

La théorie quantique : pourquoi ? Pour quoi faire ?

IX^{es} Rencontres d'été de physique de
l'infiniment grand à l'infiniment petit

Claude Aslangul
LPTMC - Sorbonne Université

Orsay, 15 juillet 2019

La théorie quantique...

La théorie quantique...

*"...that most exact and mysterious of
physical theories"*

Roger Penrose,

The emperor's new mind (Oxford University Press, 1989)

Introduction

- *Révolution conceptuelle*

- *Révolution conceptuelle*
 - Négation de la pertinence de certains concepts pour les petits objets (trajectoire, séparabilité, réalisme local,...)

- *Révolution conceptuelle*
 - Négation de la pertinence de certains concepts pour les petits objets (trajectoire, séparabilité, réalisme local,...)
 - Qu'est-ce que la réalité physique ("paradoxe" EPR) ?

- *Révolution conceptuelle*
 - Négation de la pertinence de certains concepts pour les petits objets (trajectoire, séparabilité, réalisme local,...)
 - Qu'est-ce que la réalité physique ("paradoxe" EPR) ?
 - Les mystères (*extravagances* ?) quantiques

- *Révolution conceptuelle*
 - Négation de la pertinence de certains concepts pour les petits objets (trajectoire, séparabilité, réalisme local,...)
 - Qu'est-ce que la réalité physique ("paradoxe" EPR) ?
 - Les mystères (*extravagances* ?) quantiques
 - Tribut à payer pour accepter un *corpus* théorique irréfutable à ce jour

- *Révolution conceptuelle*
 - Négation de la pertinence de certains concepts pour les petits objets (trajectoire, séparabilité, réalisme local,...)
 - Qu'est-ce que la réalité physique ("paradoxe" EPR) ?
 - Les mystères (*extravagances* ?) quantiques
 - Tribut à payer pour accepter un *corpus* théorique irréfutable à ce jour
 - Explication et prévision des phénomènes de l'IP à l'IG

- *Révolution conceptuelle*

- Négation de la pertinence de certains concepts pour les petits objets (trajectoire, séparabilité, réalisme local,...)
- Qu'est-ce que la réalité physique ("paradoxe" EPR) ?
- Les mystères (*extravagances* ?) quantiques
 - Tribut à payer pour accepter un *corpus* théorique irréfutable à ce jour
 - Explication et prévision des phénomènes de l'IP à l'IG
 - Précision fabuleuse

- Le formalisme et l'invasion des nombres complexes
(Eugene Paul Wigner, "*The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences*", Communications in Pure and Applied Mathematics, **13**, 1, 1960)

- Le formalisme et l'invasion des nombres complexes
(Eugene Paul Wigner, "*The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences*", Communications in Pure and Applied Mathematics, **13**, 1, 1960)
- "*The scandal of Quantum Mechanics*"
Nico van Kampen, American Journal of Physics **76**, 989 (2008)

- Le formalisme et l'invasion des nombres complexes
(Eugene Paul Wigner, "*The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences*", Communications in Pure and Applied Mathematics, **13**, 1, 1960)
- "*The scandal of Quantum Mechanics*"
Nico van Kampen, American Journal of Physics **76**, 989 (2008)
- Franck Laloë, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* (EDP Sciences, Paris, 2011)

- *La genèse de la théorie quantique (1900-1928)*

- *La genèse de la théorie quantique (1900-1928)*
 - Bouillonnement et foisonnement d'idées

- *La genèse de la théorie quantique (1900-1928)*
 - Bouillonnement et foisonnement d'idées
 - Marche tortueuse par essai et erreur : impossibilité d'une narration linéaire ancrée sur la chronologie

- *La genèse de la théorie quantique (1900-1928)*
 - Bouillonnement et foisonnement d'idées
 - Marche tortueuse par essai et erreur : impossibilité d'une narration linéaire ancrée sur la chronologie
 - Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (McGraw-Hill, New York, 1966)

La Physique à l'orée du XX^{ème} siècle

Ce qui allait (très) bien

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique
 - La loi de Newton

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique
 - La loi de Newton
 - L'attraction universelle, et le triomphe de Le Verrier (1846)

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique
 - La loi de Newton
 - L'attraction universelle, et le triomphe de Le Verrier (1846)
- L'électromagnétisme

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique
 - La loi de Newton
 - L'attraction universelle, et le triomphe de Le Verrier (1846)
- L'électromagnétisme
 - Unification de l'électricité et du magnétisme (Maxwell ~ 1850)

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique
 - La loi de Newton
 - L'attraction universelle, et le triomphe de Le Verrier (1846)
- L'électromagnétisme
 - Unification de l'électricité et du magnétisme (Maxwell ~ 1850)
 - Fin de la controverse Newton vs. Huygens : la lumière, onde ou corpuscule ?

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique
 - La loi de Newton
 - L'attraction universelle, et le triomphe de Le Verrier (1846)
- L'électromagnétisme
 - Unification de l'électricité et du magnétisme (Maxwell \sim 1850)
 - Fin de la controverse Newton vs. Huygens : la lumière, onde ou corpuscule ?
- La thermodynamique et la mécanique statistique

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique
 - La loi de Newton
 - L'attraction universelle, et le triomphe de Le Verrier (1846)
- L'électromagnétisme
 - Unification de l'électricité et du magnétisme (Maxwell \sim 1850)
 - Fin de la controverse Newton vs. Huygens : la lumière, onde ou corpuscule ?
- La thermodynamique et la mécanique statistique
 - Carnot et Clausius

Ce qui allait (très) bien

- La mécanique
 - La loi de Newton
 - L'attraction universelle, et le triomphe de Le Verrier (1846)
- L'électromagnétisme
 - Unification de l'électricité et du magnétisme (Maxwell \sim 1850)
 - Fin de la controverse Newton vs. Huygens : la lumière, onde ou corpuscule ?
- La thermodynamique et la mécanique statistique
 - Carnot et Clausius
 - Maxwell, Boltzmann et Gibbs

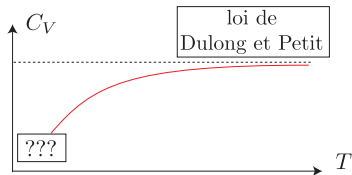
Ce qui, déjà, n'allait pas bien ou pas du tout

Ce qui, déjà, n'allait pas bien ou pas du tout

- La chaleur spécifique des solides

Ce qui, déjà, n'allait pas bien ou pas du tout

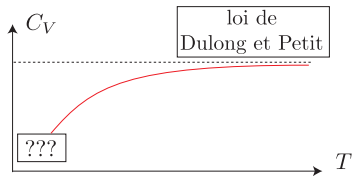
- La chaleur spécifique des solides



Allure schématique de la chaleur spécifique d'un solide. À haute température C_V tend vers une constante (loi de Dulong et Petit, 1819), mais chute assez rapidement à basse température.

Ce qui, déjà, n'allait pas bien ou pas du tout

- La chaleur spécifique des solides

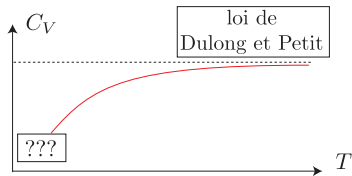


Allure schématique de la chaleur spécifique d'un solide. À haute température C_V tend vers une constante (loi de Dulong et Petit, 1819), mais chute assez rapidement à basse température.

- L'effet photoélectrique (Hertz, 1887)

Ce qui, déjà, n'allait pas bien ou pas du tout

- La chaleur spécifique des solides

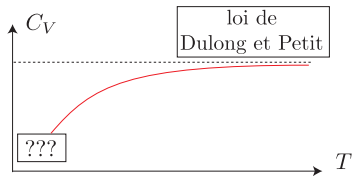


Allure schématique de la chaleur spécifique d'un solide. À haute température C_V tend vers une constante (loi de Dulong et Petit, 1819), mais chute assez rapidement à basse température.

- L'effet photoélectrique (Hertz, 1887)
 - Instantanéité (dans les conditions *ordinaires*)

Ce qui, déjà, n'allait pas bien ou pas du tout

- La chaleur spécifique des solides



Allure schématique de la chaleur spécifique d'un solide. À haute température C_V tend vers une constante (loi de Dulong et Petit, 1819), mais chute assez rapidement à basse température.

- L'effet photoélectrique (Hertz, 1887)
 - Instantanéité (dans les conditions *ordinaires*)
 - Existence d'une fréquence-seuil ν_S

Et l'éther...

- Michelson et Morley, 1887
- Une tout autre histoire...

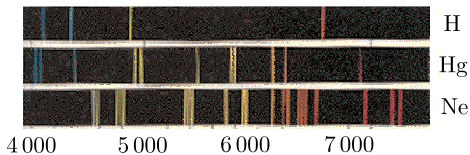
La situation empire

La situation empire

- Les spectres atomiques (Ångström \gtrsim 1860)

La situation empire

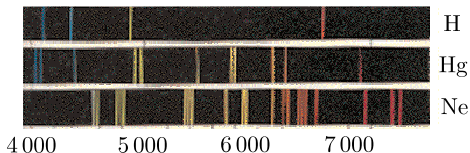
- Les spectres atomiques (Ångström \approx 1860)



Spectre de raies dans le visible pour l'hydrogène, le mercure et le néon. La longueur d'onde est en abscisse, exprimée en Å.

La situation empire

- Les spectres atomiques (Ångström \approx 1860)



Spectre de raies dans le visible pour l'hydrogène, le mercure et le néon. La longueur d'onde est en abscisse, exprimée en Å.

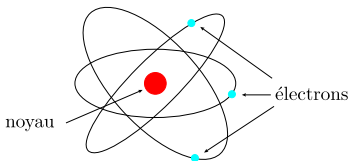
- Le rayonnement du corps noir et la catastrophe ultraviolette

- Modèles de l'atome (~ 1900)

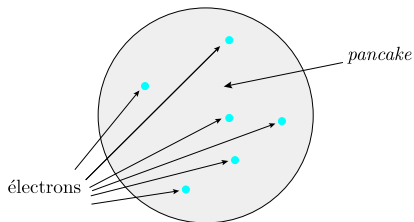
- Modèles de l'atome (~ 1900)
 - Jean Perrin (modèle planétaire)

- Modèles de l'atome (~ 1900)
 - Jean Perrin (modèle planétaire)
 - Joseph John Thomson (modèle globulaire, *pancake*)

- Modèles de l'atome (~ 1900)
 - Jean Perrin (modèle planétaire)
 - Joseph John Thomson (modèle globulaire, *pancake*)

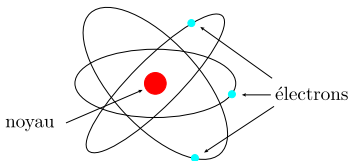


modèle planétaire de Perrin

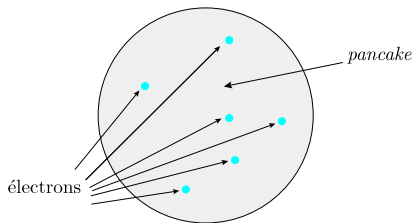


modèle globulaire de Thomson

- Modèles de l'atome (~ 1900)
 - Jean Perrin (modèle planétaire)
 - Joseph John Thomson (modèle globulaire, *pancake*)



modèle planétaire de Perrin

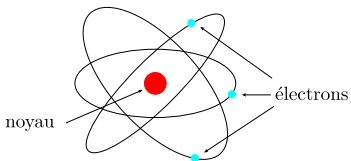


modèle globulaire de Thomson

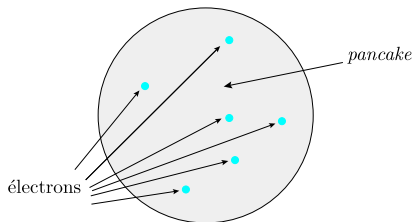
- Charges en mouvement confiné \implies rayonnement \iff

durée de vie finie $\sim 10^{-9}$ s

- Modèles de l'atome (~ 1900)
 - Jean Perrin (modèle planétaire)
 - Joseph John Thomson (modèle globulaire, *pancake*)



modèle planétaire de Perrin



modèle globulaire de Thomson

- Charges en mouvement confiné \implies rayonnement \iff

durée de vie finie $\sim 10^{-9}$ s

- Modèle d'Abraham-Lorentz (1904)... mais violation de la causalité

- L'inexistence du magnétisme (Bohr-van Leeuwen, 1921)

- L'inexistence du magnétisme (Bohr-van Leeuwen, 1921)
- Les expériences de Stern et Gerlach (1921)

- L'inexistence du magnétisme (Bohr-van Leeuwen, 1921)
- Les expériences de Stern et Gerlach (1921)
- L'effet Compton (1923)

- L'inexistence du magnétisme (Bohr-van Leeuwen, 1921)
- Les expériences de Stern et Gerlach (1921)
- L'effet Compton (1923)
- Le doublet D_{α} du sodium, le *spinning electron* et l'hypothèse du spin (Uhlenbeck et Goudsmit, 1925)

La marche par essai et erreur : de l'hypothèse de Planck à l'équation de Dirac (1900-1928)

Le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck

Le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck

- Le calcul de Rayleigh-Jeans (1900) :

$$u_{\text{R-J}}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \times k_{\text{B}} T$$

Le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck

- Le calcul de Rayleigh-Jeans (1900) :

$$u_{\text{R-J}}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \times k_B T$$

- 14 décembre 1900, Planck :

Le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck

- Le calcul de Rayleigh-Jeans (1900) :

$$u_{R-J}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \times k_B T$$

- 14 décembre 1900, Planck :
 - Argumentation phénoménologique (interpolation)

Le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck

- Le calcul de Rayleigh-Jeans (1900) :

$$u_{R-J}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \times k_B T$$

- 14 décembre 1900, Planck :
 - Argumentation phénoménologique (interpolation)
 - Argumentation sur des bases statistiques

Le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck

- Le calcul de Rayleigh-Jeans (1900) :

$$u_{R-J}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \times k_B T$$

- 14 décembre 1900, Planck :
 - Argumentation phénoménologique (interpolation)
 - Argumentation sur des bases statistiques
 - $E_{\text{oscillateur}} \propto \nu$ (seule grandeur physique disponible)

Le rayonnement du corps noir et l'hypothèse de Planck

- Le calcul de Rayleigh-Jeans (1900) :

$$u_{R-J}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \times k_B T$$

- 14 décembre 1900, Planck :
 - Argumentation phénoménologique (interpolation)
 - Argumentation sur des bases statistiques
 - $E_{\text{oscillateur}} \propto \nu$ (seule grandeur physique disponible)
 - Nécessité d'un *dénombrement* \implies description avec des variables **discrètes**, $E_{\text{osc Planck}} = nh\nu$, n entier

$$u_{\text{Planck}}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \times \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}$$

continu

$$\int_{\mathbb{R}^2} e^{-\beta H(q, p)} dq dp$$



Catastrophe ultra-violette

discret

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} e^{-\beta n h \nu}$$



Loi de Planck

Comment le passage d'une somme *continue* à une somme *discrète* règle le problème.

L'interprétation par Einstein de l'effet photoélectrique (1905)

L'interprétation par Einstein de l'effet photoélectrique (1905)

*La lumière est **atomisée***

*Chaque grain de lumière cède intégralement
son énergie à un électron du métal et disparaît*

L'interprétation par Einstein de l'effet photoélectrique (1905)

*La lumière est **atomisée***

*Chaque grain de lumière cède intégralement
son énergie à un électron du métal et disparaît*

énergie cinétique de l'électron
au sortir du métal

énergie de liaison de l'électron
dans le métal

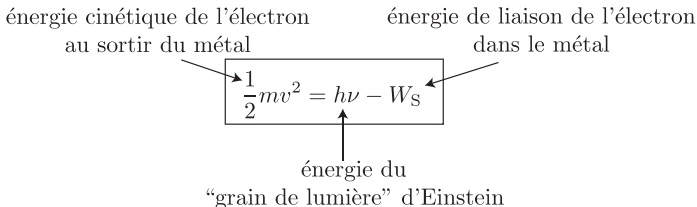
$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W_S$$

énergie du
"grain de lumière" d'Einstein

L'interprétation par Einstein de l'effet photoélectrique (1905)

*La lumière est **atomisée***

*Chaque grain de lumière cède intégralement
son énergie à un électron du métal et disparaît*



$$\frac{1}{2}mv^2 = h(\nu - \nu_S) \quad \nu_S \stackrel{\text{d\u00e9f}}{=} \frac{W_S}{h}$$

Le modèle de Bohr (1913)

- Accumulation de données sur les spectres atomiques

$$\nu_{\text{raie atomique}} \propto T_n - T_p \quad (\text{principe de combinaison de Ritz})$$

- Accumulation de données sur les spectres atomiques

$$\nu_{\text{raie atomique}} \propto T_n - T_p \quad (\text{principe de combinaison de Ritz})$$

- Première tentative théorique pour rassembler l'idée de *quantum* d'énergie et le principe de Ritz

- Accumulation de données sur les spectres atomiques

$$\nu_{\text{raie atomique}} \propto T_n - T_p \quad (\text{principe de combinaison de Ritz})$$

- Première tentative théorique pour rassembler l'idée de *quantum* d'énergie et le principe de Ritz
 - L'électron tourne autour du noyau sur des cercles sélectionnés par $\oint p \, dq = nh$, $n = \text{entier}$

- Accumulation de données sur les spectres atomiques

$$\nu_{\text{raie atomique}} \propto T_n - T_p \quad (\text{principe de combinaison de Ritz})$$

- Première tentative théorique pour rassembler l'idée de *quantum* d'énergie et le principe de Ritz
 - L'électron tourne autour du noyau sur des cercles sélectionnés par $\oint p dq = nh$, $n = \text{entier}$
 - **Quantification** des trajectoires \iff **quantification** de l'énergie E et du moment cinétique J :

$$E_n = -\frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2} \quad J_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (n \in \mathbb{N}^*)$$

- Émission/absorption d'énergie lorsque l'électron "saute" d'un cercle à l'autre :

$$E_n - E_{n'} = \hbar\omega_{nn'}$$

- Émission/absorption d'énergie lorsque l'électron "saute" d'un cercle à l'autre :

$$E_n - E_{n'} = \hbar\omega_{nn'}$$

- Quand il tourne sur l'un des cercles, l'électron **ne rayonne pas**

- Émission/absorption d'énergie lorsque l'électron "saute" d'un cercle à l'autre :

$$E_n - E_{n'} = \hbar\omega_{nn'}$$

- Quand il tourne sur l'un des cercles, l'électron **ne rayonne pas**

"This is all nonsense ! Maxwell's equations are valid under all circumstances !" (Max von Laue)

La construction de la théorie quantique : Heisenberg, Schrödinger et Dirac

La construction de la théorie quantique : Heisenberg, Schrödinger et Dirac

- Heisenberg et la mécanique des matrices (été 1925)

La construction de la théorie quantique : Heisenberg, Schrödinger et Dirac

- Heisenberg et la mécanique des matrices (été 1925)

Approche *“très mystique mais [...] sûrement exacte et profonde”*
(Max Born, à la lecture du travail de Heisenberg)

La construction de la théorie quantique : Heisenberg, Schrödinger et Dirac

- Heisenberg et la mécanique des matrices (été 1925)

Approche *“très mystique mais [...] sûrement exacte et profonde”*
(Max Born, à la lecture du travail de Heisenberg)

- Observation capitale de Heisenberg : dans la limite des très grands nombres quantiques ($1 \sim |n - m| \ll n, m$), la règle de Bohr $\nu_{nm} = \frac{1}{h}(E_n - E_m)$ donne une fréquence très voisine de la fréquence de rotation ν_n de l'électron sur son cercle

La construction de la théorie quantique : Heisenberg, Schrödinger et Dirac

- Heisenberg et la mécanique des matrices (été 1925)

Approche *“très mystique mais [...] sûrement exacte et profonde”*
(Max Born, à la lecture du travail de Heisenberg)

- Observation capitale de Heisenberg : dans la limite des très grands nombres quantiques ($1 \sim |n - m| \ll n, m$), la règle de Bohr $\nu_{nm} = \frac{1}{h}(E_n - E_m)$ donne une fréquence très voisine de la fréquence de rotation ν_n de l'électron sur son cercle
 - Modèle de Bohr : $E_n \propto \frac{1}{n^2} \implies \nu_{n+1n} \overset{n \gg 1}{\propto} \frac{1}{n^3}$

La construction de la théorie quantique : Heisenberg, Schrödinger et Dirac

- Heisenberg et la mécanique des matrices (été 1925)

Approche *“très mystique mais [...] sûrement exacte et profonde”*
(Max Born, à la lecture du travail de Heisenberg)

- Observation capitale de Heisenberg : dans la limite des très grands nombres quantiques ($1 \sim |n - m| \ll n, m$), la règle de Bohr $\nu_{nm} = \frac{1}{h}(E_n - E_m)$ donne une fréquence très voisine de la fréquence de rotation ν_n de l'électron sur son cercle
 - Modèle de Bohr : $E_n \propto \frac{1}{n^2} \implies \nu_{n+1n} \stackrel{n \gg 1}{\propto} \frac{1}{n^3}$
 - Période de révolution de l'électron sur le cercle de Bohr de rayon R_n : $T_n = \frac{2\pi R_n}{v} \propto \frac{n^2}{\sqrt{1/n^2}} \propto n^3 \iff \nu_n \propto \frac{1}{n^3}$

- Dans la limite des grands nombres quantiques, la règle de Bohr rejoint l'image néo-classique de l'atome

$$n \gg 1 : \nu_{n+1n} \simeq \nu_n$$

Quantique $\xrightarrow{\text{grands nombres quantiques}}$ Classique

- Analyse de Fourier d'un mouvement périodique : une pulsation ω et ses harmoniques $k\omega$, $k \in \mathbb{N}$ (premier nombre entier... pas quantique)

- Analyse de Fourier d'un mouvement périodique : une pulsation ω et ses harmoniques $k\omega$, $k \in \mathbb{N}$ (premier nombre entier... pas quantique)
- Quantification à la Bohr-Wilson-Sommerfeld $\oint p \, dq = nh$, $n \in \mathbb{N}$ (ou \mathbb{N}^*) (deuxième nombre entier... quantique)

- Analyse de Fourier d'un mouvement périodique : une pulsation ω et ses harmoniques $k\omega$, $k \in \mathbb{N}$ (premier nombre entier... pas quantique)
- Quantification à la Bohr-Wilson-Sommerfeld $\oint p \, dq = nh$, $n \in \mathbb{N}$ (ou \mathbb{N}^*) (deuxième nombre entier... quantique)
- Position q et moment conjugué p associés à des grandeurs à deux indices entiers k et n : $q_{n,k}$ et $p_{n,k}$

- Analyse de Fourier d'un mouvement périodique : une pulsation ω et ses harmoniques $k\omega$, $k \in \mathbb{N}$ (premier nombre entier... pas quantique)
- Quantification à la Bohr-Wilson-Sommerfeld $\oint p \, dq = nh$, $n \in \mathbb{N}$ (ou \mathbb{N}^*) (deuxième nombre entier... quantique)
- Position q et moment conjugué p associés à des grandeurs à deux indices entiers k et n : $q_{n,k}$ et $p_{n,k}$
- "Bricolage" à la main des indices ($n \gg \gg 1$: $n \simeq n \pm 1$) :

$$q_{100\,000, 100\,001} \rightarrow q_{99\,999, 100\,000}$$

- Analyse de Fourier d'un mouvement périodique : une pulsation ω et ses harmoniques $k\omega$, $k \in \mathbb{N}$ (premier nombre entier... pas quantique)
- Quantification à la Bohr-Wilson-Sommerfeld $\oint p \, dq = nh$, $n \in \mathbb{N}$ (ou \mathbb{N}^*) (deuxième nombre entier... quantique)
- Position q et moment conjugué p associés à des grandeurs à deux indices entiers k et n : $q_{n,k}$ et $p_{n,k}$
- "Bricolage" à la main des indices ($n \gg 1$: $n \simeq n \pm 1$) :

$$q_{100\,000, 100\,001} \rightarrow q_{99\,999, 100\,000}$$

Manipulation *innocente* pour les très grands nombres quantiques, *cruciale* pour les petits

Heisenberg, Born et Jordan (*Dreimännerarbeit*, 1926) :

$$[\mathbf{q}, \mathbf{p}] \stackrel{\text{d\u00e9f}}{=} \mathbf{qp} - \mathbf{pq} = i\hbar\mathbf{1} \quad (i^2 = -1)$$

- Schrödinger et la mécanique ondulatoire (Noël 1925-1926)

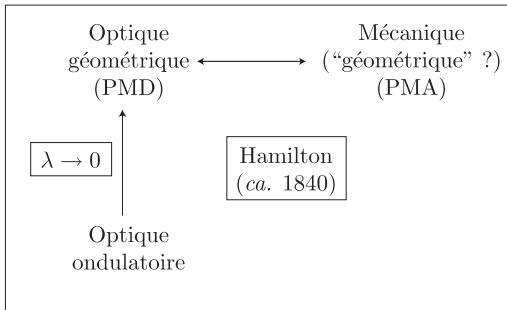
- Schrödinger et la mécanique ondulatoire (Noël 1925-1926)
 - Quatre articles en 1926, "*insurpassable monument de physique théorique*" (Max Born)

- Schrödinger et la mécanique ondulatoire (Noël 1925-1926)
 - Quatre articles en 1926, "*insurpassable monument de physique théorique*" (Max Born)
 - Analogie optico-mécanique de Hamilton (ca. 1840)

PMD \longleftrightarrow PMA

- Schrödinger et la mécanique ondulatoire (Noël 1925-1926)
 - Quatre articles en 1926, *“insurpassable monument de physique théorique”* (Max Born)
 - Analogie optico-mécanique de Hamilton (ca. 1840)

PMD \longleftrightarrow PMA



- Analogie optico-mécanique poussée à son terme grâce à $E = h\nu$

- Analogie optico-mécanique poussée à son terme grâce à $E = h\nu$

phase : $\phi(\vec{r}, t)$

$$\vec{k} = \vec{\nabla}\phi(\vec{r}, t) \quad \omega = -\frac{\partial\phi}{\partial t}$$

Planck - Einstein : $E = \hbar\omega \implies S = \hbar\phi ???$

Si oui, alors : $\vec{p} = \hbar\vec{k} \iff \lambda = \frac{h}{p}$: de Broglie

$\implies \boxed{S = \hbar\phi}$ (\implies Feynman)

action : $S(\vec{r}, t)$

$$\vec{p} = \vec{\nabla}S(\vec{r}, t) \quad E = -\frac{\partial S}{\partial t}$$

- Analogie optico-mécanique poussée à son terme grâce à $E = h\nu$

phase : $\phi(\vec{r}, t)$

$$\vec{k} = \vec{\nabla}\phi(\vec{r}, t) \quad \omega = -\frac{\partial\phi}{\partial t}$$

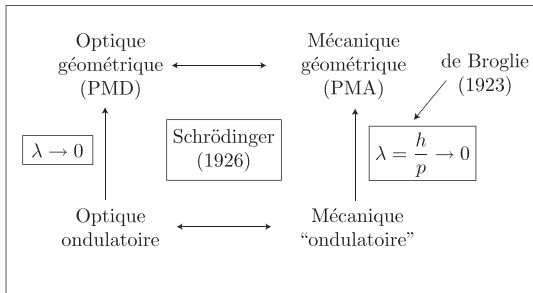
Planck - Einstein : $E = \hbar\omega \implies S = \hbar\phi ???$

Si oui, alors : $\vec{p} = \hbar\vec{k} \iff \lambda = \frac{h}{p}$: de Broglie

$\implies \boxed{S = \hbar\phi}$ (\implies Feynman)

action : $S(\vec{r}, t)$

$$\vec{p} = \vec{\nabla}S(\vec{r}, t) \quad E = -\frac{\partial S}{\partial t}$$



- *Analogie* avec l'équation des ondes \implies :

$$\boxed{i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = H(x, -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}) \Psi(x, t) \quad (i^2 = -1)}$$

... et, à nouveau les complexes s'invitent !

- Dirac, son équation et l'électrodynamique quantique (1928)

- Dirac, son équation et l'électrodynamique quantique (1928)
 - Unification des formalismes de Heisenberg et Schrödinger : deux façons d'écrire une seule et même théorie

- Dirac, son équation et l'électrodynamique quantique (1928)
 - Unification des formalismes de Heisenberg et Schrödinger : deux façons d'écrire une seule et même théorie
 - Première équation relativiste pour l'électron (et apparition "naturelle" du spin, mais...)

- Dirac, son équation et l'électrodynamique quantique (1928)
 - Unification des formalismes de Heisenberg et Schrödinger : deux façons d'écrire une seule et même théorie
 - Première équation relativiste pour l'électron (et apparition "naturelle" du spin, mais...)
 - Ici encore les complexes sont incontournables (et Cartan, 1913...)

- Dirac, son équation et l'électrodynamique quantique (1928)
 - Unification des formalismes de Heisenberg et Schrödinger : deux façons d'écrire une seule et même théorie
 - Première équation relativiste pour l'électron (et apparition "naturelle" du spin, mais...)
 - Ici encore les complexes sont incontournables (et Cartan, 1913...)
 - Prédiction du positron

- Dirac, son équation et l'électrodynamique quantique (1928)
 - Unification des formalismes de Heisenberg et Schrödinger : deux façons d'écrire une seule et même théorie
 - Première équation relativiste pour l'électron (et apparition "naturelle" du spin, mais...)
 - Ici encore les complexes sont incontournables (et Cartan, 1913...)
 - Prédiction du positron
 - Les bases de l'électrodynamique quantique

- Dirac, son équation et l'électrodynamique quantique (1928)
 - Unification des formalismes de Heisenberg et Schrödinger : deux façons d'écrire une seule et même théorie
 - Première équation relativiste pour l'électron (et apparition "naturelle" du spin, mais...)
 - Ici encore les complexes sont incontournables (et Cartan, 1913...)
 - Prédiction du positron
 - Les bases de l'électrodynamique quantique
 - Impasse d'une extraordinaire fécondité, ayant forcé l'émergence de la théorie quantique des champs

Les succès

Expliquer le monde et calculer avec $N \gg 1$ décimales

Expliquer le monde et calculer avec $N \gg 1$ décimales

- L'atome existe

Expliquer le monde et calculer avec $N \gg 1$ décimales

- L'atome existe
- Distinction isolant/conducteur

Expliquer le monde et calculer avec $N \gg 1$ décimales

- L'atome existe
- Distinction isolant/conducteur
- Origine du magnétisme micro- et macroscopique

Expliquer le monde et calculer avec $N \gg 1$ décimales

- L'atome existe
- Distinction isolant/conducteur
- Origine du magnétisme micro- et macroscopique
- Existence de la limite thermodynamique pour un système neutre (l'une des espèces doit être fermionique) et, plus généralement, stabilité de la matière à toutes les échelles : *“Sans la théorie quantique, l'univers s'effondrerait”* (Tomonaga).

Expliquer le monde et calculer avec $N \gg 1$ décimales

- L'atome existe
- Distinction isolant/conducteur
- Origine du magnétisme micro- et macroscopique
- Existence de la limite thermodynamique pour un système neutre (l'une des espèces doit être fermionique) et, plus généralement, stabilité de la matière à toutes les échelles : *“Sans la théorie quantique, l'univers collapserait”* (Tomonaga).
- Calculs difficiles mais d'une précision diabolique

$$a_e^{(\text{exp})} = 0.001\,159\,652\,181\,11, \quad a_e^{(\text{th})} = 0.001\,159\,652\,182\,79$$

*Limites : l'horizon de Planck,
au-delà duquel la physique d'aujourd'hui est aveugle*

$$\tau_{\text{P}} = \sqrt{\hbar G/c^5} \sim 3 \times 10^{-43} \text{ s} \qquad l_{\text{P}} = \sqrt{\hbar G/c^3} \simeq 9 \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$E_{\text{P}} = \sqrt{\hbar c^5/G} \simeq 4 \times 10^8 \text{ J} \simeq 2.5 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

La symétrie mise au premier plan

La symétrie mise au premier plan

- Réaffirmation décisive de l'importance de la notion de symétrie, et notamment de la structure de groupe

La symétrie mise au premier plan

- Réaffirmation décisive de l'importance de la notion de symétrie, et notamment de la structure de groupe
- Le spin de Uhlenbeck et Goudsmit (1926) est aussi celui de Cartan (1913)

Mission accomplie...

Mission accomplie...

- Accomplissement de A à Z du programme dévolu à une théorie physique : expliquer, calculer, prédire

Mission accomplie...

- Accomplissement de A à Z du programme dévolu à une théorie physique : expliquer, calculer, prédire
- Validation expérimentale jusque dans les affirmations les plus surprenantes et les plus controversées : “paradoxe” EPR (1935) et expériences d’Alain Aspect (~ 1982), réduction du paquet d’ondes et effet Zénon,...

... en dépit des étrangetés et des difficultés (?)

... en dépit des étrangetés et des difficultés (?)

- Bouleversement complet des dogmes (réalisme, localité, séparabilité...)

... en dépit des étrangetés et des difficultés (?)

- Bouleversement complet des dogmes (réalisme, localité, séparabilité...)
 - Les fentes d'Young et l'inexistence d'une trajectoire pour les tout petits objets

... en dépit des étrangetés et des difficultés (?)

- Bouleversement complet des dogmes (réalisme, localité, séparabilité...)
 - Les fentes d'Young et l'inexistence d'une trajectoire pour les tout petits objets
 - La non-séparabilité (intrication), la non-localité, la téléportation,...

... en dépit des étrangetés et des difficultés (?)

- Bouleversement complet des dogmes (réalisme, localité, séparabilité...)
 - Les fentes d'Young et l'inexistence d'une trajectoire pour les tout petits objets
 - La non-séparabilité (intrication), la non-localité, la téléportation,...
- La réduction du paquet d'ondes, *nécessité logique*

... en dépit des étrangetés et des difficultés (?)

- bouleversement complet des dogmes (réalisme, localité, séparabilité...)
 - Les fentes d'Young et l'inexistence d'une trajectoire pour les tout petits objets
 - La non-séparabilité (intrication), la non-localité, la téléportation,...
- La réduction du paquet d'ondes, *nécessité logique*
- La transition quantique \rightarrow classique : intrinsèquement ultra-singulière

- Impossibilité d'exprimer en termes du langage commun les *réalités* que la MQ décrit

- Impossibilité d'exprimer en termes du langage commun les *réalités* que la MQ décrit
- Interprétation(s) ("*I think I can safely say that nobody understands Quantum Mechanics*", Feynman)

En guise de conclusion

En guise de conclusion

- Robustesse de la théorie quantique : aucune expérience ne la prend en défaut, y compris dans ses prévisions les plus extravagantes pour le sens commun

En guise de conclusion

- Robustesse de la théorie quantique : aucune expérience ne la prend en défaut, y compris dans ses prévisions les plus extravagantes pour le sens commun
- Immensité de son pouvoir explicatif, de l'infiniment petit à l'infiniment grand, des particules élémentaires aux étoiles à neutrons... et au-delà

- Propositions inimaginables dans la pensée classique

- Propositions inimaginables dans la pensée classique
 - La cryptographie quantique

- Propositions inimaginables dans la pensée classique
 - La cryptographie quantique
 - L'effet Zénon quantique

- Propositions inimaginables dans la pensée classique
 - La cryptographie quantique
 - L'effet Zénon quantique
 - Les sauts quantiques

- Propositions inimaginables dans la pensée classique
 - La cryptographie quantique
 - L'effet Zénon quantique
 - Les sauts quantiques
 - La téléportation quantique

- Propositions inimaginables dans la pensée classique
 - La cryptographie quantique
 - L'effet Zénon quantique
 - Les sauts quantiques
 - La téléportation quantique
 - L'ordinateur quantique (?)

*“Si le paquet d'ondes ne collapsait pas,
c'est l'univers qui collapserait”*

*“Si le paquet d'ondes ne collapsait pas,
c'est l'univers qui collapserait”*

*Que f(s)erions-nous sans les nombres complexes, ces
nombres qui décidément n'ont plus rien d'imaginaire(s) ?*