

Un peu de Science pour comprendre le monde moderne

Les 2 infinis

Bernard Remaud

bernard.remaud@univ-nantes.fr
<https://www.un-peu-de-physique.fr>



La chaîne YouTube



Le blog

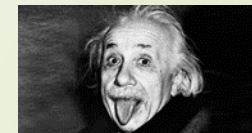
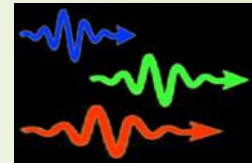
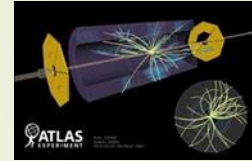
Ch -2-

Mécanique quantique

d) Au-delà de Schrödinger

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

- Elle conserve le nombre de particules ; pas les phénomènes de **création et d'annihilation**
- $-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2} + V(x)A(x) = E A(x)$ et si masse au repos $m=0$
- $E = \frac{p^2}{2m} + V(x)$ n'est pas une formule relativiste : équation 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 génère son 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**



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

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

Énergie cinétique

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Énergie au repos

Associons les opérateurs :

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



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



Equation de Klein-Gordon (1926)

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



Mariage réussi de la mécanique quantique et de la relativité restreinte ?

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



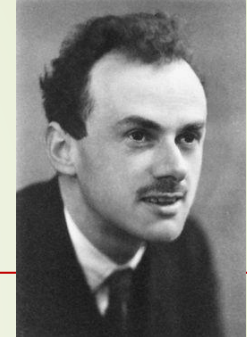
Décrit les particules relativistes sans spin et trouve son **application en théorie quantique des champs** (voir plus loin) et **le boson de Higgs**

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou 1)

Si $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$ ne marche pas , pourquoi pas $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$?
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 $\left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right\} \Psi = -k^2 \Psi ; k^2 = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2}$
- 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
$$AB = AC = AD = \dots = 0 ; |A|^2 = \dots = |D|^2 = 1$$
- 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



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

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

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 $\alpha_0, \alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ sont des matrices 4X4 (liées aux matrices de Pauli)

Le « coup » réussi de Dirac :

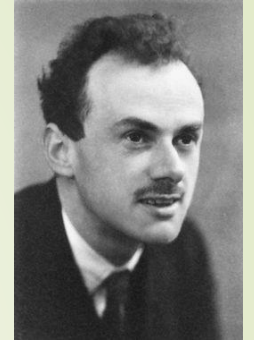
- Les composantes de Ψ sont des fonctions d'onde au sens classique du terme ; $|\Psi_i|^2$ sont des densités de probabilité
- Le spin découle « naturellement » de la mise en compatibilité de la mécanique quantique avec la relativité restreinte
- Les équations différentielles sont linéaires (comme Schrödinger)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

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou 1)
- 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.

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

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

En notation tensorielle, (voir plus loin)

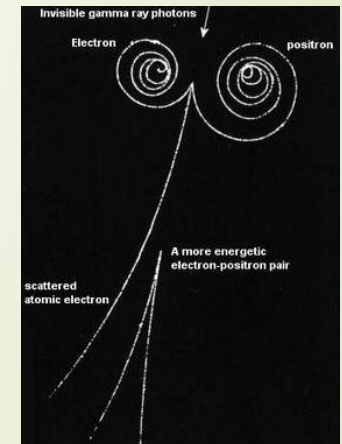


Le « coup » doublement réussi de Dirac :

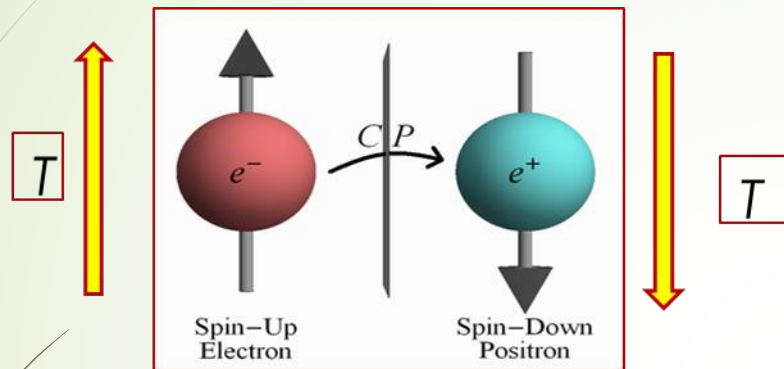
- Les composantes φ ont des énergies négatives
- Découverte de l'antimatière

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

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



Symétrie CP-T (charge, parité, temps)



Les fermions ont tous leur **antiparticule** (particule d'antimatière)
 Les bosons non chargés sont leur **propre antiparticule** (donc sauf les $W^\pm$).

	1ÈRE GÉNÉRATION	2ÈME GÉNÉRATION	3ÈME GÉNÉRATION	
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0 $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0
spin →	1/2	1/2	1/2	0
	u up	c charm	t top	g gluon
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	e électron	μ muon	τ tau	Z boson Z
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	W[±] bosons 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.

Antimatière

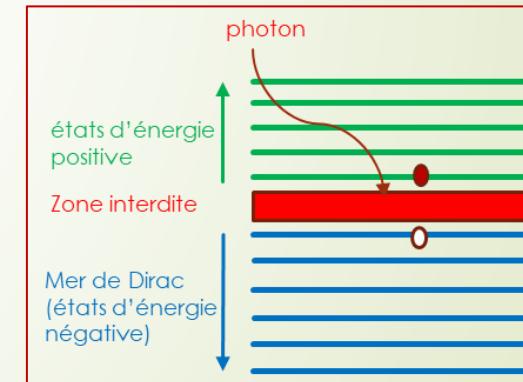
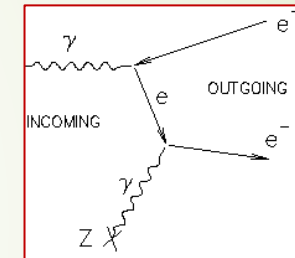
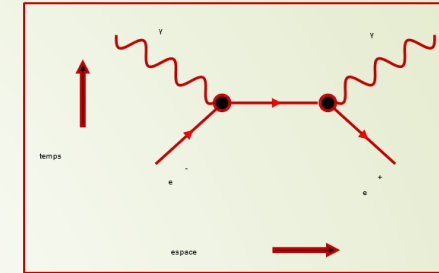
Une particule et une antiparticule s'annihilent avec émission de photons très énergétiques (avec conservation des impulsions, énergies, etc...)

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

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou 1)
- 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 des équations de Maxwell ne sont pas les ondes quantiques
- L'effet de l'interaction des particules sur le champ n'est pas traité.



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**

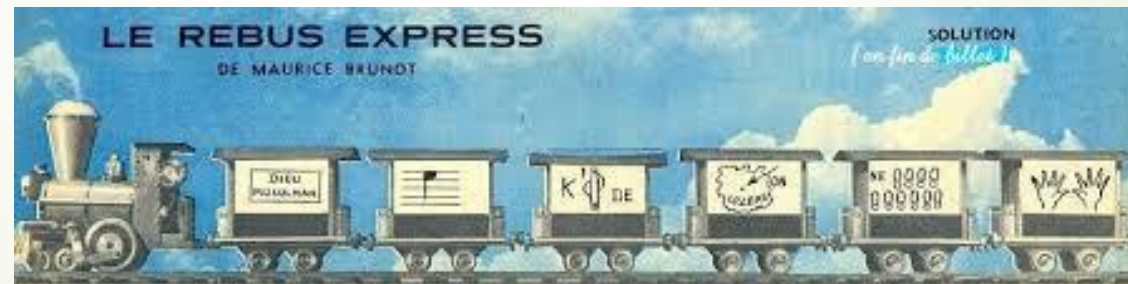
Exemple, g (facteur de Landé, pour les niveaux hyperfins des atomes) :

- $g = -2,0023$ 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)

Interlude pour les matheux



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)

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

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

L'équation se déduit du hamiltonien :

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}_x^2}{2m} + \frac{1}{2} m \omega^2 \hat{x}^2$$

Energie cinétique

Energie potentielle

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

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

montre la symétrie de l'hamiltonien :

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

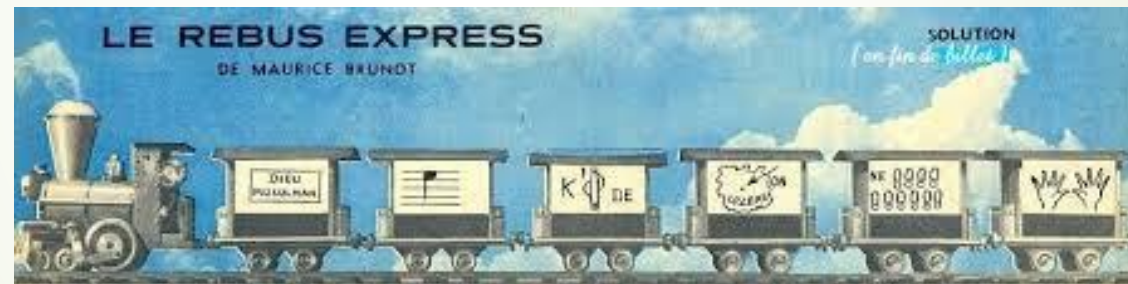
Le terme supplémentaire $\frac{1}{2}$ vient du fait que les opérateurs $\hat{P}$ et $\hat{X}$ ne commutent pas $\hat{P}\hat{X} \neq \hat{X}\hat{P}$

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

$$\begin{aligned} \hat{a}|n\rangle &= \sqrt{n}|n-1\rangle, \text{ opérateur d'annihilation} \\ \hat{a}^\dagger|n\rangle &= \sqrt{n+1}|n+1\rangle, \text{ opérateur de création} \\ \hat{a}^\dagger\hat{a}|n\rangle &= n|n\rangle, \text{ opérateur de comptage} \\ \hat{H} &= \left(\hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega \end{aligned}$$

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.

Fin d'interlude



- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou 1)
- 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.
- L'oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n'est pas conservé

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)

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

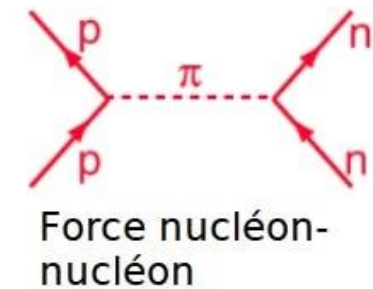
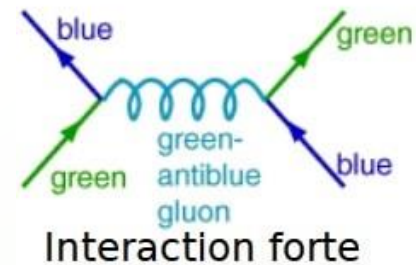
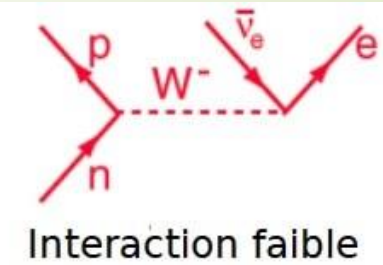
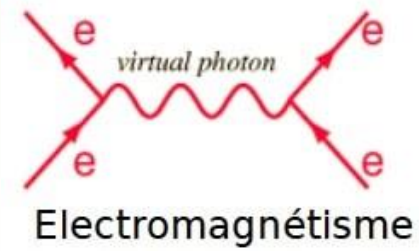
$$\mathcal{L}_{QED} = i\hbar c \bar{\psi} \gamma^\mu D_\mu \psi - mc^2 \bar{\psi} \psi - \frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

Couplage électron-
champ magnétique

Intensité du champ
électro-magnétique

Des outils graphiques ... mais beaucoup plus

Des règles de construction des lagrangiens qui les sous-tendent



$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
& M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{cw} (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^-) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^- - W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^-) - \\
& ig_{sw} (\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_\mu W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ \partial_\mu W_\nu^-)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
& Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
& W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
& \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
& g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
& gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
& \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
& \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
& M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
& W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
& \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
& \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
& W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
& g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial + \\
& m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\
& \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\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}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
& (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
& \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-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) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (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) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\
& \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
& \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
& \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
& \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{cw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{sw} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{cw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
& \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{sw} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{cw} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig_{sw} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\
& \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
& \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igMs_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
& \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
\end{aligned}$$

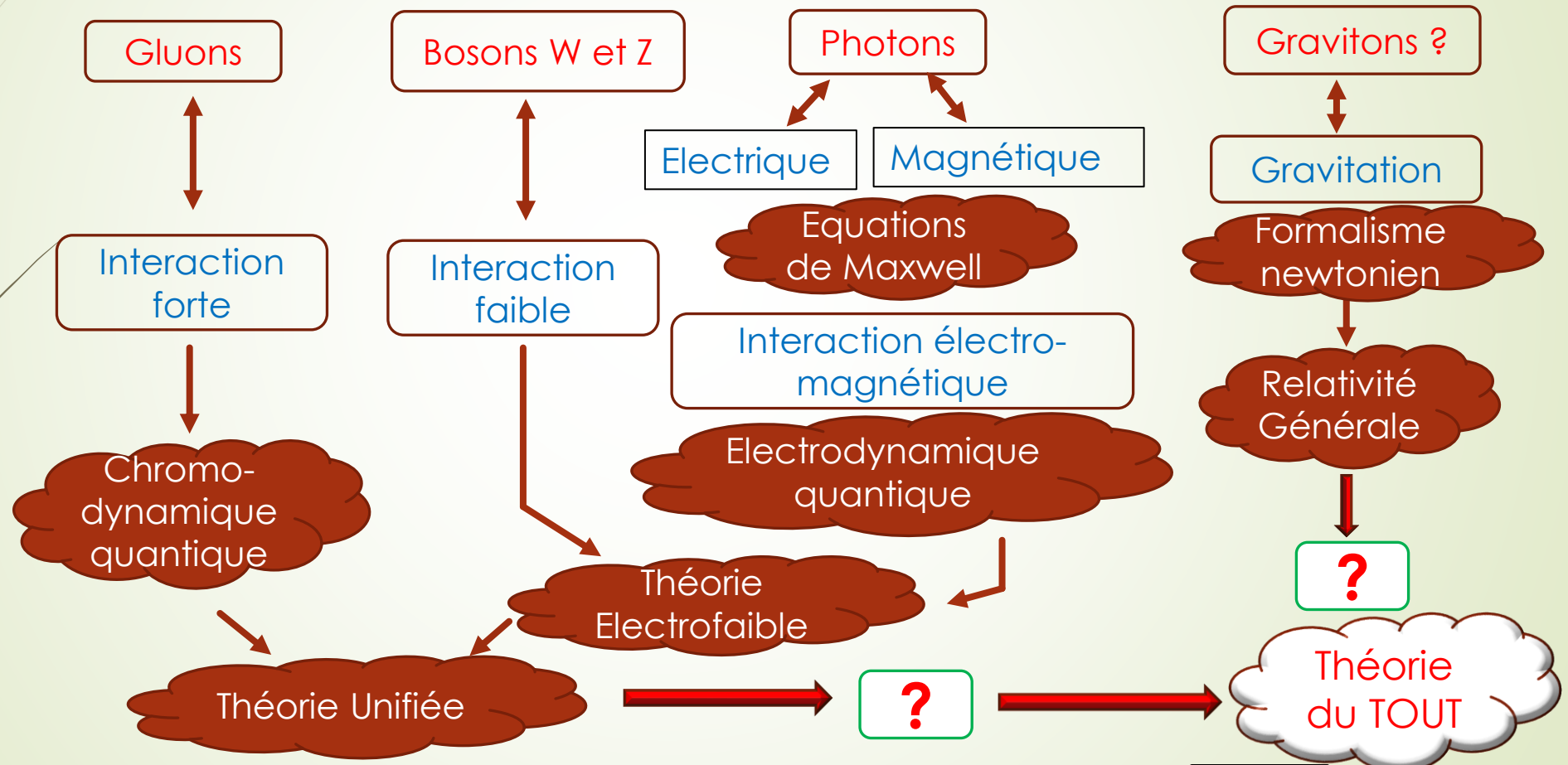
Le lagrangien du modèle standard



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

- L'équation de Schrödinger est limitée aux particules ayant une masse au repos et peu énergétiques
- L'équation de Klein-Gordon est une extension relativiste, limitée aux particules de spin 0 (ou 1)
- 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
- L'oscillateur harmonique est à la base des modèles où le nombre de particules n'est pas conservé
- La construction de la théorie quantique des champs a posé des problèmes majeurs - théoriques et de calcul, mais est à la base du modèle standard des particules et des champs

Les forces fondamentales et leurs vecteurs



- 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 (ou 1)
- 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, mais est à la base du modèle standard des particules et des champs
- 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 quantiques 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
Existe-t-elle ?



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

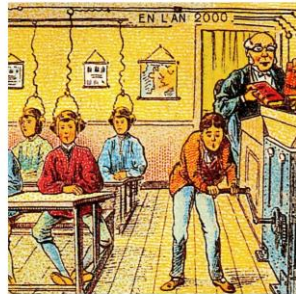
Vers l'unification, 2 (?) grandes démarches :

- **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

- 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 (ou 1)
- 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 : électromagnétisme, interaction faible, interaction forte.
- **MAIS**, l'unification de la Mécanique Quantique et de la Relativité Générale est hors de portée actuellement

En attendant la théorie du Grand Tout

Des vidéo conférences sur la chaîne YouTube : [la Science de Bernie – Saison 3](#)



Des podcasts sur Spotify
[La science de Bernie](#)

Mon blog <https://un-peu-de-physique.fr/>
Des cours, des ressources...



Merci

bernard.remaud@univ-nantes.fr