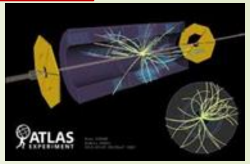
Un peu de Physique pour comprendre le monde moderne (2019) – cours avancé

Bernard Remaud

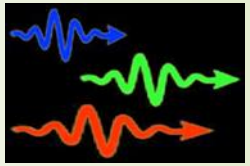
Ch 6 – Au-delà de l'équation de Schrödinger

Le domaine d’application de l’équation de Schrödinger (1925) est limité :

- Elle ne traite pas les phénomènes de création et d’annihilation des particules



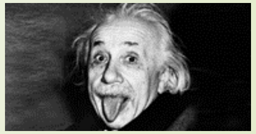
- Elle ne traite que des particules ayant une masse au repos non nulle



- Elle n’est pas compatible avec la relativité restreinte (transformation de Lorentz), limitée aux particules de vitesse v<c.

- Le champ de forces donnant lieu au potentiel V(x) est traité de manière classique ; il n’est pas couplé avec la dynamique des particules (une particule chargée en mouvement génèreson propre champ)

- Enfin, et surtout, elle décrit les particules/ondes dans un référentiel (espace-temps) fixe ; elle n’est pas compatible avec la Relativité Générale



Au-delà de l'équation de Schrödinger

L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques

Retour- Les fonctions d'onde de l'oscillateur harmonique – 1 dimension

L'équation de Schrödinger pour une particule de masse m dans un puits de potentiel parabolique (états stationnaires)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2}+\frac{1}{2}m\omega x^2 A(x)=E\,A(x)$$

Les solutions directes font intervenir les polynômes d'Hermite $H_n(x)$ (X, Norm Sup, 1822-1901)

$$A_n(x)=|n>=\left(\frac{m\omega}{\pi\hbar}\right)^{\frac{1}{4}}\frac{1}{\sqrt{2^n n!}}H_n\left(\sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}}\,x\right)e^{-\frac{m\omega x^2}{2\hbar}}$$

Avec les niveaux d'énergie quantifiés, équidistants $E_n=\left(n+\frac{1}{2}\right)\hbar\omega$

L'équation se déduit du hamiltonien : $\hat{H}=\frac{\widehat{p_x}^2}{2m}+\frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2$

Energie cinétique

Energie potentielle

Opérateurs de création et d'annihilation

Une normalisation des opérateurs du hamiltonien de l'oscillateur harmonique :

$$\hat{X} = \sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}}\,\hat{x}\,;\ \hat{P} = \frac{p_x}{\sqrt{m\omega\hbar}}\ et\ \hat{\mathrm{H}} = \frac{\hat{H}}{\hbar\omega}$$

montre la symétrie de l'hamiltonien :

$$\hat{\mathrm{H}} = \frac{1}{2}\left(\hat{P}^2 + \hat{X}^2\right) = \frac{1}{2}\left(\hat{X} + i\hat{P}\right)\left(\hat{X} - i\hat{P}\right) + \frac{1}{2}$$

Le terme supplémentaire ½ vient du fait que les opérateurs $\hat{P}$ et $\hat{X}$ ne commutent pas $\hat{P}\hat{X} \neq \hat{X}\hat{P}$

On définit : $\hat{a} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\hat{X} + i\hat{P}\right)\ et\ \hat{a}^{\dagger} = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\hat{X} - i\hat{P}\right)$ que l'on fait agir sur une fonction d'onde |n> :

$\hat{a}|n> = \sqrt{n}|n-1>$, opérateur d'annihilation

$\hat{a}^{\dagger}|n> = \sqrt{n+1}\,|n+1>$, opérateur de création

$\hat{a}^{\dagger}\hat{a}|n> = n|n>$, opérateur de comptage

$$\hat{H} = \left(\hat{a}^{\dagger}\hat{a} + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$$

Nous venons d'inventer les opérateurs de création et d'annihilation, qui seront utilisés dans les modèles d'interaction où le nombre de particules n'est pas conservé.

Au-delà de l'équation de Schrödinger

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n'est pas conservé

Comment introduire la relativité restreinte pour les particules rapides ?

- L'énergie d'une particule en mouvement : $E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma mc^2$
- Une formulation valide (invariante) quel que soit le référentiel

$$\underbrace{}_{\text{Énergie cinétique}} \quad E^2 = p^2c^2 + m^2c^4 \quad \underbrace{}_{\text{Énergie au repos}}$$

Énergie cinétique

Énergie au repos

Associons les opérateurs :

$$p_x = -i\hbar\frac{\partial}{\partial x};\ p_y = -i\hbar\frac{\partial}{\partial y};\ p_z = -i\hbar\frac{\partial}{\partial z}\ ;\ \vec{p} = -i\hbar\vec{\nabla}$$

$$E = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$$

$$\hbar^2\left\{\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}\right\} = -\,m^2c^2\Psi$$

Au-delà de Schrödinger : équation de Klein-Gordon

Equation de Klein-Gordon (1926)

$$\hbar^2 \left\{ \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right\} = -\, m^2 c^2 \Psi$$

Le mariage réussi de la mécanique quantique et de la relativité ?

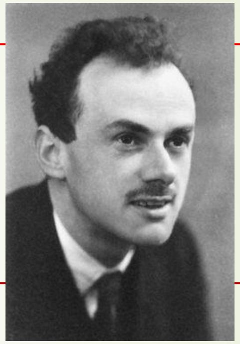
Mais

- Le temps intervient au carré : nécessité de donner la valeur de Ψ et de sa dérivée comme conditions initiales
- $|\Psi|^2$ ne peut pas être considérée comme une densité de probabilité

Décrit les particules relativistes sans spin et trouve son application en théorie quantique des champs (voir plus loin) et le boson de Higgs

- L’équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L’oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n’est pas conservé
- L’équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou1)

Si $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ ne marche pas , pourquoi pas $E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$?
La racine carrée d'un opérateur ????



Dirac (1928)
« Cet équilibre sur le sentier vertigineux entre le génie et la folie est terrible » (Einstein)

Recette :

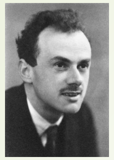
1) Réécrire l'équation $\left\{\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right\} \Psi = -k^2\Psi \,;\, \mathrm{k}^2 = \frac{m^2\,c^2}{\hbar^2}$
2) Essayer de factoriser le premier membre $\left\{A\frac{\partial}{\partial x} + B\frac{\partial}{\partial y} + C\frac{\partial}{\partial z} + D\frac{i}{c}\frac{\partial}{\partial t}\right\}^2$
3) Constater les contraintes

$$AB = AC = AD = \cdots = 0 \,;\, |A|^2 = \cdots = |D|^2 = 1$$

4) Utiliser vos **vastes connaissances mathématiques et votre imagination créatrice** :

A, B, C, D ne sont pas des nombres,
mais des matrices 4x4 , et Ψ a 4 composantes

Au-delà de Schrödinger : équation de Dirac



$$i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = (mc^2\alpha_0 + c\vec{\alpha}.\vec{p})\Psi$$

$$\Psi = \begin{pmatrix} \psi^{\uparrow} \\ \psi^{\downarrow} \\ \varphi^{\uparrow} \\ \varphi^{\downarrow} \end{pmatrix}$$

Ψ est une fonction d'onde à 4 composantes :

- les 2 premières correspondent aux 2 valeurs de spin $\pm$ 1/2
- les 2 autres (énergies négatives)???
- Les α_0 , α_x , α_y , α_z sont des matrices 4X4 (liées aux matrices de Pauli)

Le « coup » réussi de Dirac :

- Les composantes de Ψ sont des fonctions d'onde au sens classique du terme ; $|\Psi_i|^2$ sont des densités de probabilité
- Le spin découle « naturellement » de la mise en compatibilité de la mécanique quantique avec la relativité restreinte
- Les équations différentielles sont linéaires (comme Schrödinger)
- L'équation de Dirac apporte des corrections aux calculs des niveaux atomiques et à leur transition, en meilleur accord avec l'expérience.

Au-delà de l'équation de Schrödinger

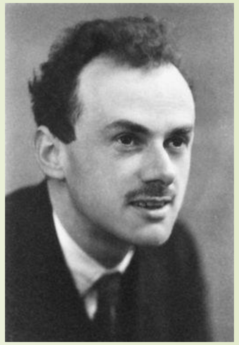
- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n'est pas conservé
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou1)
- L'équation de Dirac est compatible avec la Relativité restreinte, mais traite les champs de manière classique ; elle conduit naturellement à la définition du spin

Au-delà de Schrödinger : équation de Dirac

$$\boxed{i\hbar\frac{\partial\Psi}{\partial t} = (mc^2\alpha_0 + c\vec{\alpha}.\vec{p})\Psi}$$

$$i\hbar\gamma^{\mu}\,\partial_{\mu}\psi - mc\psi = 0, \mu = 1..4$$

En notation tensorielle, (voir plus loin)

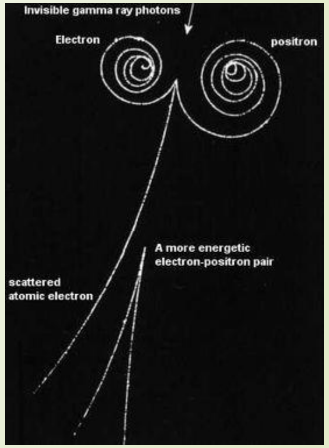


Le « coup » doublement réussi de Dirac :

- Les composantes φ ont des énergies négatives
- Découverte de l'antimatière

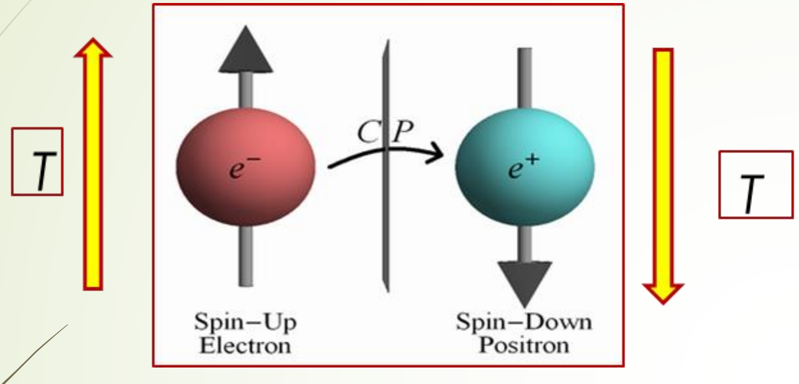
$$\Psi = \begin{pmatrix} \psi^{\uparrow} \\ \psi^{\downarrow} \\ \varphi^{\uparrow} \\ \varphi^{\downarrow} \end{pmatrix}$$

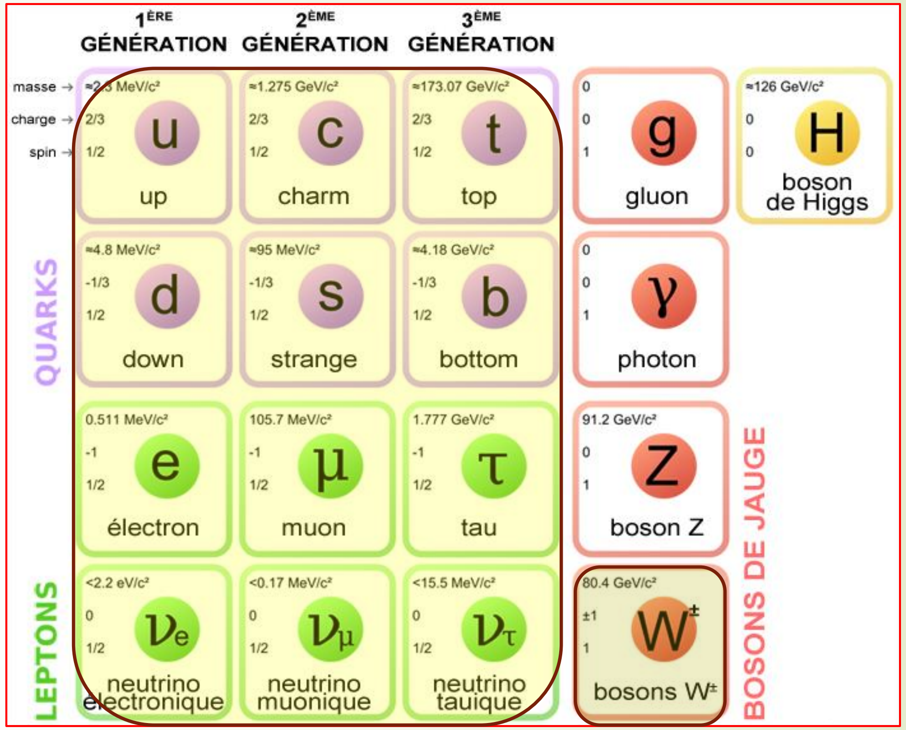
Après quelques années d'hésitation, PM Dirac admet l'existence « physique » des solutions (1931) : pense d'abord aux protons, puis finalement admet l'existence du positon (anti-électron)
Découvert expérimentalement par CA Anderson (1932) dans les rayons cosmiques



Au-delà de Schrödinger : équation de Dirac

Symétrie CP-T (charge, parité, temps)





Les fermions ont tous leur antiparticule (particule d'antimatière)
Les bosons de non chargés sont leur propre antiparticule (donc sauf les W±).

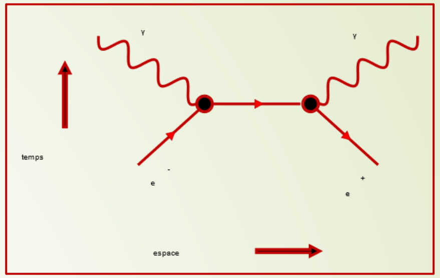
Expérimentalement, au CERN, on a démontré que l'atome antihydrogène (un positon autour d'un antiproton) a les mêmes propriétés que l'atome ordinaire d'hydrogène.

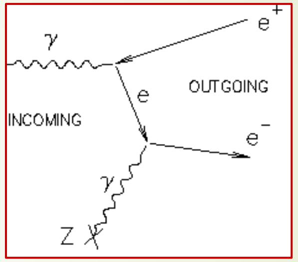
Au-delà de Schrödinger : antimatière et vide quantique

Antimatière
Une particule et une antiparticule s'annihilent avec émission de photons très énergétiques (avec conservation des impulsions, énergies, etc…)

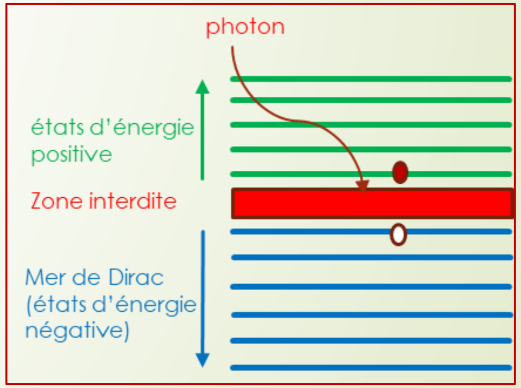
Création de paires
Un photon très énergétique (au voisinage d'un noyau par exemple) peut créer une paire d'électron-antiélectron (positon)

Le vide quantique (une interprétation) :
- Tous les états d'énergie négative occupés ; tous les états d'énergie positive vides
- Création de paires virtuelles : particule/antiparticule, satisfaisant la relation $\Delta t \; \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$





Par bitwise/VateGV — wikipedia



Au-delà de l'équation de Schrödinger

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n'est pas conservé
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou1)
- L'équation de Dirac est compatible avec la Relativité restreinte ; elle conduit naturellement à la définition du spin
- L'équation de Dirac a prévu la découverte de l'antimatière et redéfinit la notion de vide.

Equation de Dirac est limitée :

- Le champ (potentiel) est traité classiquement : les ondes issues équations de Maxwell ne sont pas les ondes quantiques
- L'effet de l'interaction des particules sur le champ n'est pas tra

La crise de la seconde moitié du XXème siècle

- Des désaccords (limités mais nets) dans les spectres atomiques
  → nécessité de mieux traiter l'interaction lumière-matière
- La nécessité de traiter de manière quantique l'interaction champ-particules

Exemple, g (facteur de Landé, pour les niveaux hyperfins des atomes) :

- g = -2,0023 valeur expérimentale
- Inconnu (Schrödinger) car effet purement relativiste
- g= -2 avec équation de Dirac

50 ans de recherche intensive

- g= -2,002 319 304 361 82, valeur calculée (2015)

Principe de la théorie des Champs

- Formalisme lagrangien
- Traitement quantique des modes d'excitations des champs
- Les particules correspondent à des états d'excitation localisés des champs quantiques

Mais

- Des difficultés théoriques inouïes
- Des calculs longs et fastidieux, avec des divergences à traiter (renormalisation)
- De nouveaux outils inventés (Diagrammes de Feynman)

Exemple: l'électrodynamique quantique (QED – Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson – 1946/1950)

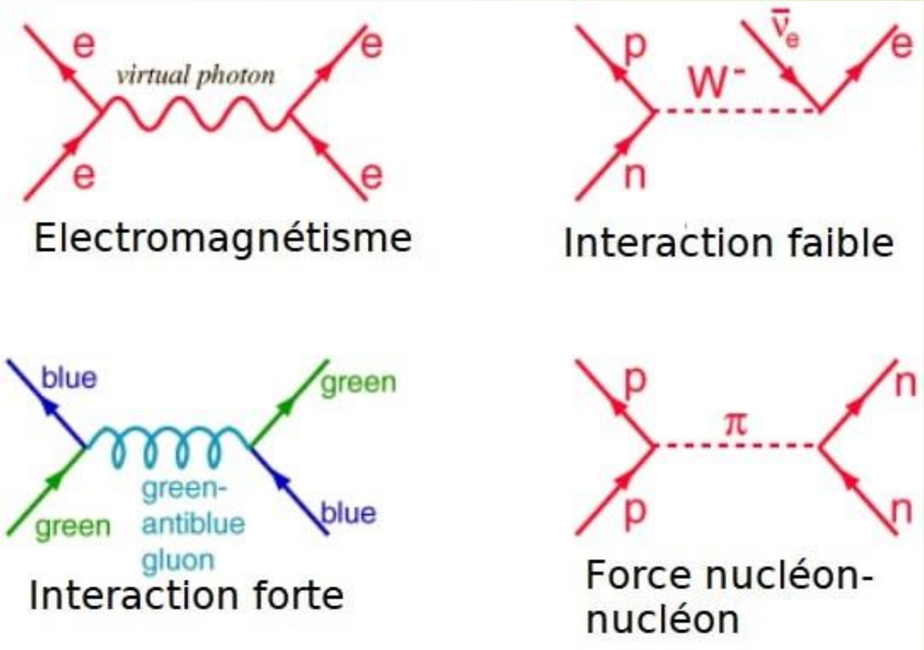
$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - e\bar{\psi}\gamma^\mu \psi A_\mu,$$

Lagrangien de l'électron libre (Dirac) avec ψ le champ des électrons – notation tensorielle

Intensité du champ électro-magnétique

Couplage électron-champ magnétique

Des outils graphiques … mais beaucoup plus



trustmyscience.com

Des règles de construction des lagrangiens qui les sous-tendent

Le lagrangien du modèle standard

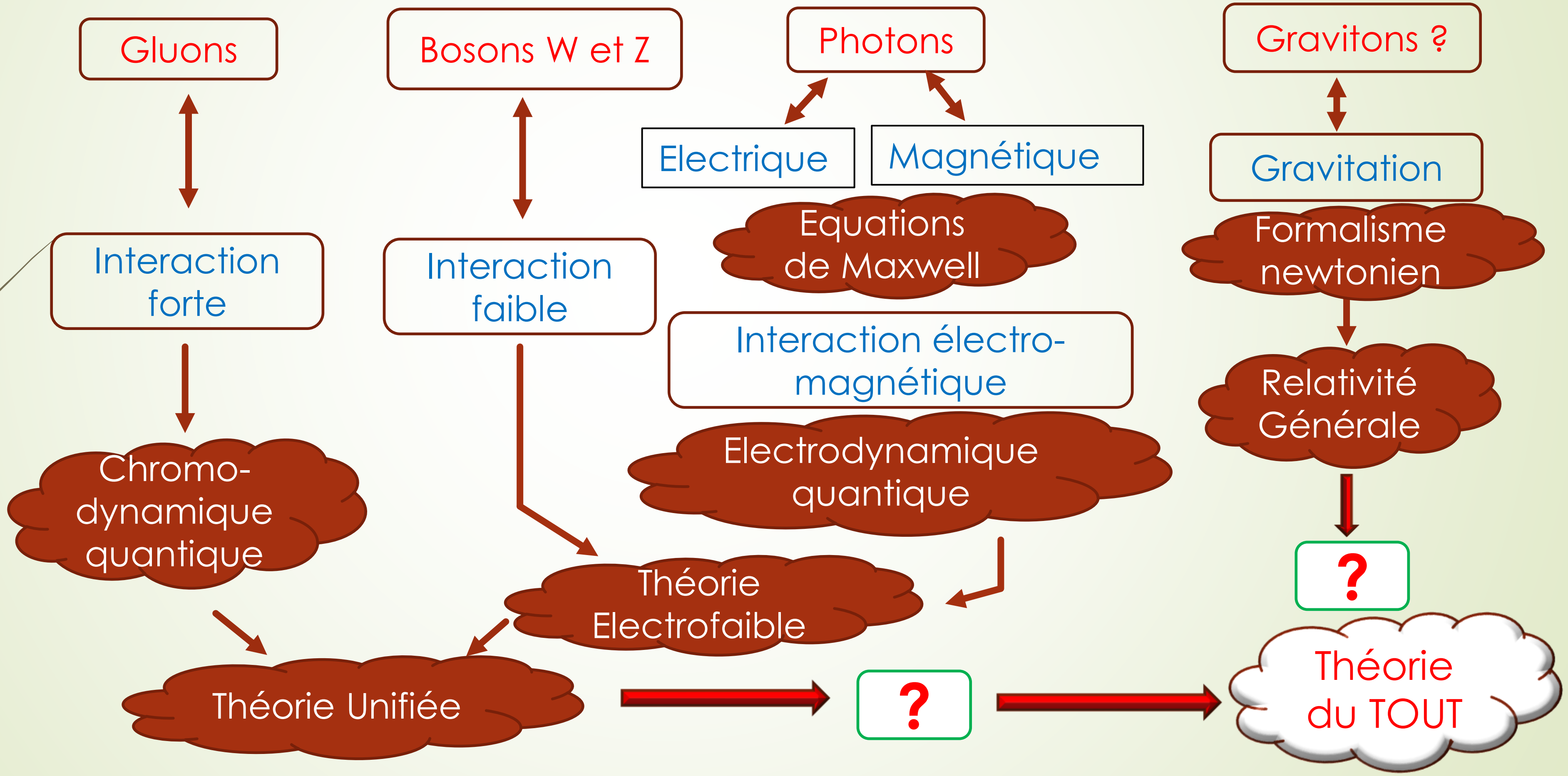
$$
\begin{gathered}
\mathcal{L}_{SM} = -\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - \\
M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w(\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - \\
W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - \\
igs_w(\partial_\nu A_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - W^+_\nu W^-_\mu) - A_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + A_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - \\
W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)) - \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \tfrac{1}{2}g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - \\
Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu - \\
W^+_\nu W^-_\mu) - 2A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2\alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
\beta_h \left(\tfrac{2M^2}{g^2} + \tfrac{2M}{g} H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-) \right) + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - \\
g\alpha_h M \left(H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^- \right) - \\
\tfrac{1}{8}g^2\alpha_h \left(H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+\phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2\phi^+\phi^- + 4H^2\phi^+\phi^- + 2(\phi^0)^2H^2 \right) - \\
gMW^+_\mu W^-_\mu H - \tfrac{1}{2}g\tfrac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \\
\tfrac{1}{2}ig \left(W^+_\mu (\phi^0\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^0) - W^-_\mu (\phi^0\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu\phi^0) \right) + \\
\tfrac{1}{2}g \left(W^+_\mu (H\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu H) + W^-_\mu (H\partial_\mu\phi^+ - \phi^+\partial_\mu H) \right) + \tfrac{1}{2}g\tfrac{1}{c_w}(Z^0_\mu (H\partial_\mu\phi^0 - \phi^0\partial_\mu H) + \\
M \left(\tfrac{1}{c_w} Z^0_\mu \partial_\mu \phi^0 + W^+_\mu \partial_\mu \phi^- + W^-_\mu \partial_\mu \phi^+ \right) - ig\tfrac{s_w^2}{c_w} M Z^0_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + igs_w M A_\mu (W^+_\mu \phi^- - \\
W^-_\mu \phi^+) - ig\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w} Z^0_\mu (\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) + igs_w A_\mu (\phi^+\partial_\mu\phi^- - \phi^-\partial_\mu\phi^+) - \\
\tfrac{1}{4}g^2 W^+_\mu W^-_\mu \left(H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^- \right) - \tfrac{1}{8}g^2\tfrac{1}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu \left(H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2\phi^+\phi^- \right) - \\
\tfrac{1}{2}g^2\tfrac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- + W^-_\mu \phi^+) - \tfrac{1}{2}ig^2\tfrac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + \tfrac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- + \\
W^-_\mu \phi^+) + \tfrac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - g^2\tfrac{s_w}{c_w}(2c_w^2 - 1) Z^0_\mu A_\mu \phi^+\phi^- - \\
g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+\phi^- + \tfrac{1}{2}ig_s\, \lambda^a_{ij} (\bar{q}^\sigma_i \gamma^\mu q^\sigma_j) g^a_\mu - \bar{e}^\lambda (\gamma\partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma\partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j (\gamma\partial + \\
m_u^\lambda) u^\lambda_j - \bar{d}^\lambda_j (\gamma\partial + m_d^\lambda) d^\lambda_j + igs_w A_\mu \left(-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j \gamma^\mu d^\lambda_j) \right) + \\
\tfrac{ig}{4c_w} Z^0_\mu \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1+\gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}^\lambda_j \gamma^\mu (\tfrac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d^\lambda_j) + \\
(\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu (1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u^\lambda_j) \} + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}} W^+_\mu \left((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1+\gamma^5) {U^{lep}}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu (1+\gamma^5) C_{\lambda\kappa} d^\kappa_j) \right) + \\
\tfrac{ig}{2\sqrt{2}} W^-_\mu \left((\bar{e}^\kappa {U^{lep}}^\dagger_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1+\gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1+\gamma^5) u^\lambda_j) \right) + \\
\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left(-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda {U^{lep}}_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda {U^{lep}}_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) e^\kappa \right) + \\
\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left(m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda {U^{lep}}^\dagger_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda {U^{lep}}^\dagger_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) \nu^\kappa \right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m_\nu^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
\tfrac{g}{2}\tfrac{m_e^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m_\nu^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m_e^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \tfrac{1}{4}\, \bar{\nu}_\lambda\, M^R_{\lambda\kappa}\, (1-\gamma_5) \hat{\nu}_\kappa - \\
\tfrac{1}{4}\, \bar{\nu}_\lambda\, M^R_{\lambda\kappa}\, (1-\gamma_5) \hat{\nu}_\kappa + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left(-m_d^\kappa (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) d^\kappa_j) + m_u^\lambda (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) d^\kappa_j \right) + \\
\tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left(m_d^\lambda (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) u^\kappa_j) - m_u^\kappa (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) u^\kappa_j \right) - \tfrac{g}{2}\tfrac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \\
\tfrac{g}{2}\tfrac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2}\tfrac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}^\lambda_j \gamma^5 u^\lambda_j) - \tfrac{ig}{2}\tfrac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}^\lambda_j \gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g^c_\mu + \\
\bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \tfrac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W^+_\mu (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
\partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + igs_w W^+_\mu (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W^-_\mu (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
\partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + igs_w W^-_\mu (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z^0_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
\partial_\mu \bar{X}^- X^-) + igs_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
\partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \tfrac{1}{2}gM \left(\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \tfrac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H \right) + \tfrac{1-2c_w^2}{2c_w} igM \left(\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^- \right) + \\
\tfrac{1}{2c_w} igM \left(\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^- \right) + igMs_w \left(\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^- \right) + \\
\tfrac{1}{2} igM \left(\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0 \right) .
\end{gathered}
$$

Dépend de nombreux paramètres (19) que l'on ne sait pas déterminer à partir des principes de base

Fonctions d'état – Equation de Schrödinger

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n'est pas conservé
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou1)
- L'équation de Dirac est compatible avec la Relativité restreinte, mais traite les champs de manière classique ; elle conduit naturellement à la définition du spin
- La construction de la théorie quantique des champs a posé des problèmes majeurs - théoriques et de calcul.

Les forces fondamentales et leurs vecteurs



Au-delà de l'équation de Schrödinger

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n'est pas conservé
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou1)
- L'équation de Dirac est compatible avec la Relativité restreinte, mais traite les champs de manière classique ; elle conduit naturellement à la définition du spin
- La construction de la théorie quantique des champs a posé des problèmes majeurs - théoriques et de calcul.
- La théorie quantique des champs a permis des avancées vers la théorie du TOUT, en unifiant progressivement les théories pour les interactions fondamentales : électro-magnétisme, interaction faible, interaction forte.

Les 3 crises de la Physique Quantique

- 1925 – **crise de l'interprétation** - l'équation de Schrödinger et les nouvelles théories « fonctionnent », mais sont inintelligibles
  Problème non résolu, mais une clarification des enjeux ; décohérence
- Années 1950 – **Explosion** du nombre de « **particules élémentaires** » (suite aux progrès expérimentaux) ; **élaboration « dans la douleur »** des théories quantique des champs
  Résolution des problèmes théoriques et techniques : QED, QCD, …
- Années 2000 – **Echecs persistants** dans **l'unification** de la Mécanique Quantique avec la Relativité Générale

L'équation du grand TOUT n'est pas à portée de main

Les incompatibilités fondamentales

- **Mécanique Quantique** Le Temps et l'Espace sont distincts et forment un référentiel fixe dans lequel se déroulent les phénomènes ; les grandeurs physiques sont quantifiées
- **Relativité Générale** : L'Espace-Temps est un référentiel qui fluctue selon les phénomènes qui s'y déroulent : les grandeurs physiques sont continues

Vers l'unification, 2 (?) grandes démarches :

- **Théorie des cordes** – Partir de la Mécanique Quantique, la rendre compatible avec la Relativité Générale
- **Gravité à boucles** – Partir de la Relativité Générale et la rendre compatible avec la Mécanique Quantique

Au-delà de l'équation de Schrödinger

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n'est pas conservé
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou1)
- L'équation de Dirac est compatible avec la Relativité restreinte, mais traite les champs de manière classique ; elle conduit naturellement à la définition du spin
- La construction de la théorie quantique des champs a posé des problèmes majeurs - théoriques et de calcul.
- La théorie quantique des champs a permis des avancées vers la théorie du TOUT, en unifiant progressivement les théories pour les interactions fondamentales : électro-magnétisme, interaction faible, interaction forte.
- MAIS, l'unification de la Mécanique Quantique et de la Relativité Générale est hors de portée actuellement

Merci

bernard.remaud@univ-nantes.fr