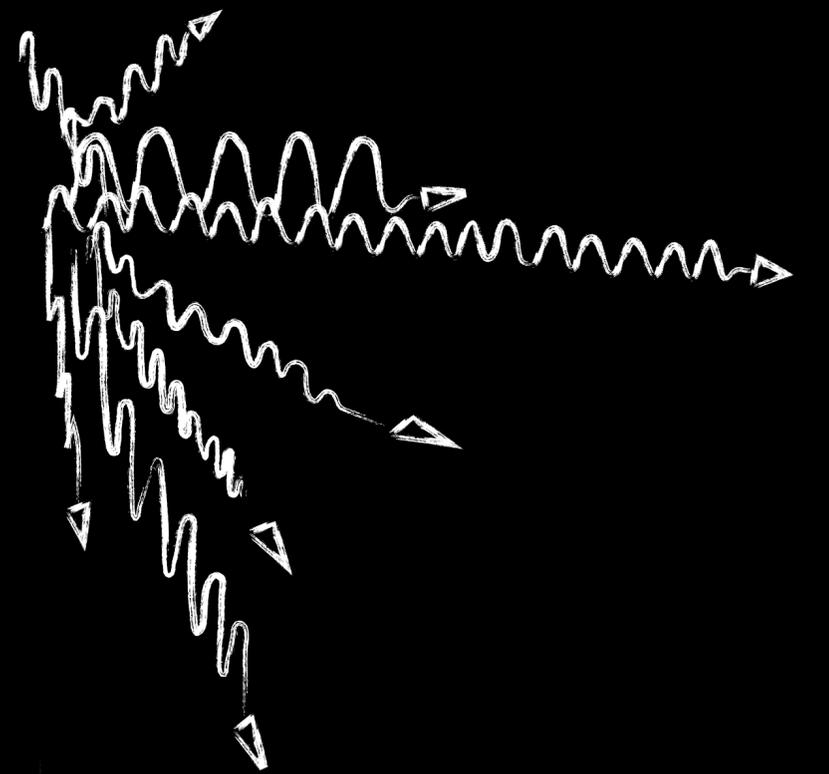
$$|\psi(x,t)|^2$$



La Mécanique ondulatoire

1926 : Erwin Schrödinger

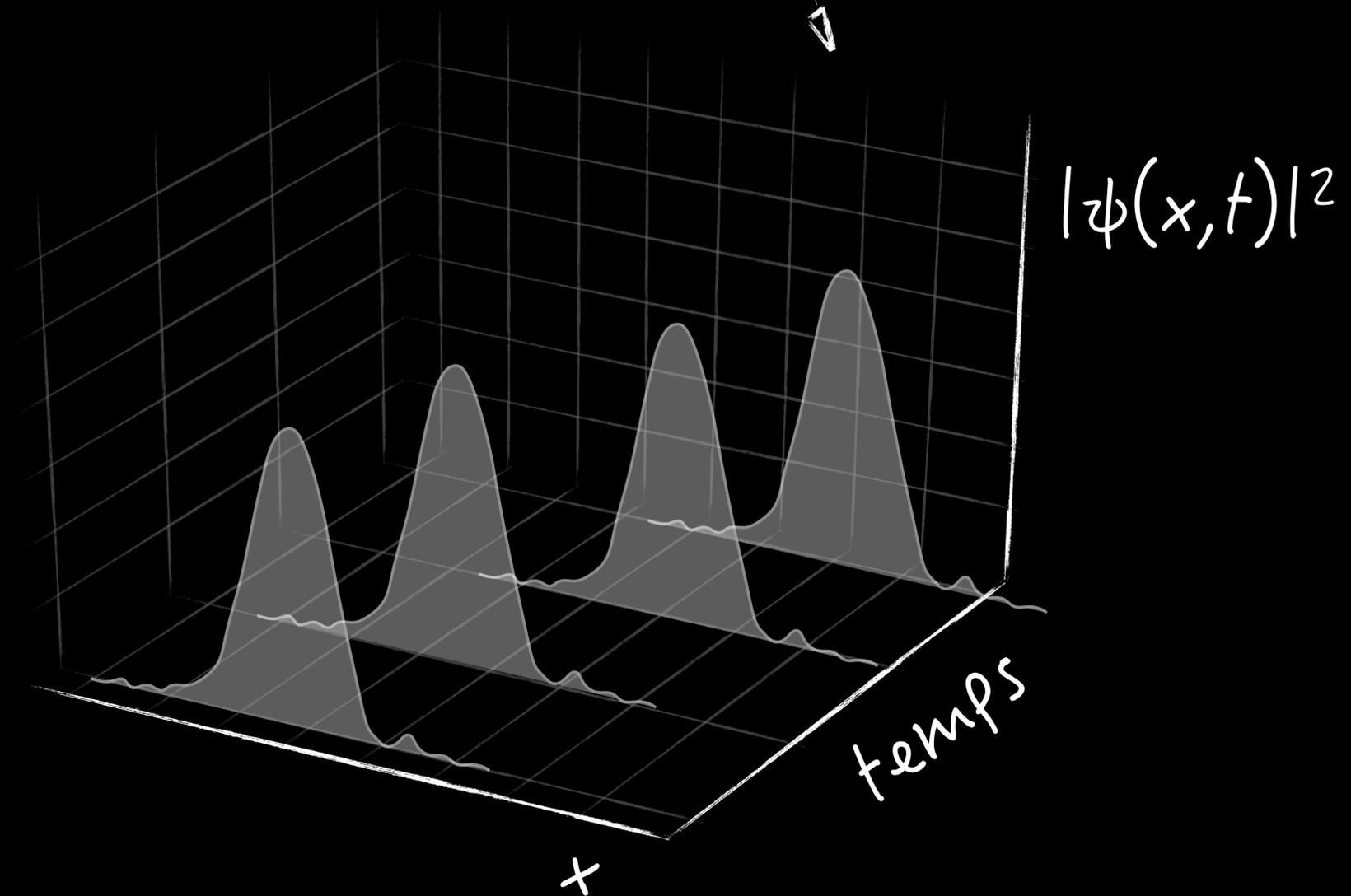
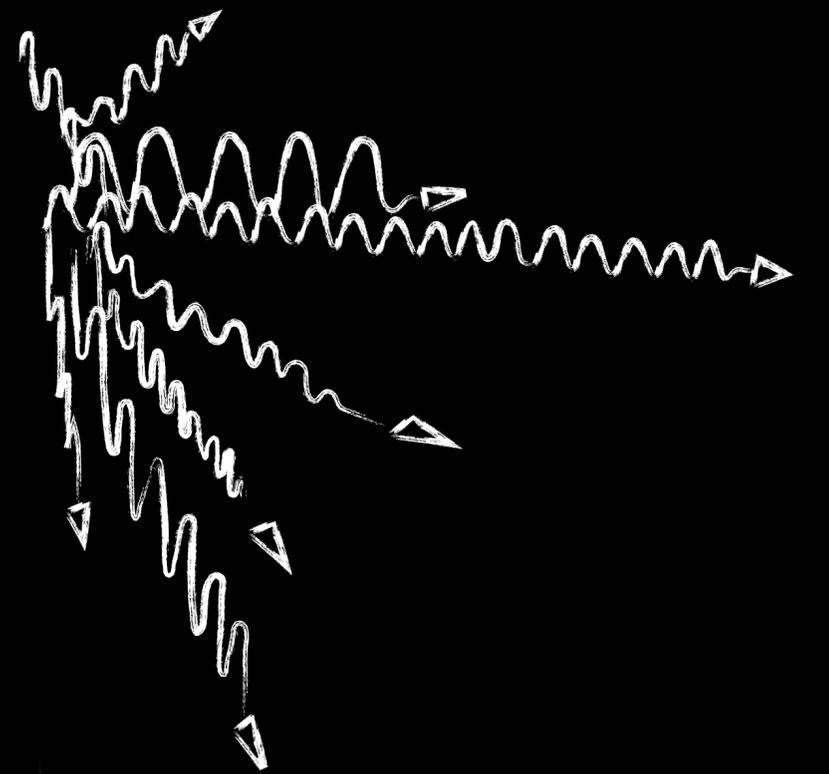
- La matière est faite d'ondes
- Densité de présence en x à l'instant t
- Déterminisme quantique



La Mécanique ondulatoire

1926 : Erwin Schrödinger

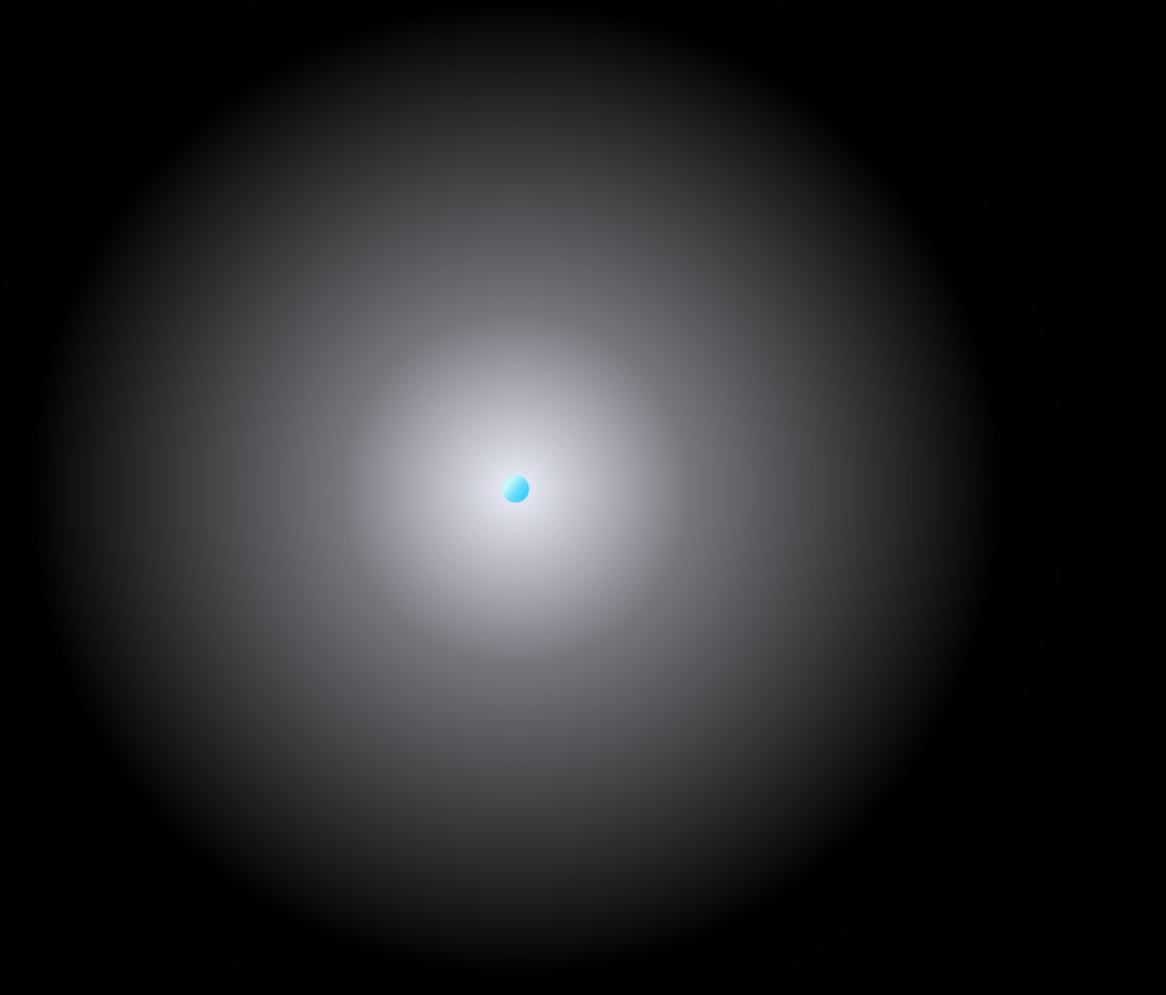
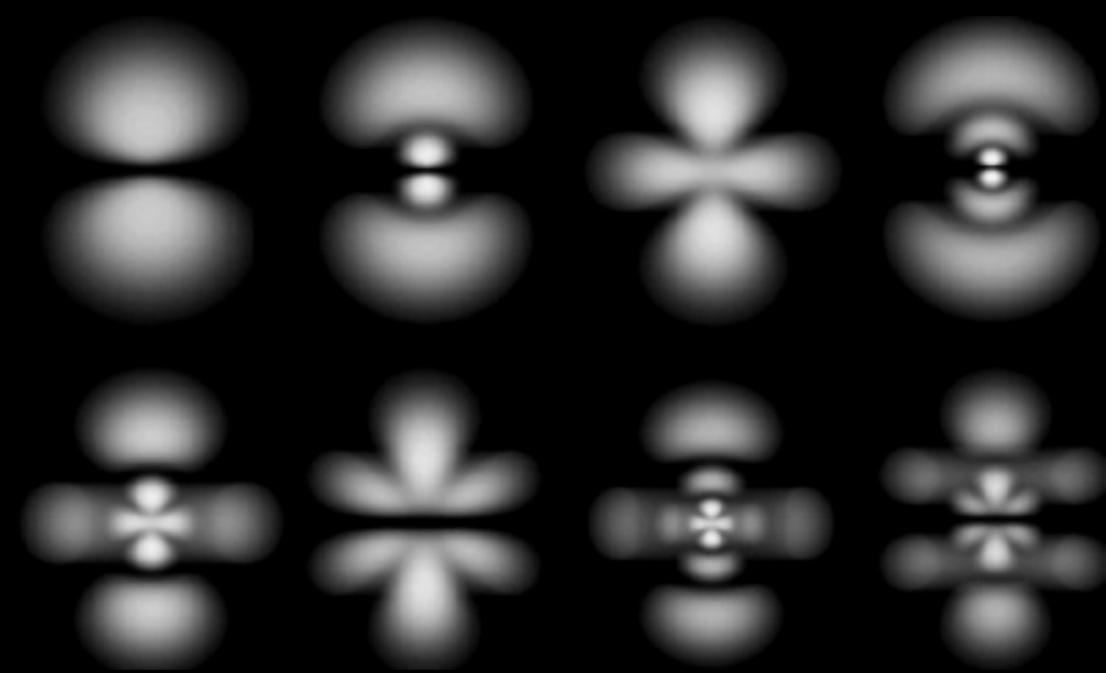
- La matière est faite d'ondes
- Densité de présence en x à l'instant t
- Déterminisme quantique



La Mécanique ondulatoire

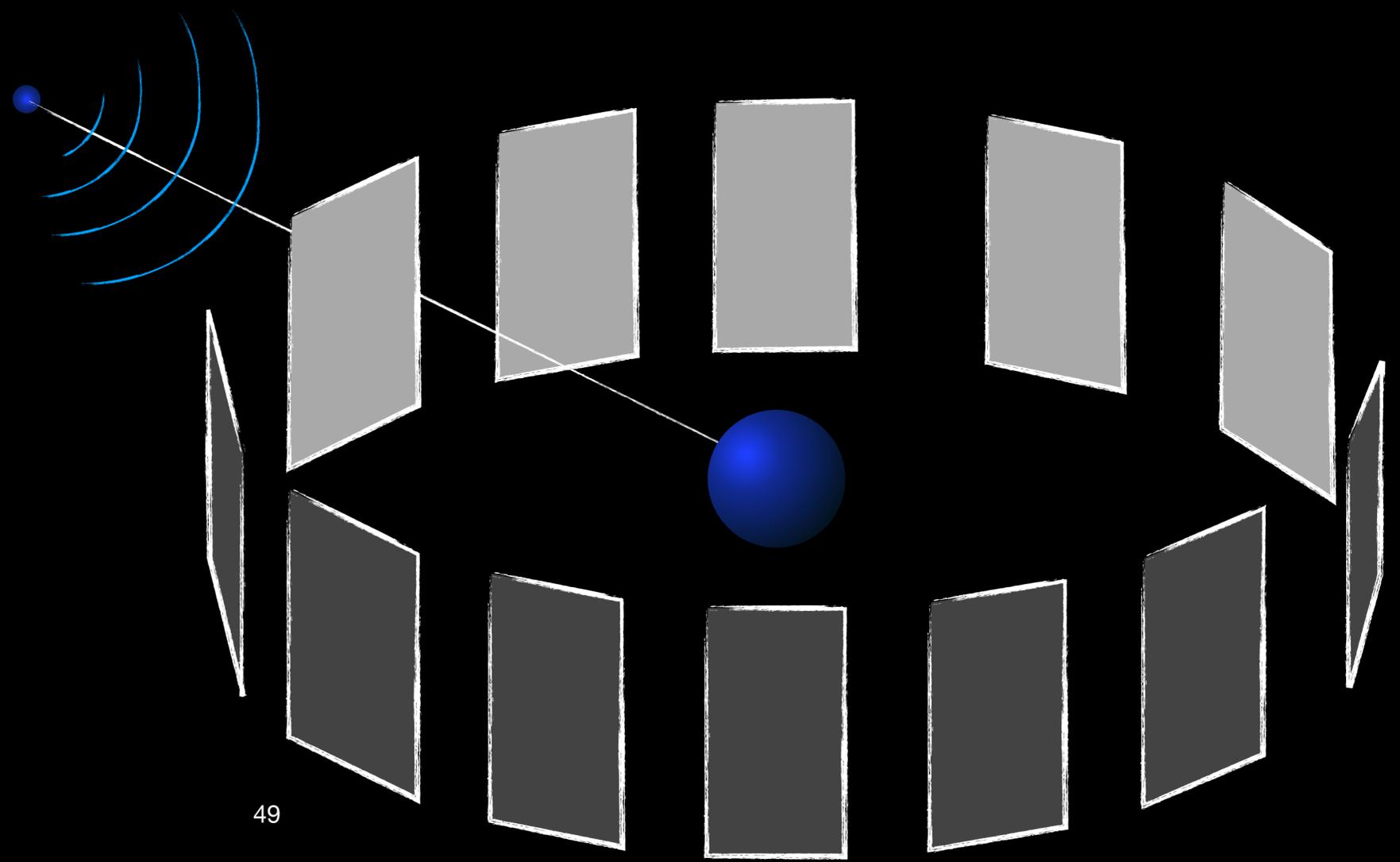
1926 : Erwin Schrödinger

- L'atome selon Erwin
- $|\psi(x,t)|^2 =$ densité de présence de l'électron dans l'atome
- Théorie matricielle \equiv Théorie ondulatoire



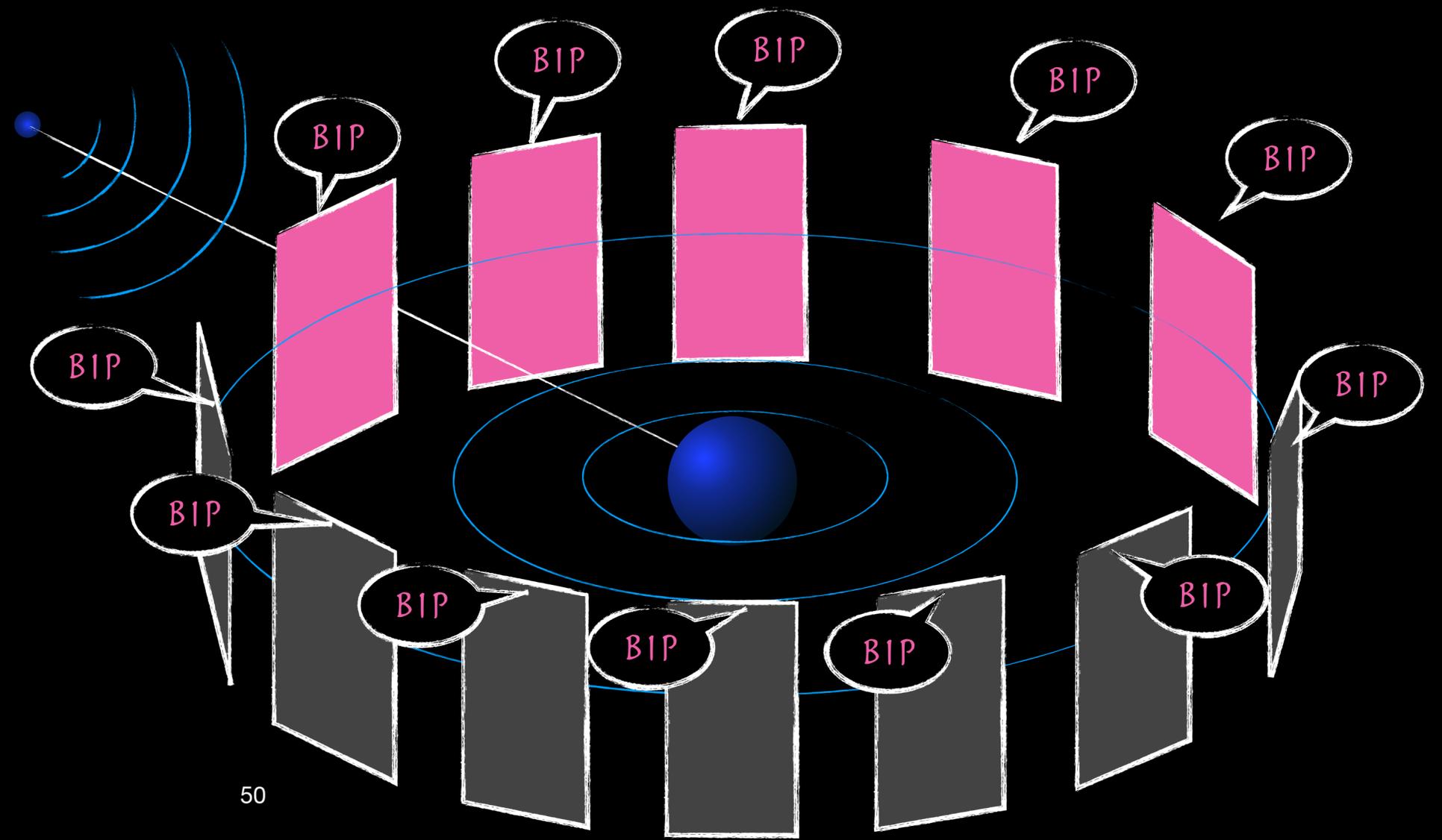
La fonction d'onde

- Erwin Schrödinger : densité de présence



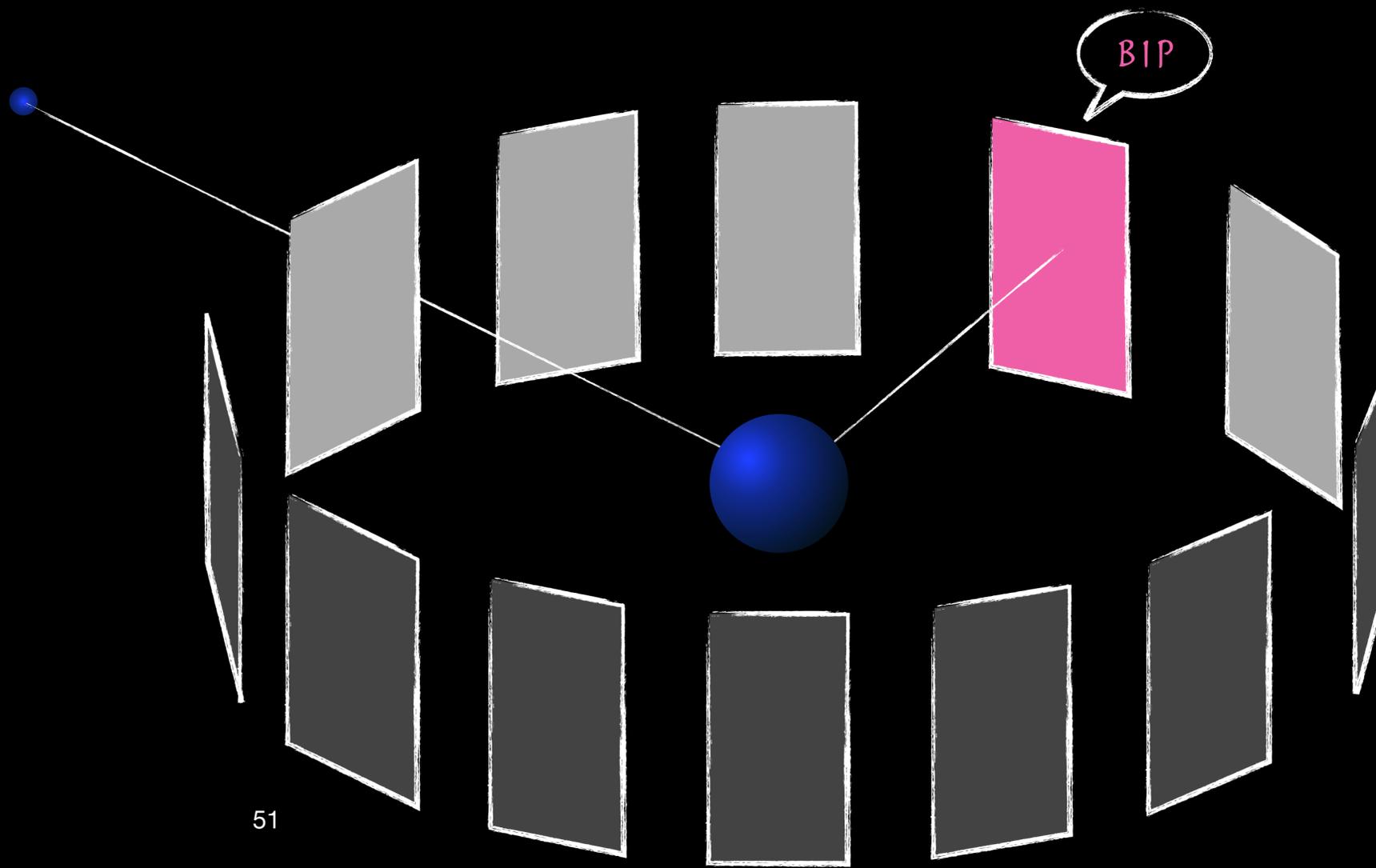
La fonction d'onde

- Erwin Schrödinger : densité de présence



La fonction d'onde

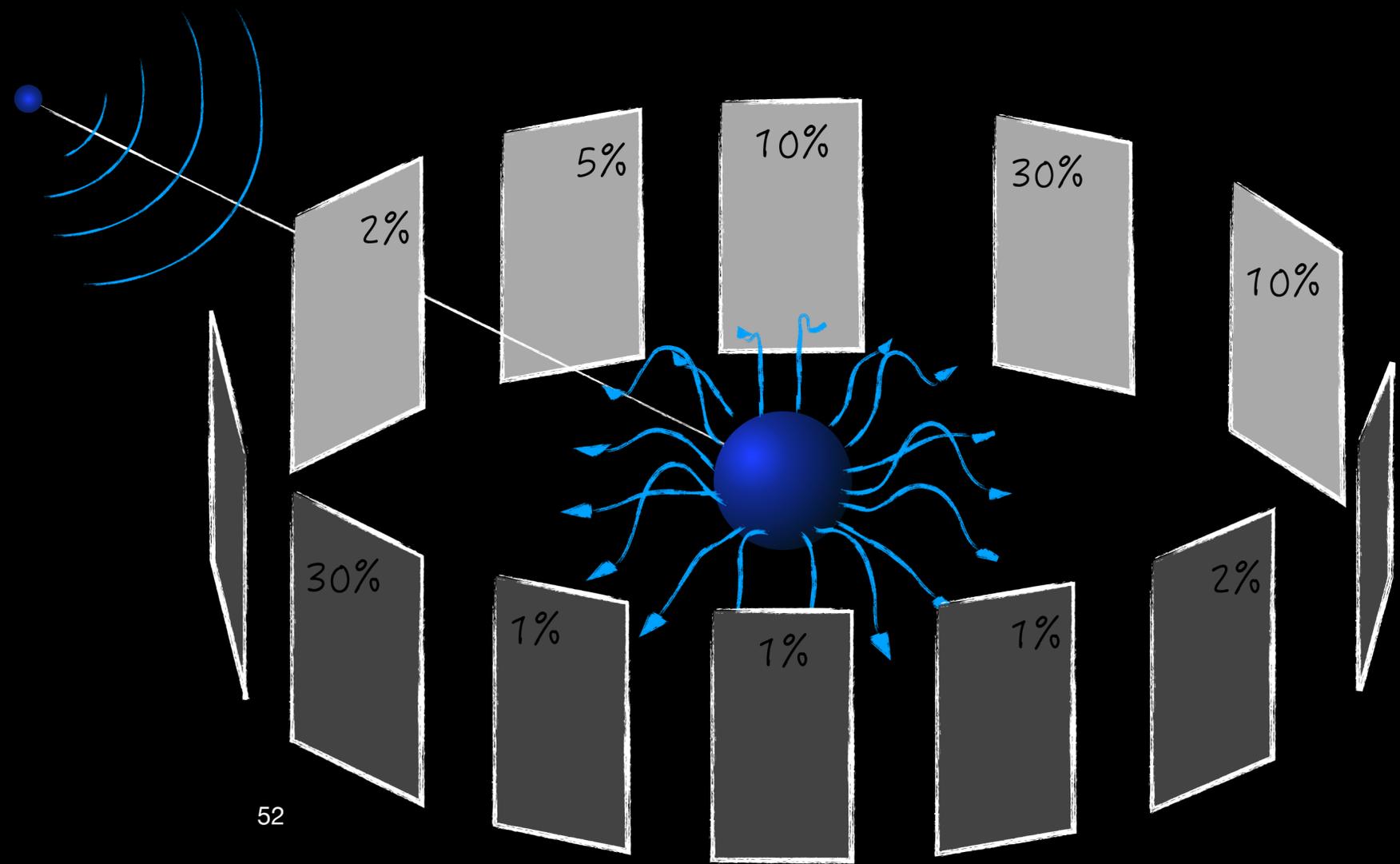
- Erwin Schrödinger : densité de présence
- L'expérience



La fonction d'onde

- Erwin Schrödinger : densité de présence
- L'expérience
- Max Born :
 - Principe de superposition
 - Probabilité + causalité

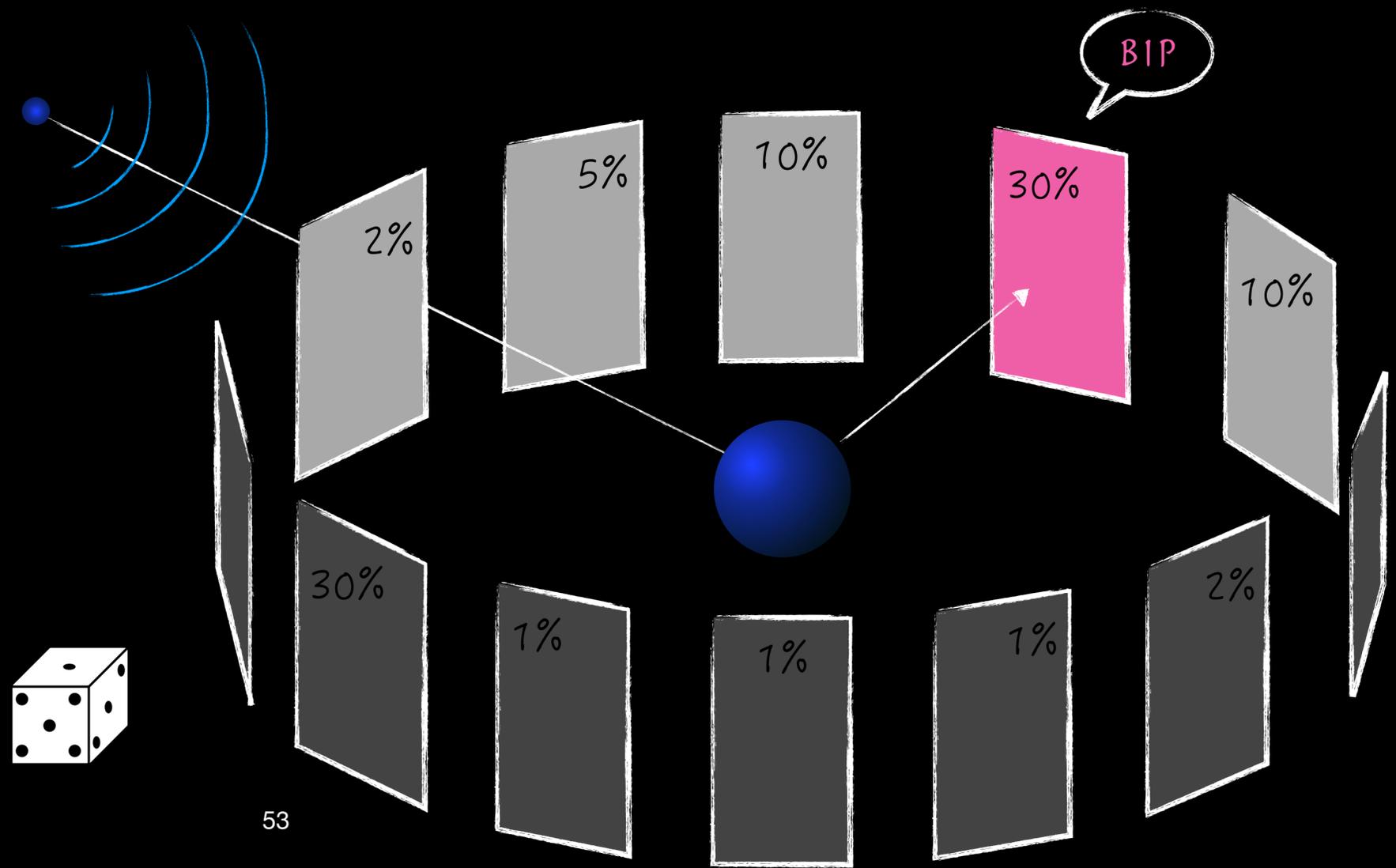
$$|\psi\rangle = c_1 |\alpha_1\rangle + c_2 |\alpha_2\rangle + \dots c_n |\alpha_n\rangle + \dots$$
$$c_1^2 + c_2^2 + \dots + c_n^2 + \dots = 100\%$$



La fonction d'onde

- Erwin Schrödinger : densité de présence
- L'expérience
- Max Born :
 - Principe de superposition
 - Probabilité + causalité
 - Effondrement

$$|\psi\rangle = c_1 |\alpha_1\rangle + c_2 |\alpha_2\rangle + \dots c_n |\alpha_n\rangle + \dots$$
$$c_1^2 = 30\% ; c_2^2 = \dots = c_n^2 \dots = 0$$



Principe d'indétermination

1927 : Werner Heisenberg

- Unbestimmtheit

$$\Delta p \times \Delta q > \frac{h}{2\pi}$$

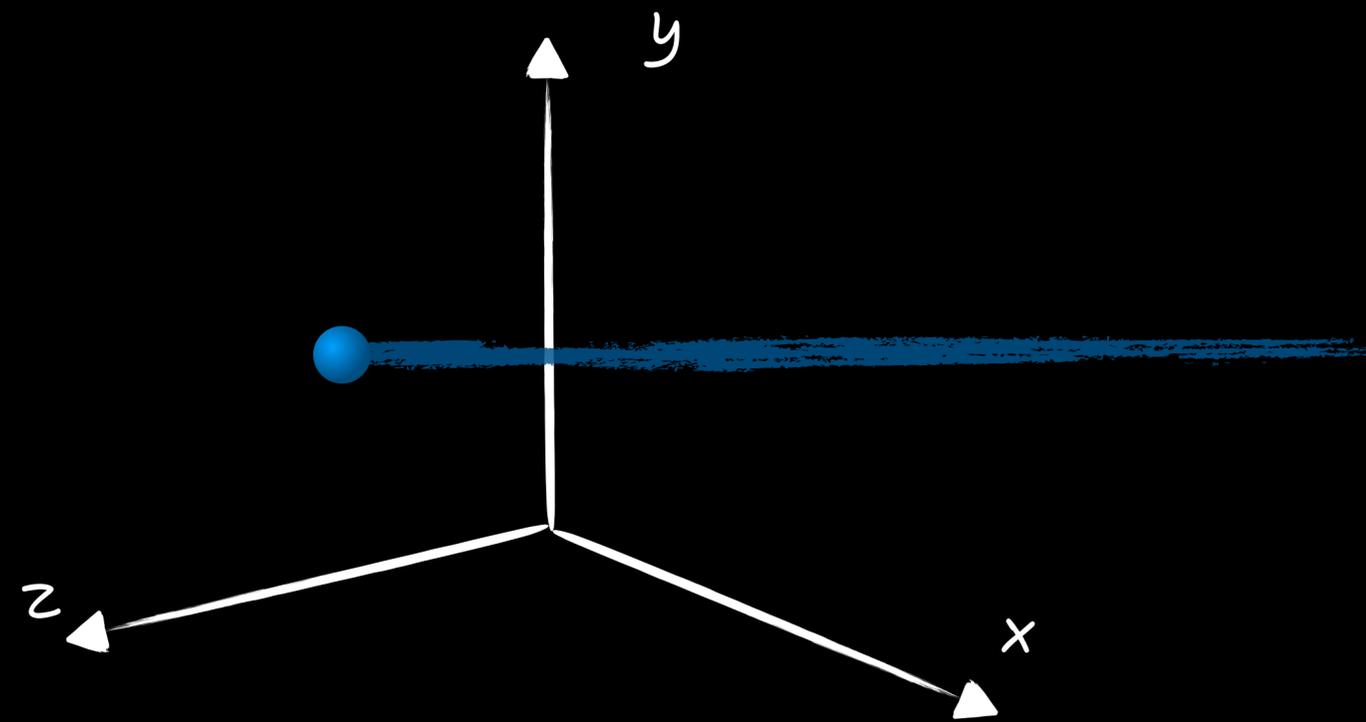
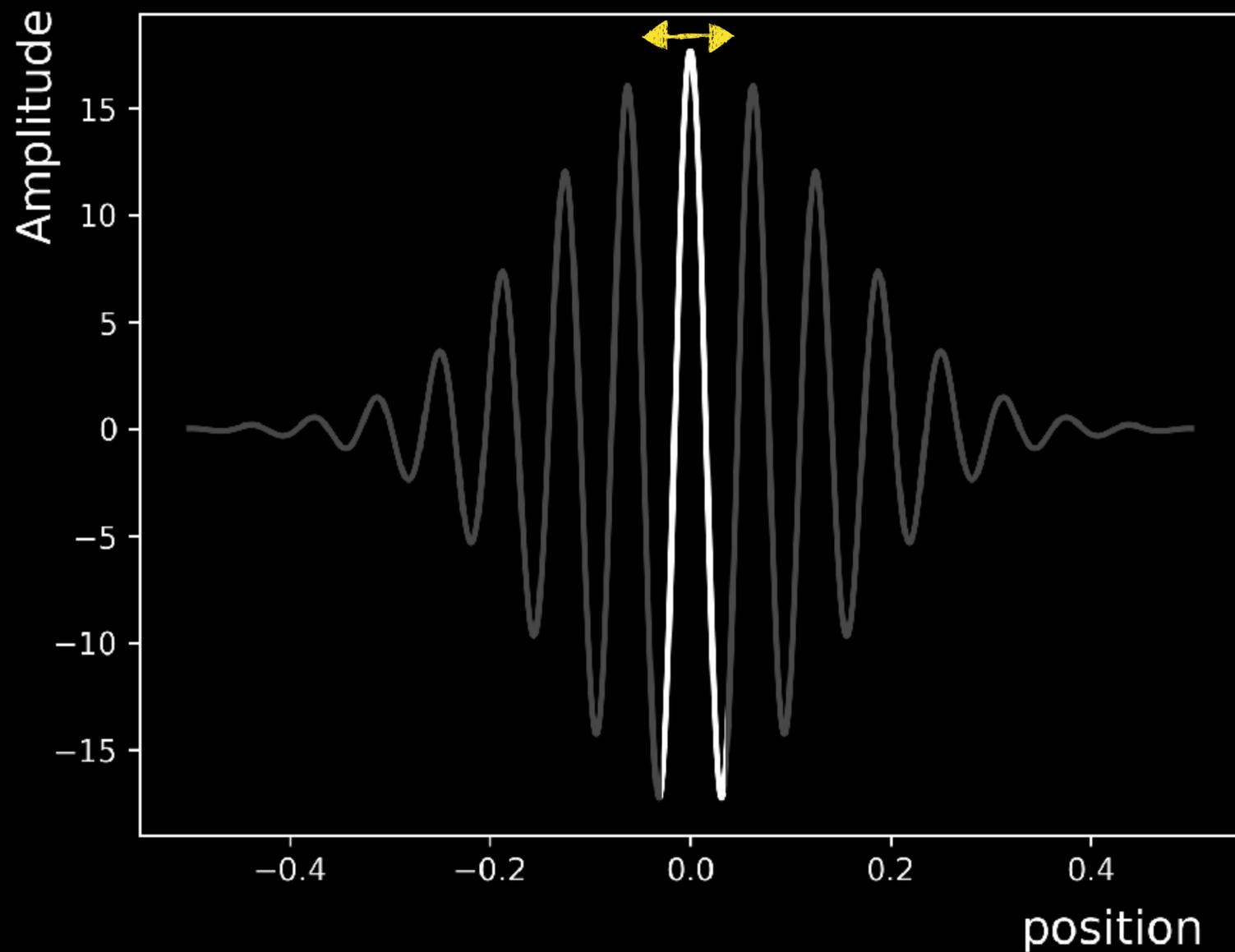
- Il n'existe pas d'état quantique ayant simultanément une position et une quantité de mouvement définies
- Une particule quantique n'est ni un corpuscule ... ni une onde

Principe d'indétermination

Interprétation de Bohr

Δx

$\Delta \lambda = ?$

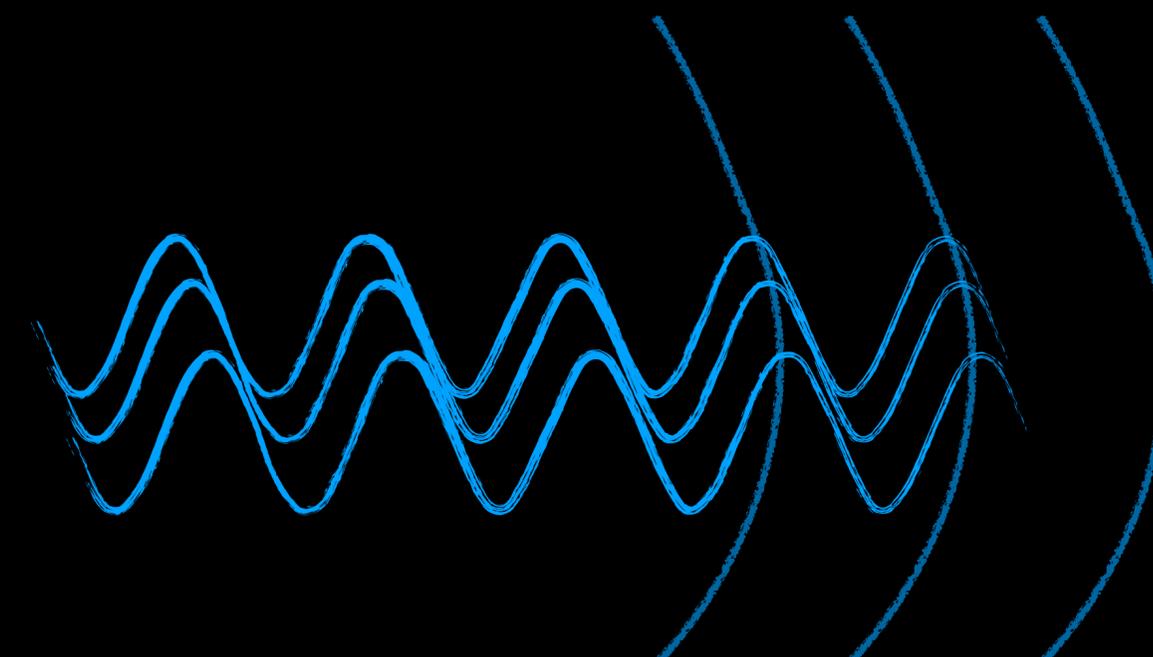
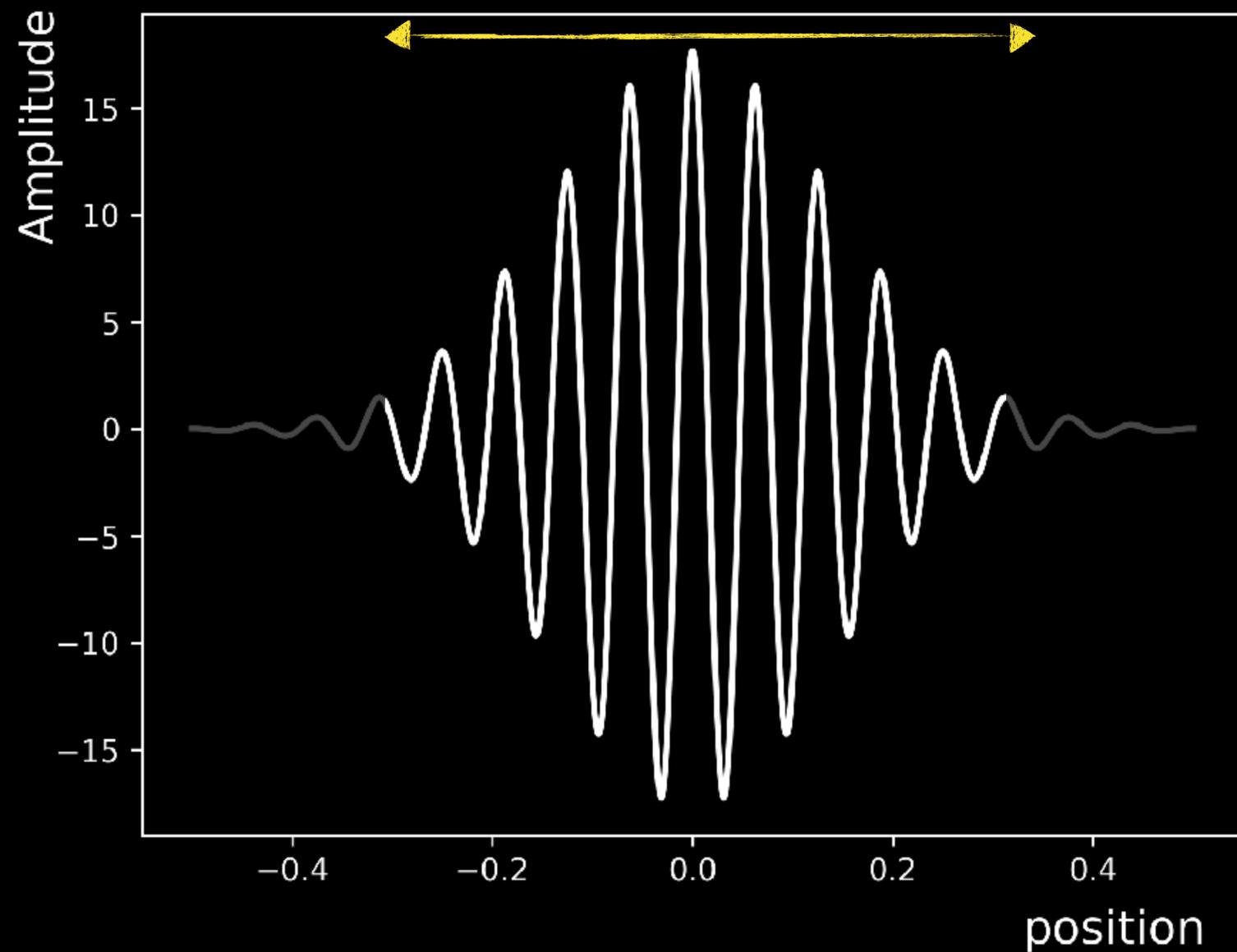


Principe d'indétermination

Interprétation de Bohr

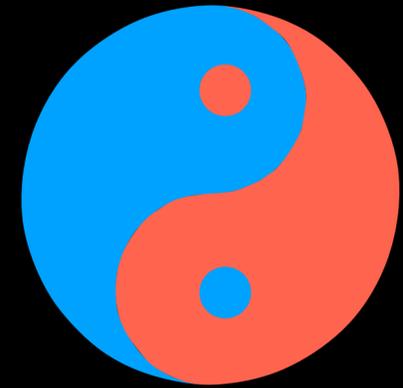
$$\Delta x = ?$$

$$\Delta \lambda$$



Principe de complémentarité

Niels Bohr



Les propriétés corpusculaires et ondulatoires sont deux aspects complémentaires d'une même réalité, mais elles ne sont jamais simultanément observables



SOLVAY CONFERENCE 1927

Y. SCHUTZ A. PICARD E. HENRIOT P. EHRENFEST Ed. HERSEN Th. DE DONDER E. SCHRÖDINGER E. VERSCHAFFELT W. PAULI W. HEISENBERG R.H FOWLER L. BRILLOUIN
 P. DEBYE M. KNUDSEN W.L. BRAGG H.A. KRAMERS P.A.M. DIRAC A.H. COMPTON L. de BROGLIE M. BORN N. BOHR
 I. LANGMUIR M. PLANCK Mme CURIE H.A. LORENTZ A. EINSTEIN P. LANGEVIN Ch.E. GUYE C.T.R. WILSON O.W. RICHARDSON

Absents : Sir W.H. BRAGG, H. DESLANDRES et E. VAN AUBEL

Solvay 1927

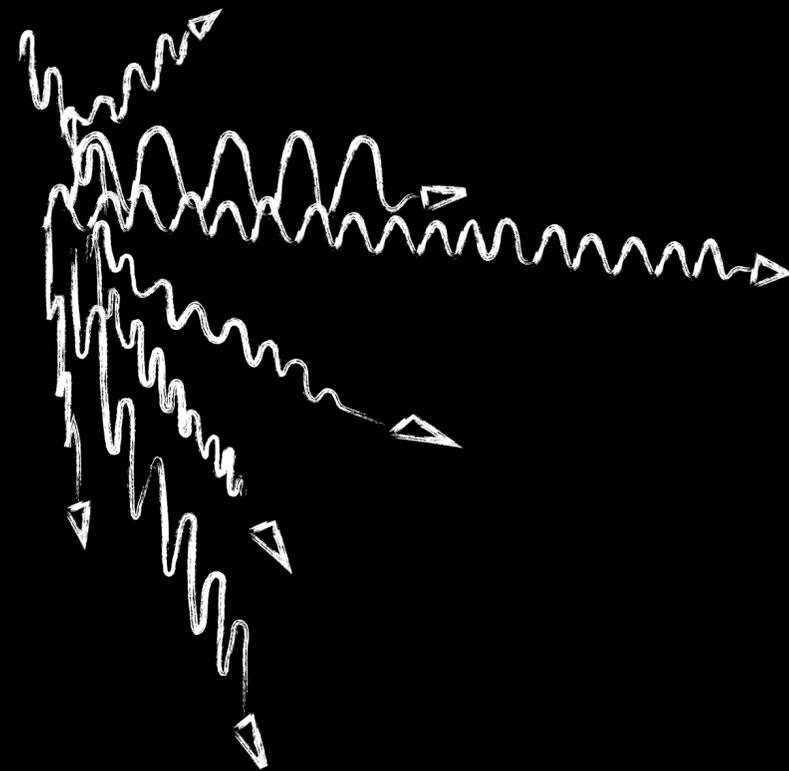
Une question d'interprétation !

- Bohr, roi du quantum : « Il n'y a pas d'univers quantique. Il n'y a qu'une description mécanique quantique abstraite. »
- Einstein, pape de la physique : « Je crois encore en la possibilité d'un modèle de la réalité — c'est-à-dire, d'une théorie qui représente les choses elles-mêmes et pas simplement la probabilité qu'elles se produisent. »
- Dirac : « De nombreux auteurs ont traité l'interprétation de la mécanique quantique, je ne veux pas en discuter ici. Je veux aborder des choses bien plus fondamentales. »

Solvay 1927

L'interprétation de Copenhague

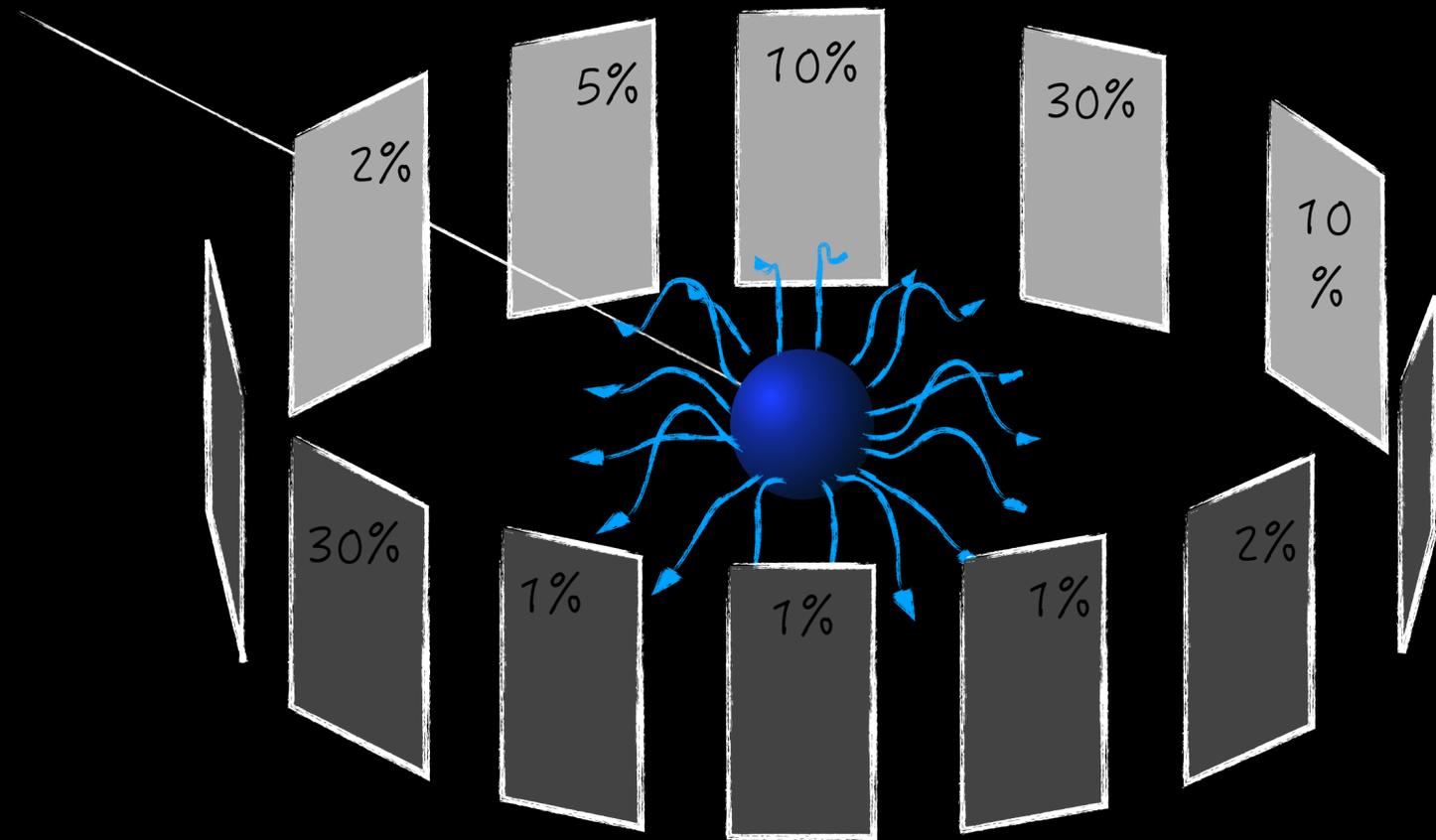
- Pas de réalité objective sans mesure



Solvay 1927

L'interprétation de Copenhague

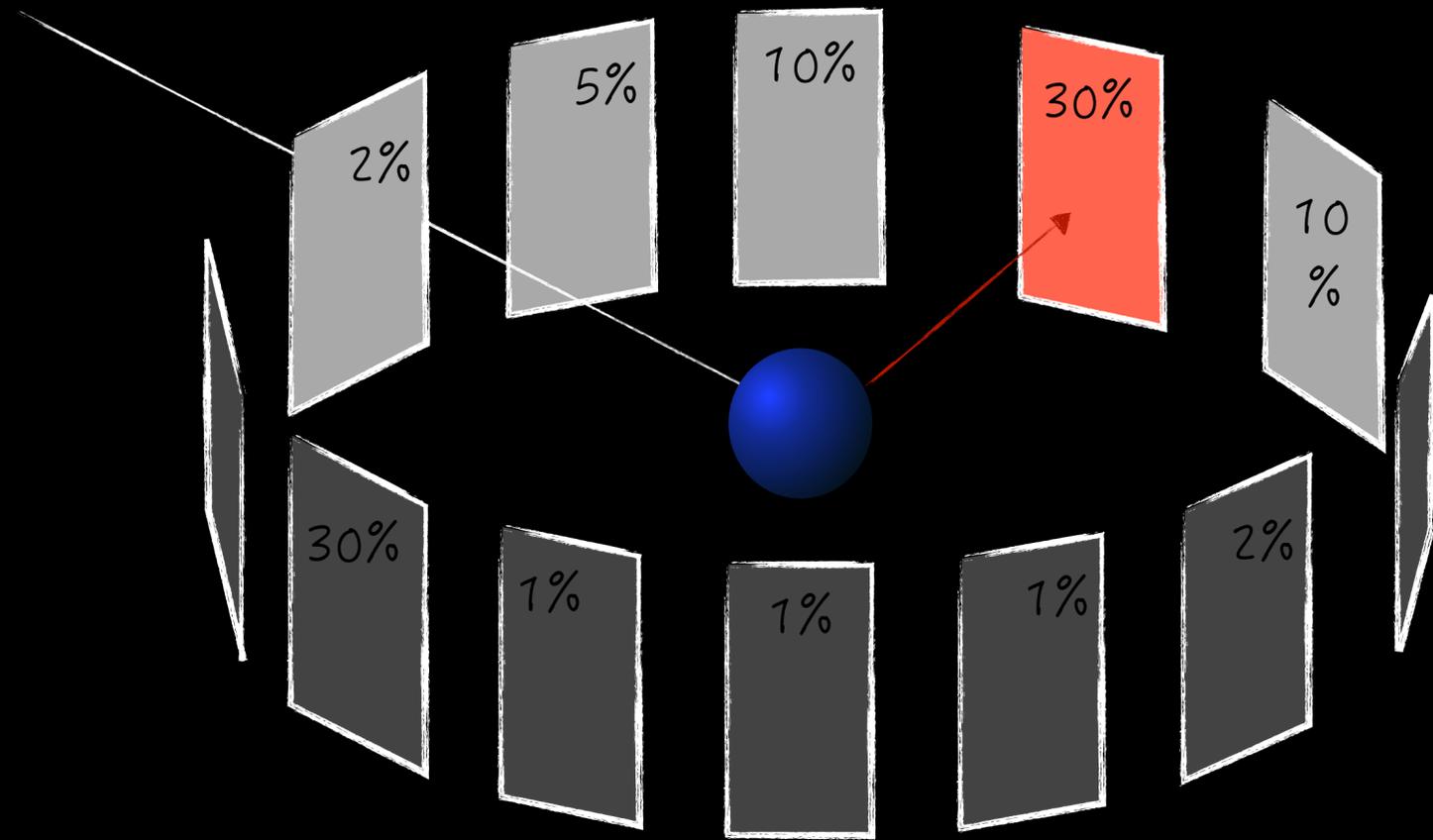
- Pas de réalité objective sans mesure
- Prédit la distribution de probabilité du résultat des mesures



Solvay 1927

L'interprétation de Copenhague

- Pas de réalité objective sans mesure
- Prédit la distribution de probabilité du résultat des mesures
- La mesure réduit le système à une seule des valeurs possibles



Solvay 1927

L'interprétation de Copenhague

- Pas de réalité objective sans mesure
- Prédit la distribution de probabilité du résultat des mesures
- La mesure réduit le système à une seule des valeurs possibles
- Principe d'indétermination (Heisenberg) + interprétation statistique (Born) + principe de complémentarité (Bohr)

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

Réalisme d'Einstein

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

- Système quantique et observateur classique

Réalisme d'Einstein

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

- Système quantique et observateur classique

Réalisme d'Einstein

« J'aime à penser que la Lune est toujours là, même quand je ne la regarde pas! »

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

- Système quantique et observateur classique

Réalisme d'Einstein

« J'aime à penser que la Lune est toujours là, même quand je ne la regarde pas! »

« Dieu ne joue pas aux dés »

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

- Système quantique et observateur classique
- « Il ne nous appartient pas de dire à Dieu comment gouverner le monde »

Réalisme d'Einstein

- « J'aime à penser que la Lune est toujours là, même quand je ne la regarde pas! »
- « Dieu ne joue pas aux dés »

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

- Système quantique et observateur classique
- « Il ne nous appartient pas de dire à Dieu comment gouverner le monde »
- Causalité jusqu'à l'observation imprévisible

Réalisme d'Einstein

- « J'aime à penser que la Lune est toujours là, même quand je ne la regarde pas! »
- « Dieu ne joue pas aux dés »

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

- Système quantique et observateur classique
- « Il ne nous appartient pas de dire à Dieu comment gouverner le monde »
- Causalité jusqu'à l'observation imprévisible

Réalisme d'Einstein

« J'aime à penser que la Lune est toujours là, même quand je ne la regarde pas! »

« Dieu ne joue pas aux dés »

Causalité doit être stricte

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

- Système quantique et observateur classique
- « Il ne nous appartient pas de dire à Dieu comment gouverner le monde »
- Causalité jusqu'à l'observation imprévisible

Réalisme d'Einstein

« J'aime à penser que la Lune est toujours là, même quand je ne la regarde pas! »

« Dieu ne joue pas aux dés »

Causalité doit être stricte

La nouvelle théorie est incomplète

Solvay 1927

Une question d'interprétation !



Interprétation de Copenhague

- Système quantique et observateur classique
- « Il ne nous appartient pas de dire à Dieu comment gouverner le monde »
- Causalité jusqu'à l'observation imprévisible
- La nouvelle théorie est achevée

Réalisme d'Einstein

« J'aime à penser que la Lune est toujours là, même quand je ne la regarde pas! »

« Dieu ne joue pas aux dés »

Causalité doit être stricte

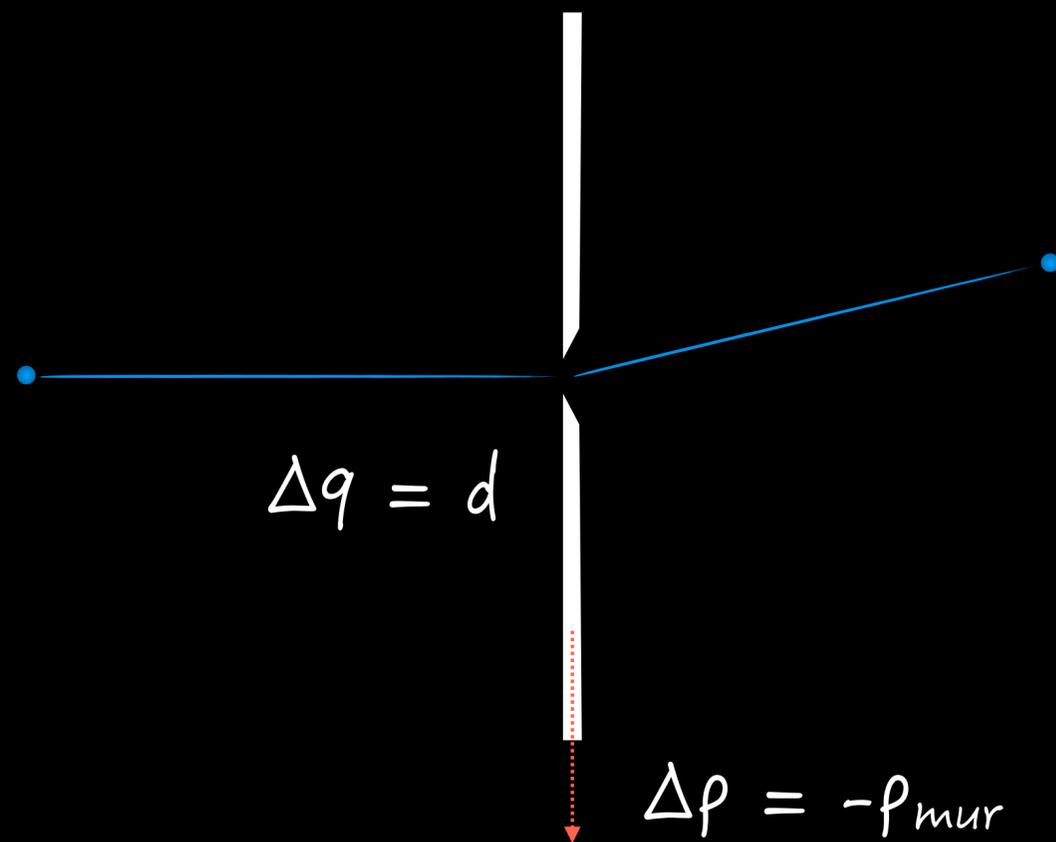
La nouvelle théorie est incomplète

Solvay 1927

Expérience de pensée 1

- Bohr

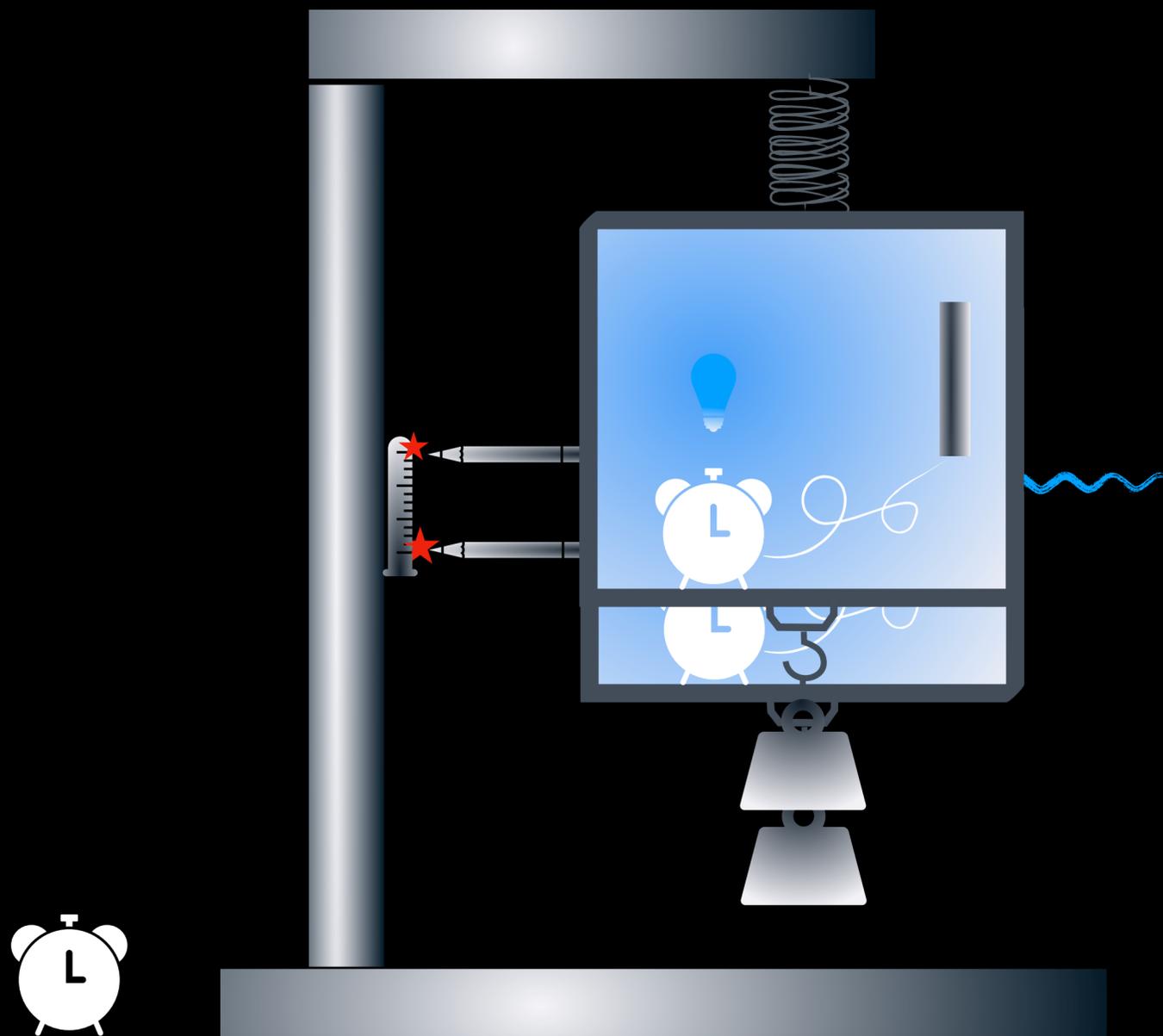
$$\Delta p \times \Delta q > \frac{h}{2\pi}$$



Solvay 1930

Expérience de pensée 2

$$\Delta E \times \Delta t > \frac{h}{2\pi}$$

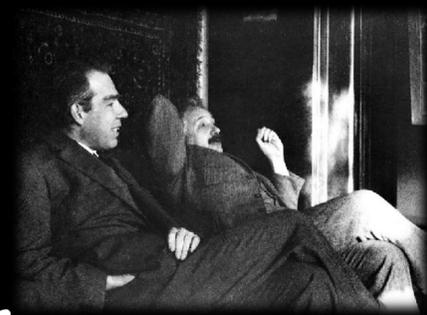


Alors, il joue aux dés Dieu, oui ou non ?

A retenir

Gott würfelt nicht

Albert Einstein vs Niels Bohr,
1927



- Mécanique quantique = synthèse formelle et conceptuelle de la mécanique des matrices et de la mécanique ondulatoire
- Un formalisme redoutablement efficace
- Une interprétation très débattue : réalité quantique ? causalité ? onde ou corpuscule ? rôle de la mesure ?

Si vous m'avez compris, c'est que je n'ai pas été clair !

Richard Feynman

Si vous ne m'avez pas compris, c'est que je n'ai pas été clair !

Yves Schutz