CHAMPS & PARTICULES

DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE À LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS

Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

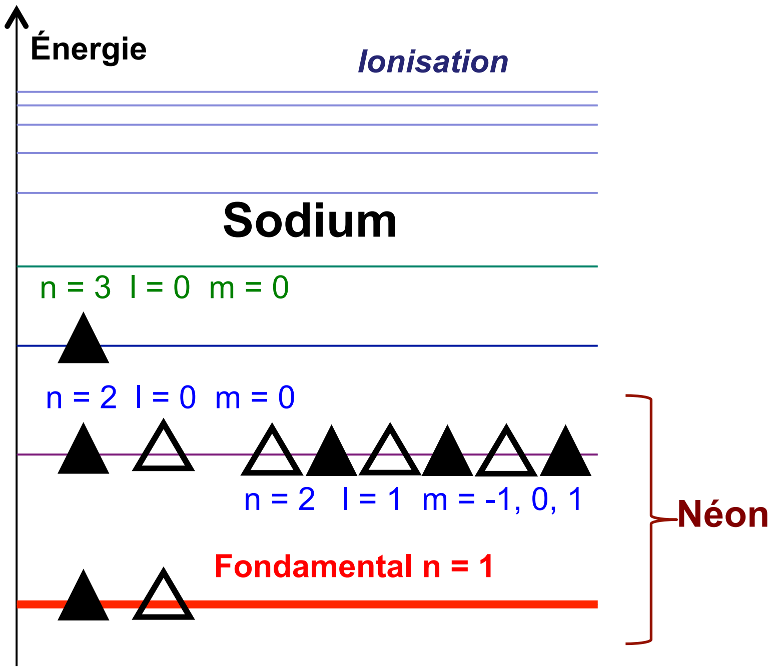
SPIN

L'équation de Schrödinger n'est pas la fin de l'histoire !

- Elle présente en effet quelques menus inconvénients
  - elle n'a pas de place pour le spin de l'électron ☞ Pauli (1927)
  - états quantiques stationnaires de l'électron ⇔ pas de transition d'un état à un autre ⇔ pas d'émission ou d'absorption de photons ☞ Dirac (1927)…
  - nombre constant de quantons (électrons, *photons*…) ☞ Dirac (1927)…
  - elle n'est pas relativiste ☞ Dirac (1928)
- Sans oublier les difficultés conceptuelles de la mécanique quantique
  - espace vectoriel des états ⇔ superposition ⇔ intrication ☞ Einstein, Bell, Aspect
  - double loi d'évolution au cours du temps
    - déterministe et réversible en général (équation de Schrödinger)
    - stochastique et irréversible lors d'une mesure (axiome de projection)
  - interprétation probabiliste des poids lors d'une décomposition en états propres

Wolfgang Pauli et structure atomique

- Permutations et statistiques quantiques
  - Bose-Einstein $|\psi\rangle = (|1,2\rangle + |2,1\rangle)/\sqrt{2}$
  - Fermi-Dirac $|\psi\rangle = (|1,2\rangle - |2,1\rangle)/\sqrt{2}$
- → principe de Pauli (1925) : 2 fermions ne se trouvent jamais dans le même état quantique
- → Explication de la structure atomique
  - les électrons ne peuvent pas tous être dans l'état d'énergie minimale
  - ils occupent des orbitales d'énergie de plus en plus élevée
  - → explication du tableau de Mendeleiev



Avec un nombre quantique à *deux* valeurs, ▲ et △ par exemple, le **spin** (Pauli 1924)

L'équation de Schrödinger avec spin

- Pauli (1924) : *«une double valeur indescriptible classiquement»*
- Uhlenbeck et Goudsmit (1925) : un moment angulaire intrinsèque de l'électron s = ½ ħ
- Pauli (1927) : un fonction d'onde à deux composantes $\begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}$ ➡ spineur
- ➡ qubit à deux états I1> et I2> ➡ rotations SU(2)
- ➡ matrices « de Pauli » $\sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ $\sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ $\sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
- ➡ valeurs propres ± 1 (i.e. ± ½ ħ) ➡ vecteurs propres Iψ_1> et Iψ_2> = spin ☝ et spin ☟

$$\sigma_3 \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_1 \\ -\psi_2 \end{pmatrix}$$

- ➡ équation de Pauli-Schrödinger $\quad i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}$

L'équation de Pauli-Schrödinger

- Pour des électrons libres, les deux composantes sont découplées :

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}H_{11} & H_{12}\\ H_{21} & H_{22}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}P^2/2m & 0\\ 0 & P^2/2m\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{pmatrix}=\frac{1}{2m}(\sigma.P)^2\begin{pmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{pmatrix}$$

- Pour des électrons couplés au rayonnement, Pauli donne la forme

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{pmatrix}=\left[\frac{1}{2m}\left(\sigma.\boxed{(P-iqA)}\right)^2+qV\right]\begin{pmatrix}\psi_1\\ \psi_2\end{pmatrix}$$

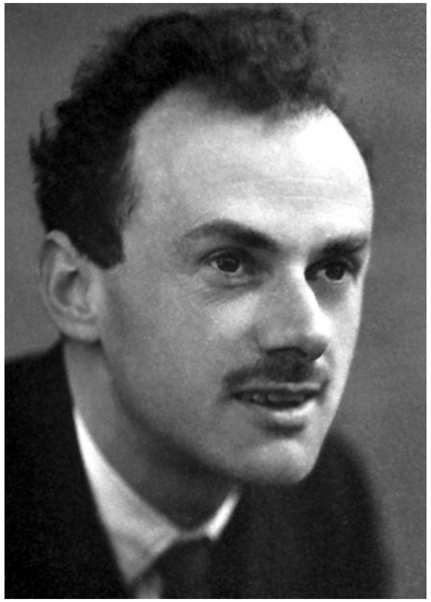
- où $\boldsymbol{A}$ est le potentiel vecteur ($B = \nabla \mathrm{x} A$) et V le potentiel scalaire ($E = -\nabla V - \partial A/\partial t$)

- ➡ pas de changement par rapport à Schrödinger sauf en présence d'un champ magnétique B ➡ terme d'interaction ∝ $\sigma.B$ (➛ explique Stern-Gerlach)

- Dans un atome, le mouvement relatif des électrons par rapport au noyau ➡ champ magnétique B (proportionnel au moment angulaire L) ➡ terme d'interaction ∝ $\sigma.L$ dit couplage spin-orbite

ET LES PHOTONS ?

Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984)



- 1925 : analyse de la mécanique des matrices de Heisenberg (indépendamment de Born et Jordan) ➡ rôle central des opérateurs (*q*-nombres) et de leurs commutateurs
- 1926 : statistique de Fermi-Dirac, représentation d'interaction
- 1927 : théorie quantique de l'émission et de l'absorption du rayonnement électromagnétique
- 1928 : équation relativiste pour l'électron ➡ antimatière
- 1930 : *Les bases de la mécanique quantique*
- 1931 : monopôle magnétique (➡ quantification de la charge électrique)
- 1933 : prix Nobel (avec Schrödinger), bases de la théorie quantique des champs
- 1938 : formalisme moderne de la mécanique quantique (δ_{Dirac}, bra-ket…)
- 1949 : quantification avec contraintes (➡ champs de jauge, gravitation quantique)

Émission et absorption du rayonnement

- Le raisonnement de Dirac : 1° étape
  - séparer le hamiltonien **H** du rayonnement en un hamiltonien « libre » $\mathbf{H_0}$ et un terme d'interaction avec la matière $\mathbf{H_1}$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H_0} + \mathbf{H_1}$$

  - chercher les états propres de $\mathbf{H_0}$ [⇔ représentation d'interaction]
  - ➡ états *stationnaires* $|n\rangle$ où *un* photon a une énergie E_n
  - ➡ état quelconque d'un photon en interaction : $|\psi\rangle = \Sigma_n\, \alpha_n(t)\, |n\rangle$ [$|n\rangle$ est une base]
  - ➡ équation de Schrödinger

$$i\hbar\partial/\partial t\, |\psi\rangle = [\mathbf{H_0} + \mathbf{H_1}]\, |\psi\rangle \quad ➡ \quad i\hbar\partial/\partial t\, \alpha_m(t) = \alpha_m E_m + \Sigma_n\, \alpha_n(t) \boxed{\langle m|\, \mathbf{H_1}\, |n\rangle}$$

  - ➡ connaissant $\mathbf{H_1}$ déterminer les $\alpha_n(t) = \alpha_n(0)\, e^{-iE_n t/\hbar}$

transition $|n\rangle \rightarrow |m\rangle$
induite par l'interaction $\mathbf{H_1}$

- Mais quel lien avec la transition d'un *électron* d'un niveau à un autre dans un atome ?

Émission et absorption du rayonnement

Supposition implicite : les photons sont indépendants ⇔ ils n'interagissent pas *entre eux*

- Le raisonnement de Dirac : 2° étape
  - considérer que l'on peut avoir N_n photons dans l'état In> ≡ IN_n>
  - ➡ états IN_1, N_2, N_3,…> avec N_1 photons d'énergie E_1, N_2 d'énergie E_2, etc.
  - ⇔ description d'un bain de rayonnement ⇔ champ électromagnétique
- Le raisonnement de Dirac : 3° étape
  - il existe un état I∞_0> contenant un nombre quelconque (de fait infini) de photons d'énergie **nulle**
  - ➡ émission d'un photon d'énergie E_n ⇔ transition de l'état I∞_0…N_n…> à l'état I∞_0…N_n**+1**…>
  - [accompagnée par la transition de l'électron d'un état d'énergie E_0 à un état d'énergie E_0-E_n]
  - ➡ absorption d'un photon d'énergie E_n ⇔ transition I∞_0…N_n…> ➛ I∞_0…N_n**–1**…>
  - [le nombre de photons est conservé]

Émission et absorption du rayonnement

- Le raisonnement de Dirac : 4° étape
  - comment se fait la transition de l'état $|\infty_0 \ldots N_n \ldots\rangle$ à l'état $|\infty_0 \ldots N_n\mathbf{+1} \ldots\rangle$?
  - par un opérateur nécessairement, mais lequel ?
  - Dirac promeut le *c*-nombre α_n [poids de l'état à N_n photons] au rôle d'opérateur (*q*-nombre)

$$\boldsymbol{\alpha}_n |\infty_0 \ldots N_n \ldots\rangle = |\infty_0 \ldots N_n+1 \ldots\rangle$$

  - cet opérateur $\boldsymbol{\alpha}_n$ déplace un photon de l'énergie zéro à l'énergie E_n
  - le c-nombre conjugué α_n^* est promu au rôle d'opérateur conjugué $\boldsymbol{\alpha}_n^\dagger$
  - cet opérateur $\boldsymbol{\alpha}_n^\dagger$ déplace un photon de l'énergie E_n à l'énergie zéro

$$\boldsymbol{\alpha}_n^\dagger \; |\infty_0 \ldots N_n \ldots\rangle = |\infty_0 \ldots N_n - 1 \ldots\rangle$$

  - ➡ commutateurs $[\boldsymbol{\alpha}_n , \boldsymbol{\alpha}_n^\dagger] = \mathbf{I}$ et $[\boldsymbol{\alpha}_n , \boldsymbol{\alpha}_m^\dagger] = 0$ si $n \neq m$
- Dernière étape
  - un photon d'énergie zéro n'existe pas ⇔ l'état $|\infty_0\rangle = |\varnothing\rangle$ est un état sans photon (« vide »)
  - ➡ $\boldsymbol{\alpha}_n$ crée un photon d'énergie E_n
  - ➡ $\boldsymbol{\alpha}_n^\dagger$ détruit un photon d'énergie E_n

On crée et on annihile des photons
Pourquoi pas un électron ?
Ou un proton ?

Règle d'or « de Fermi »

- La décomposition $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{H}_1$ introduite par Dirac est extrêmement utile :
- ➡ vecteurs propres $|n\rangle$ de $\mathbf{H}_0$ ➡ $|\psi\rangle = \Sigma_n\, \alpha_n |n\rangle$

$$\Rightarrow \quad i\hbar\partial/\partial t\ \alpha_m(t) = \alpha_m E_m + \Sigma_n\ \alpha_n(t)\ \langle m|\ \mathbf{H}_1\ |n\rangle$$

- ➡ équation (à résoudre !) pour obtenir les transitions (via $\mathbf{H}_1$) dans un système quantique
- ➡ probabilité de la transition $|n\rangle \to |m\rangle$ $\qquad \mathcal{P}_{nm} \propto |\langle m|\ \mathbf{H}_1\ |n\rangle|^2$
- relation appelée « règle d'or » par Fermi
  - ➡ application à la transition d'un électron d'un état atomique à un autre ($\mathbf{H}_0$ = interaction avec le noyau, $\mathbf{H}_1$ = interaction avec un champ électromagnétique externe)
  - ➡ amplitude de diffusion de deux quantons, par ex. $e^- + e^- \to e^- + e^-$ ($\mathbf{H}_0$ = quantons libres, $\mathbf{H}_1$ = interaction électromagnétique)
  - ➡ calcul de la probabilité de désintégration ß d'un noyau ($\mathbf{H}_0$ = interaction forte, $\mathbf{H}_1$ = interaction faible)

L'ÉQUATION DE DIRAC

Comment écrire une équation relativiste ?

- Équation de Schrödinger (quanton de masse m sans spin ni interaction)

$$i\hbar\, \partial/\partial t\, |\psi\rangle = \mathbf{H}\, |\psi\rangle = \mathbf{P}^2/2m\, |\psi\rangle$$

- *Le terme $P^2/2m$ est l'énergie (cinétique) en mécanique classique*
- Quantification : impulsions P_i ➛ opérateurs $\mathbf{P}_i$ et $\mathbf{P}^2 = \Sigma_i\, \mathbf{P}_i^2$
- Dans l'espace tridimensionnel des positions $\{x_1, x_2, x_3\} \equiv x$
  - $\langle x|\psi\rangle = \psi(x)$
  - $\langle x|\, \mathbf{P}_i\, |\psi\rangle = i\hbar\, \partial/\partial x_i\ \psi(x)$
  - $\langle x|\, \mathbf{P}^2 |\psi\rangle = -\ \hbar^2\, \Sigma_i\, \partial^2/\partial x_i^2\ \psi(x) = -\ \hbar^2\, \Delta\psi(x)$

$$\Rightarrow I\hbar\, \partial/\partial t\ \psi = -\hbar^2/2m\ \partial^2/\partial x^2\ \psi = E\ \psi$$

dérivée première

dérivée seconde

- En mécanique relativiste $E = P^2/2m$ ➛ $E^2 = P^2 + m^2$ (incluant l'énergie de masse)

Comment écrire une équation relativiste ?

- Relativité (restreinte) ⇔ espace et temps symétriques
- et remplacement $E = P^2/2m$ ➛ $E^2 = P^2 + m^2$
- ➡ Dérivées secondes ➡ équation de Klein-Gordon $\partial^2\psi/\partial t^2 = \partial^2\psi/\partial x^2 \ldots + m^2\psi$
- *Intéressant, mais ne décrit pas très bien l'atome d'hydrogène (~~structure fine~~)*
- ➡ Dérivées premières ? ➛ $E = \pm [P^2 + m^2]^{1/2}$ ➡ $\mathbf{H} = \pm [P^2 + m^2]^{1/2} = ???$
- Dirac (1928) ➡ $\mathbf{H} = \Sigma_i \alpha_i \mathbf{P}_i + \alpha_0 m$
- ⇔ $i\hbar\, \partial\psi/\partial t = -i\hbar\, [\alpha_1 \partial\psi/\partial x_1 + \alpha_2 \partial\psi/\partial x_2 + \alpha_3 \partial\psi/\partial x_3] + \alpha_0 m\, \psi$
- avec la contrainte $[\Sigma_i \alpha_i \mathbf{P}_i + \alpha_0 m]^2 = \mathbf{P}^2 + m^2$
- impossible à satisfaire si les α_i sont des nombres (scalaires) ➛ matrices
- Dirac : solution la plus simple : 4 matrices 4x4 ➡ ψ a 4 composantes

Les matrices de Dirac

- Les 4 matrices γ_μ de Dirac sont [avec $\gamma_0 = \alpha_0$ et $\gamma_i = \alpha_0\alpha_i$]

$$\gamma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_1$$

$$\gamma_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_2$$

$$\gamma_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3$$

$$\gamma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{I}$$

- Dirac put ainsi écrire une équation relativiste différentielle du 1° degré pour l'électron

L'équation de Dirac

- Elle est simplement :

$$i\hbar\,[\gamma_0 \partial\psi/\partial t - \gamma_1 \partial\psi/\partial x_1 - \gamma_2 \partial\psi/\partial x_2 - \gamma_3 \partial\psi/\partial x_3] - m\,\psi = 0$$

- où ψ est un ~~vecteur~~ spineur à quatre composantes (ψ_1, ψ_2, ψ_3, ψ_4), mais ce n'est pas un *quadri*vecteur de l'espace-temps
- ou plus simplement

$$i\hbar\,\Sigma_\mu \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\,\psi = 0$$

- En présence d'un champ électromagnétique ☚ *quadri*vecteur $A_\mu = (V, A_1, A_2, A_3)$

$$\partial_\mu \rightarrow \partial_\mu + i\,q/\hbar\,A_\mu$$

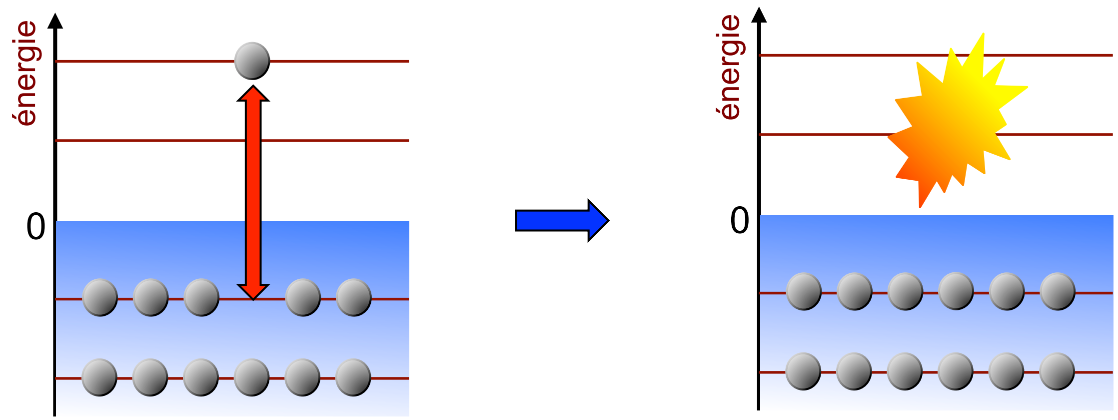
- Pour des énergies E << mc², l'équation de Dirac redonne l'équation de Schrödinger, ou plus exactement l'équation de *Pauli*-Schrödinger en raison de la présence des matrices 2x2 de Pauli dans les matrices 4x4 de Dirac

Quatre composantes ?

- Dans le spineur $\psi = (\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4)$ les deux premières composantes correspondent aux deux composantes du spin de l'électron introduites par Pauli
- Mais les deux autres ?
- Forme des matrices γ_μ ➡ relation énergie-masse inversée pour (ψ_3, ψ_4)
- Origine: relation relativiste $E^2 = P^2+m^2 \Leftrightarrow E = \pm [P^2+m^2]^{½} \Leftrightarrow$ doublement des solutions, avec une solution d'énergie négative
  - solution de *masse* négative ? ➡ aberrations avec la dynamique
  - solution d'*énergie* négative non-physique ? ➡ transition *électromagnétique* inévitable depuis une solution d'énergie positive
  - solution de *charge* positive (inverse de l'électron) ? ➡ serait-ce le proton ?
  - ➡ non, les deux (paires de) solutions ont la même masse m
  - et de plus l'atome d'hydrogène s'autodétruirait presque instantanément (Oppenheimer 1930)
- ➡ idée des « trous »

Des trous dans la mer ?

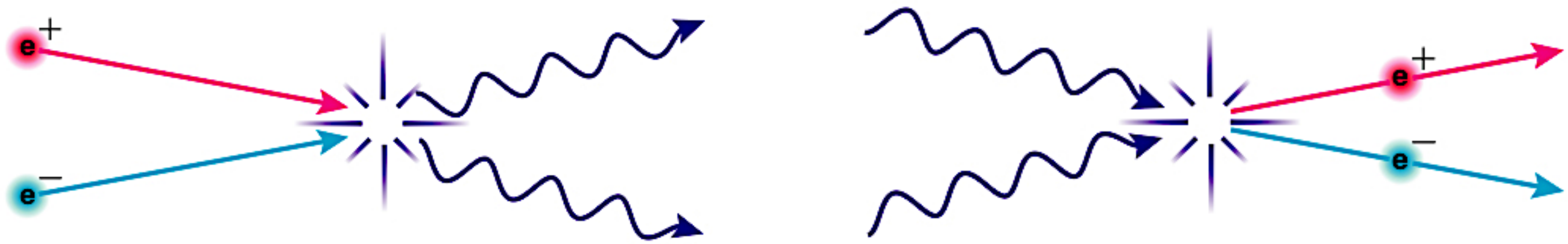
- Les « trous »
  - Les électrons sont des fermions ➡ principe d'exclusion de Pauli
  - Tous les états d'énergie négative occupés ➡ aucune transition possible ➡ stabilité
    └→ « mer » de Dirac
  - État d'énergie négative libre ("trou") ➡ transition inévitable depuis un état d'énergie positive
  - ⇔ disparition simultanée du "trou" et de l'électron, avec libération d'énergie



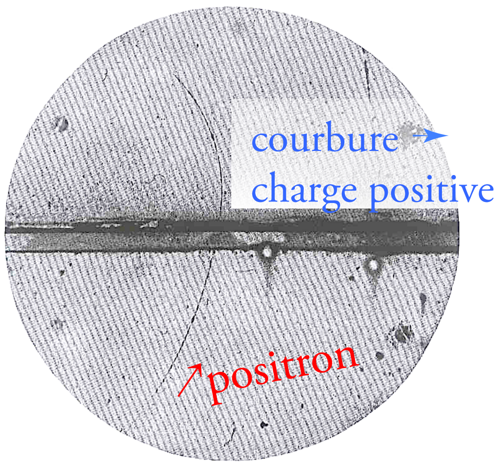
  - et en sens inverse disparition d'énergie et apparition simultanée d'un électron et d'un "trou"
- Le trou se comporte exactement comme un électron qui aurait une charge positive

Positron

- Dirac 1931 : les composantes (ψ_3, ψ_4) décrivent un électron de charge positive, un anti-électron, pouvant s'annihiler avec un électron



- Anderson 1932
  - observation dans les rayons cosmiques d'une particule légère (~ électron) mais de charge positive
  - ➡ le positron
  - ➡ prix Nobel 1936
  - [plusieurs observations antérieures, non reconnues comme telles

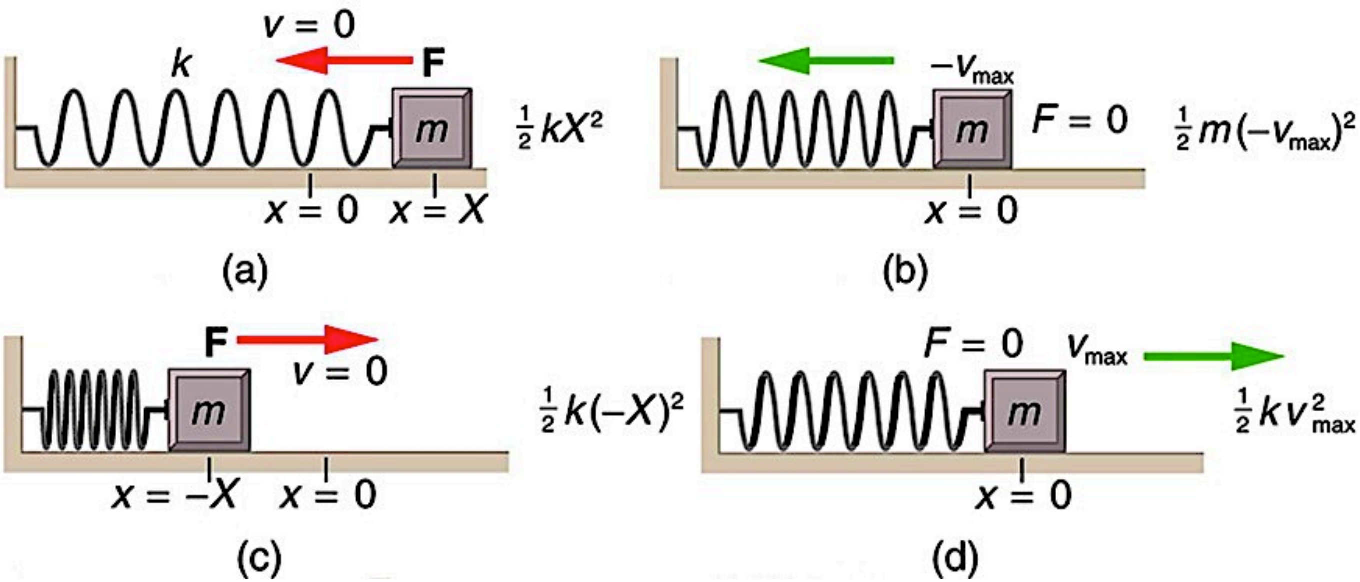


- Idée généralisée : *toute* particule possède une anti-particule
  - même masse, charges et nombres quantiques opposés
  - parfois particule ≡ anti-particule (exemple: le photon)

THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS

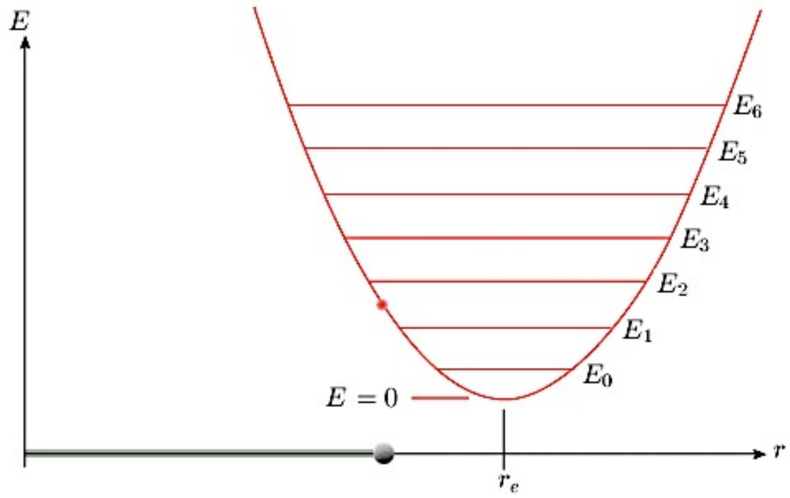
Oscillateur harmonique

- Masse sans frottement accrochée à un ressort



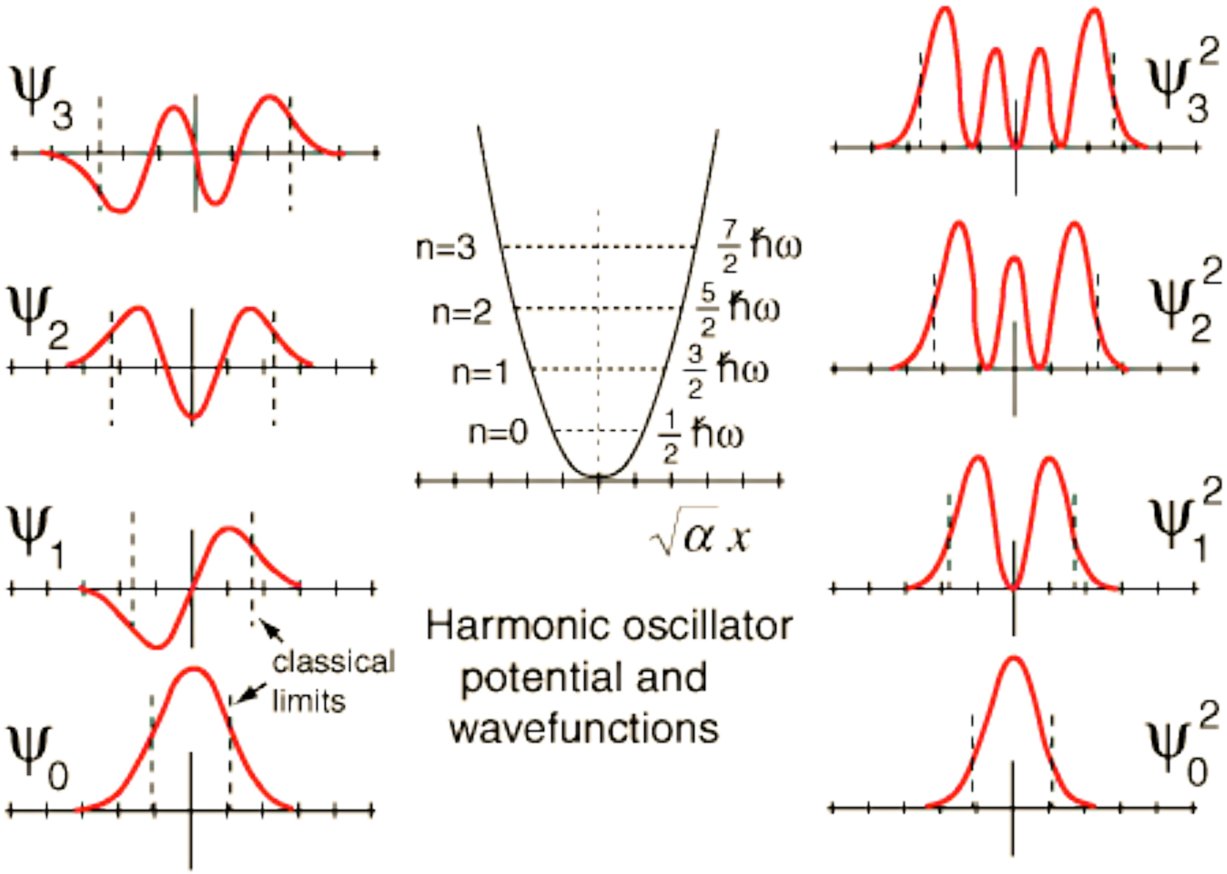
- Molécule diatomique
- Atome ? ⇏ les bons niveaux d'énergie

Oscillateur harmonique



- Potentiel parabolique $V(x) = \frac{1}{2} m \omega^2 x^2$
- $\Rightarrow$ équation de Schrödinger
- $-\hbar^2/2m\, \partial^2\psi(x)/\partial x^2 + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \psi(x) = E\, \psi(x)$
- essai : $\psi(x) = \psi(0) \exp\{-\alpha x^2\}$
- $\Rightarrow \alpha = m\omega/\hbar$
- $\Rightarrow E_0 = \frac{1}{2} \hbar\omega > 0$
  - énergie minimale E_0 non-nulle $\Leftrightarrow$ inégalité de Heisenberg
  - $\psi(x)$ ne s'annule jamais $\Leftrightarrow$ probabilité non-nulle d'être à une distance arbitrairement grande de l'origine ($\neq$ avec le cas classique où le déplacement est limité par l'énergie disponible)
- Solution générale $\Rightarrow \psi_n(x) = \psi(0) \exp\{-\alpha x^2\} H_n(\sqrt{\alpha}\, x)$ [les H_n sont les polynômes de Hermite]
- $\Rightarrow \psi_n(x)$ oscille de plus en plus rapidement quand n augmente
- et $E_n = E_0 + n\, \hbar\omega$ $(\hbar\omega = h\nu)$

Oscillateur harmonique



Probabilité maximale près des bords [↗ avec n]

⇌ cas classique

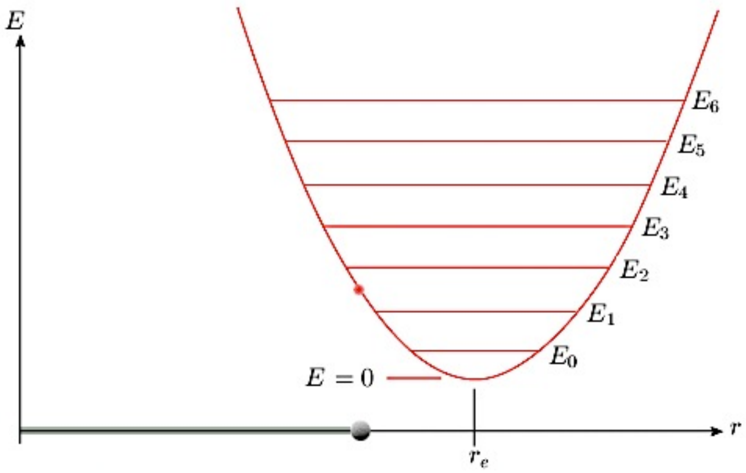
Probabilité maximale près de l'origine

D'après http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum

De l'oscillateur harmonique à la théorie quantique des champs

- Oscillateur harmonique ➡ valeurs propres du hamiltonien $E_n = [n + ½]\,\hbar\omega$

- ➡ 1° interprétation : un quanton qui peut être
  - dans l'état de plus basse énergie $E_0 = ½\,\hbar\omega$
  - dans l'un des états excités $E_n = [n + ½]\,\hbar\omega$
  - état propre du hamiltonien ⇔ état stationnaire
  - [mais transition éventuelle par action externe]



- ➡ 2° interprétation :
  - pas de quanton ➛ énergie du « vide » $E_0 = ½\,\hbar\omega$
  - un quanton ➛ énergie $\hbar\omega$ (+ énergie du vide)
  - deux quantons ➛ énergie $2\,\hbar\omega$ (+ énergie du vide)
  - n quantons ➛ énergie $n\,\hbar\omega$ (+ énergie du vide)
  - transition ⇔ création ou annihilation d'un quanton porteur d'une énergie $\hbar\omega = h\,\nu$

- ➡ collection de N oscillateurs harmoniques : modèle d'un champ quantique

L'espace de Vladimir Alexandrovitch Fock

- 1 quanton ➡ espace vectoriel E_1 ➡ états $|\psi>$
- 2 quantons identiques ➡ espace vectoriel $E_2 = E_1 \otimes E_1$ ➡ états $|\psi_1, \psi_2>$
  - quantons indiscernables ➡ statistiques de Bose-Einstein ou de Fermi Dirac
  - bosons ➡ symétrisation ➡ espace vectoriel $\mathcal{S}\{E_2\}$ ➡ états $|\psi_1, \psi_2> + |\psi_2, \psi_1>$
  - fermions ➡ antisymétrisation ➡ espace vectoriel $\mathcal{A}\{E_2\}$ ➡ états $|\psi_1, \psi_2> - |\psi_2, \psi_1>$
- n quantons identiques ➡ espace vectoriel $E_n = E_1 \otimes E_1 \ldots \otimes E_1$ ➡ états $|\psi_1, \psi_2, \ldots \psi_n>$
  - quantons indiscernables ➡ espace vectoriel $\mathcal{S}\{E_n\}$ ou $\mathcal{A}\{E_n\}$
- Quantons non conservés ➡ espace vectoriel à 0, 1, 2, … n … quantons
- ➡ $E = E_1 \oplus E_2 \oplus \ldots \oplus E_n \oplus \ldots$ $\oplus$ = *somme directe d'espaces*
- ➡ il existe donc des opérateurs envoyant un état de E_n vers un état de E_m $(m \neq n)$
- ➡ opérateur de création $E_n \rightarrow E_{n+1}$
- ➡ opérateur d'annihilation $E_n \rightarrow E_{n-1}$
- et un espace vectoriel E_0 ne contenant aucun quanton ➡ $\boxed{E = E_0 \oplus E_1 \oplus \ldots \oplus E_n \oplus \ldots}$

Théorie quantique des champs

Théorie à un quanton

- libre
- ou en interaction avec un champ extérieur
- ex: oscillateur harmonique, Schrödinger, Pauli, Dirac et l'atome d'hydrogène

Théorie à n quantons

- libres
- ou en interaction entre eux
- ou avec un champ extérieur
- ex: physique atomique, moléculaire, physique du solide

Théorie à un nombre variable de quantons

- libres
- ou en interaction entre eux
- ou avec un champ extérieur

➡ existence d'un vide (état sans quanton)
➡ existence d'opérateurs de création et d'annihilation

- ex: théorie de Dirac du rayonnement, théorie de Fermi de l'interaction faible, théorie de Yukawa de l'interaction forte, théories de jauge

Merci de votre attention !