



PARTICULES ET INTERACTIONS

MASTER CLASS 2014 @ IRFU

"La science, c'est soit de la physique, soit de la philatélie"

E. Rutherford, prix Nobel... de chimie (1908)!

FABRICE COUDERC

FÉVRIER 2014

DE LA SIMPLICITÉ AVANT TOUTE CHOSE

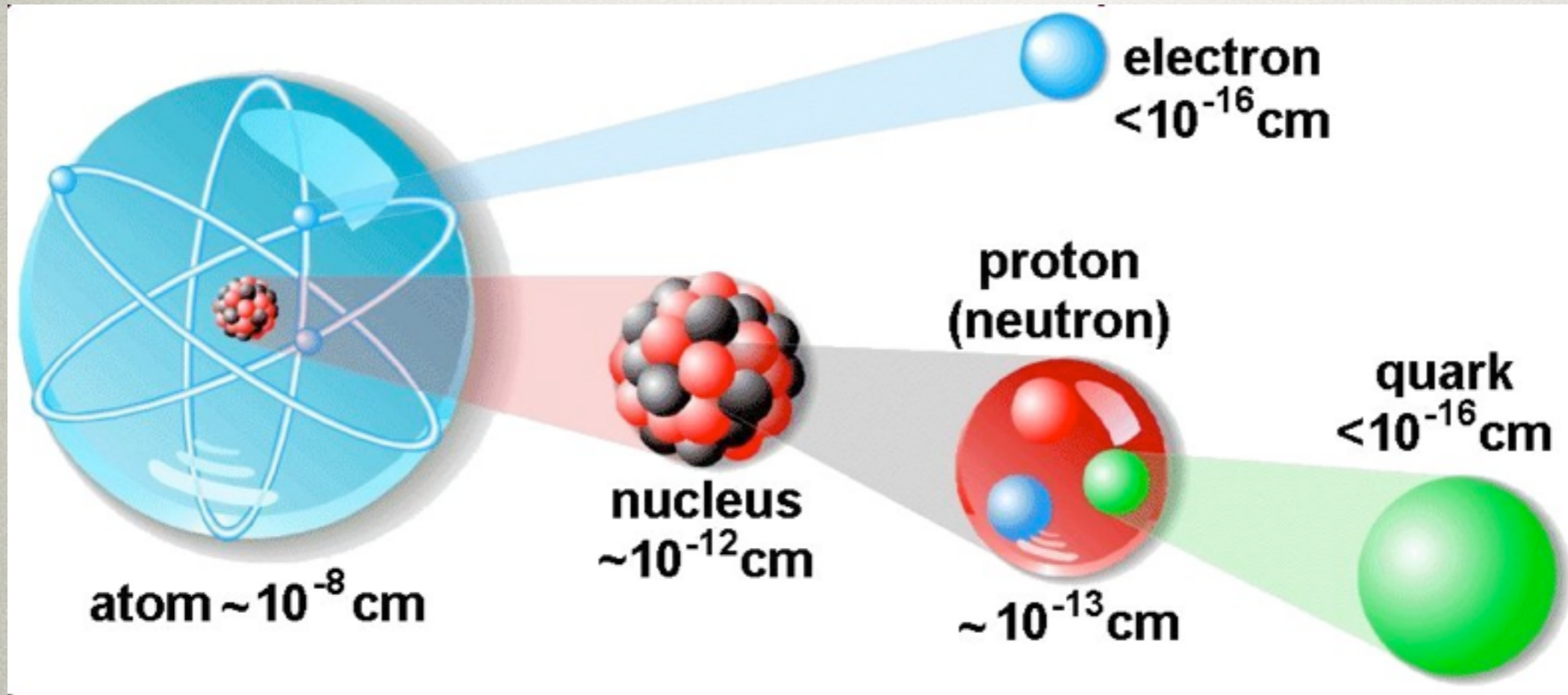


DE LA SIMPLICITÉ AVANT TOUTE CHOSE

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B	VIII B	VIII B	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1 1,00794 H <i>Hydrogène</i>																	2 4,0026 He <i>Helium</i>
3 6,941 Li <i>Lithium</i>	4 9,01218 Be <i>Béryllium</i>											5 10,811 B <i>Bore</i>	6 12,0107 C <i>Carbone</i>	7 14,0067 N <i>Azote</i>	8 15,9994 O <i>Oxygène</i>	9 18,9984 F <i>Fluor</i>	10 20,1797 Ne <i>Neon</i>
11 22,9898 Na <i>Sodium</i>	12 24,305 Mg <i>Magnésium</i>											13 26,9815 Al <i>Aluminium</i>	14 28,0855 Si <i>Silicium</i>	15 30,9738 P <i>Phosphore</i>	16 32,065 S <i>Soufre</i>	17 35,453 Cl <i>Chlore</i>	18 39,948 Ar <i>Argon</i>
19 39,0983 K <i>Potassium</i>	20 40,078 Ca <i>Calcium</i>	21 44,9559 Sc <i>Scandium</i>	22 47,867 Ti <i>Titane</i>	23 50,9415 V <i>Vanadium</i>	24 51,9961 Cr <i>Chrome</i>	25 54,9380 Mn <i>Manganèse</i>	26 55,845 Fe <i>Fer</i>	27 58,9332 Co <i>Cobalt</i>	28 58,6934 Ni <i>Nickel</i>	29 63,546 Cu <i>Cuivre</i>	30 65,38 Zn <i>Zinc</i>	31 69,723 Ga <i>Gallium</i>	32 72,63 Ge <i>Germanium</i>	33 74,9216 As <i>Arsenic</i>	34 78,96 Se <i>Sélénium</i>	35 79,904 Br <i>Brome</i>	36 83,798 Kr <i>Krypton</i>
37 85,4678 Rb <i>Rubidium</i>	38 87,62 Sr <i>Strontium</i>	39 88,9058 Y <i>Yttrium</i>	40 91,224 Zr <i>Zirconium</i>	41 92,9064 Nb <i>Niobium</i>	42 95,96 Mo <i>Molybdène</i>	43 (98) Tc <i>Technetium</i>	44 101,07 Ru <i>Ruthénium</i>	45 102,905 Rh <i>Rhodium</i>	46 106,42 Pd <i>Palladium</i>	47 107,868 Ag <i>Argent</i>	48 112,411 Cd <i>Cadmium</i>	49 114,818 In <i>Indium</i>	50 118,71 Sn <i>Étain</i>	51 121,76 Sb <i>Antimoine</i>	52 127,6 Te <i>Tellure</i>	53 126,905 I <i>Iode</i>	54 131,293 Xe <i>Xénon</i>
55 132,905 Cs <i>Césium</i>	56 137,327 Ba <i>Baryum</i>		72 178,49 Hf <i>Hafnium</i>	73 180,948 Ta <i>Tantale</i>	74 183,84 W <i>Tungstène</i>	75 186,207 Re <i>Rhénium</i>	76 190,23 Os <i>Osmium</i>	77 192,217 Ir <i>Iridium</i>	78 195,084 Pt <i>Platine</i>	79 196,967 Au <i>Or</i>	80 200,59 Hg <i>Mercure</i>	81 204,383 Tl <i>Thallium</i>	82 207,2 Pb <i>Plomb</i>	83 208,98 Bi <i>Bismuth</i>	84 (209) Po <i>Polonium</i>	85 (210) At <i>Astato</i>	86 (222) Rn <i>Radon</i>
87 (223) Fr <i>Francium</i>	88 (226) Ra <i>Radium</i>		104 (266) Rf <i>Rutherfordium</i>	105 (268) Db <i>Debsium</i>	106 (269) Sg <i>Seaborgium</i>	107 (270) Bh <i>Béhrium</i>	108 (269) Hs <i>Hassium</i>	109 (278) Mt <i>Méltetrium</i>	110 (279) Ds <i>Darmstadtium</i>	111 (281) Rg <i>Roentgenium</i>	112 (285) Cn <i>Copernicium</i>	113 (284) Uut <i>Ununtrium</i>	114 (289) Fl <i>Flerovium</i>	115 (288) Uup <i>Ununpentium</i>	116 (293) Lv <i>Livermorium</i>	117 (294) Uus <i>Ununseptium</i>	118 (294) Uuo <i>Ununoctium</i>
			57 138,906 La <i>Lanthane</i>	58 140,116 Ce <i>Cérium</i>	59 140,908 Pr <i>Praséodyme</i>	60 144,242 Nd <i>Néodyme</i>	61 (145) Pm <i>Prométhium</i>	62 150,36 Sm <i>Samarium</i>	63 151,964 Eu <i>Eurélium</i>	64 157,25 Gd <i>Gadolinium</i>	65 158,925 Tb <i>Terbium</i>	66 162,5 Dy <i>Dysprosium</i>	67 164,930 Ho <i>Holmium</i>	68 167,259 Er <i>Érène</i>	69 168,934 Tm <i>Thulium</i>	70 173,054 Yb <i>Ytterbium</i>	71 174,967 Lu <i>Lutécium</i>
			89 (227) Ac <i>Actinium</i>	90 232,038 Th <i>Thorium</i>	91 231,036 Pa <i>Protactinium</i>	92 238,029 U <i>Uranium</i>	93 (237) Np <i>Neptunium</i>	94 (244) Pu <i>Plutonium</i>	95 (243) Am <i>Americium</i>	96 (247) Cm <i>Curium</i>	97 (247) Bk <i>Berkélium</i>	98 (251) Cf <i>Californium</i>	99 (252) Es <i>Einsteinium</i>	100 (257) Fm <i>Fermium</i>	101 (258) Md <i>Médlivium</i>	102 (259) No <i>Nobelium</i>	103 (262) Lr <i>Lawrencium</i>

DE LA SIMPLICITÉ AVANT TOUTE CHOSE



électrons

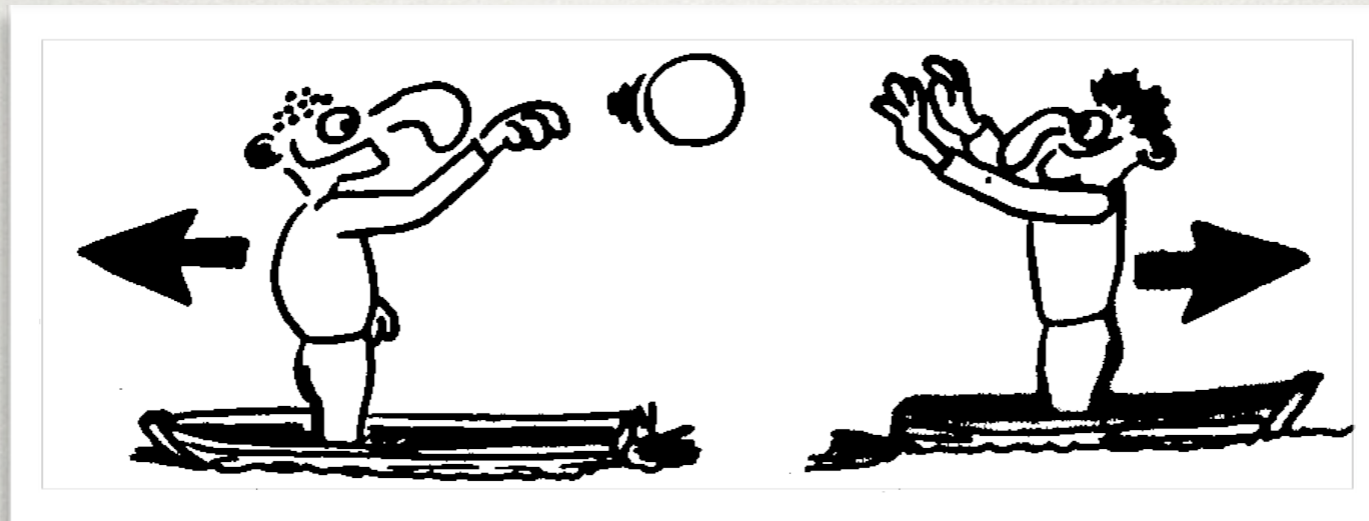
quarks **up**
down

0.000000000001 m /10000 /10 ?

Particules élémentaires: constituants fondamentaux (i.e. non composites) de l'univers - wikipedia

Trois briques élémentaires: électrons, quark up, quark down

COMMENT ÇA TIENT TOUT ÇA?



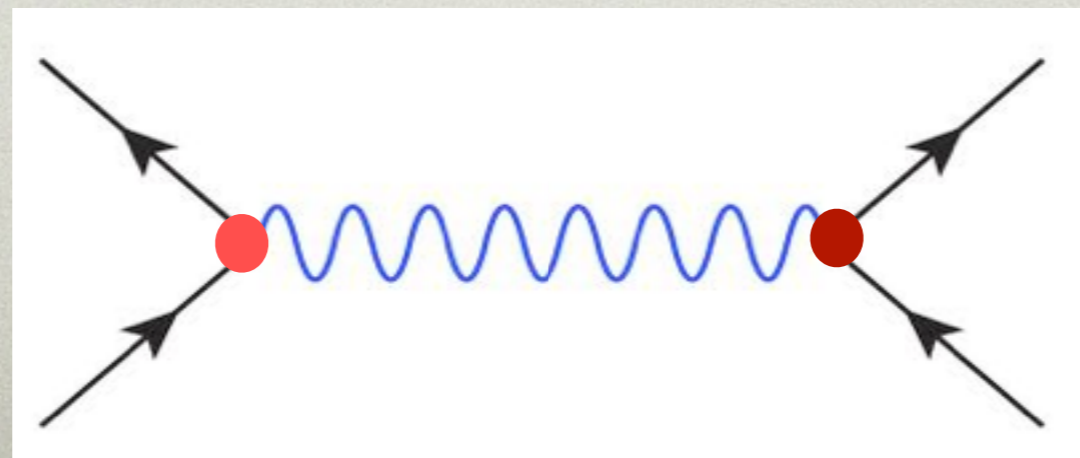
vue d'artiste

Vision moderne des forces: deux corps interagissent entre eux via l'échange d'un messenger, porteur de l'interaction

une interaction \iff un type de messenger

l'interaction est transmise à vitesse finie (pas d'instantanéité)

le **couplage particule-messenger** caractérise la particule



vue de physicien

INTERACTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

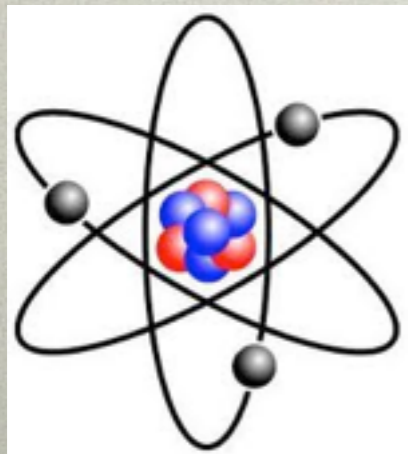


Unification des phénomènes électriques
et magnétique 1820-1830

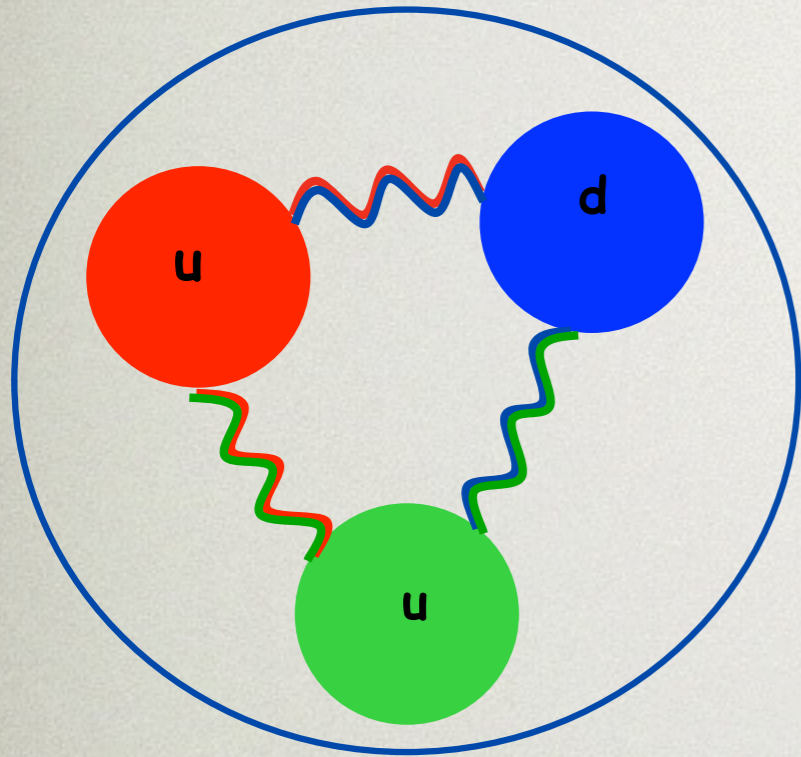
La "lumière" est aussi impliquée
Maxwell 1890

Électromagnétisme: échange d'un
photon (γ) entre particules chargées

γ : masse nulle (portée infinie)
charge électrique nulle



INTERACTION FORTE



Interaction forte: échange d'un gluon (g) entre particules "colorées"

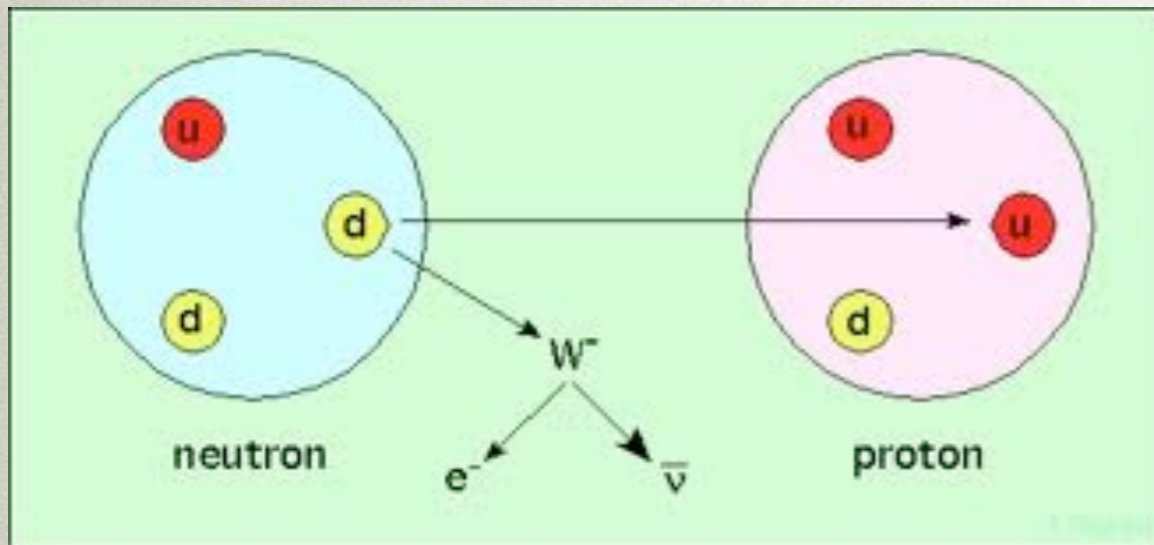
L'interaction forte colle les quarks entre eux, elle est responsable de la cohésion du noyau atomique

gluon: masse nulle

charge électrique nulle

charge de couleur: le gluon est "coloré",
il interagit avec lui-même

INTERACTION FAIBLE



Interaction faible: échange d'un boson $W^{+/-}$, Z

- *Radioactivité β*
- Désintégration du neutron
- Quarks et électrons (leptons) ont une "charge faible"
- Découverte du *neutrino*: sensible seulement à l'interaction faible (Pauli, 1930)
- L'interaction faible est la source de *l'énergie solaire*



Bosons W/Z masse élevée: interaction à très courte portée

LES OUTILS THÉORIQUES

MÉCANIQUE QUANTIQUE



Cartes Chats
Noirs / Blancs

On tire une carte, quelle est la
couleur du chat?

Sens commun (monde classique):

- la carte est NOIRE OU BLANCHE
- 1/2: chat noir
- 1/2: chat blanc

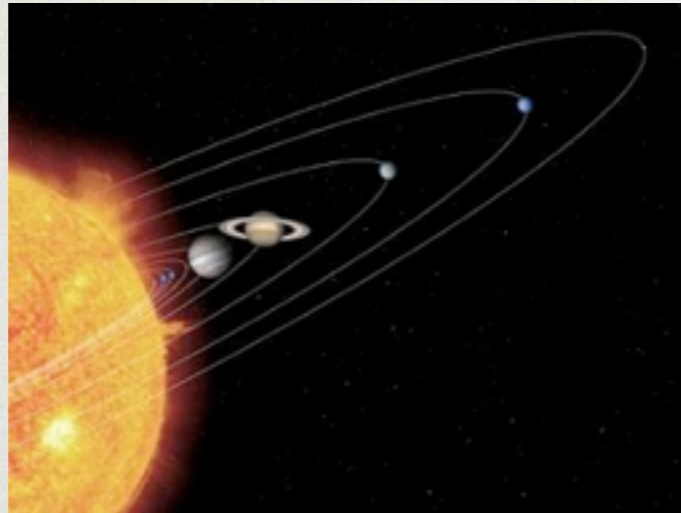
Niels Bohr (monde quantique):

- la carte est NOIRE ET BLANCHE, au moment de la mesure elle acquiert sa couleur observée!
- 1/2: chat noir
- 1/2: chat blanc
- l'aléatoire est intrinsèque à la mécanique quantique, on ne peut pas trouver une théorie qui permettrait de donner une couleur à la carte **avant** de l'observer.

A. Einstein (1927): "Dieu ne joue pas aux dèss"...

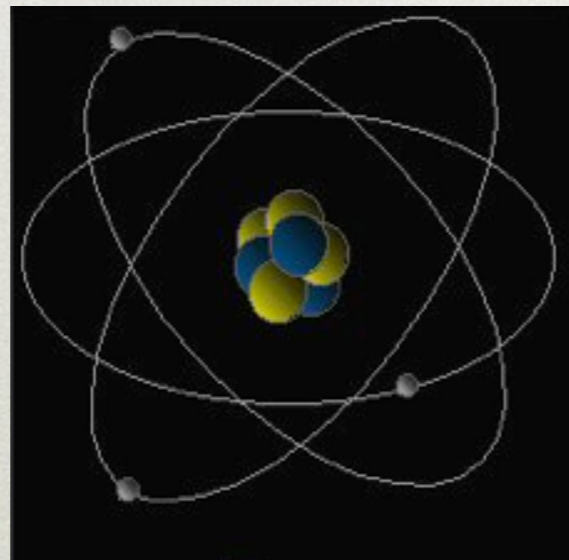
MÉCANIQUE QUANTIQUE

Monde
classique

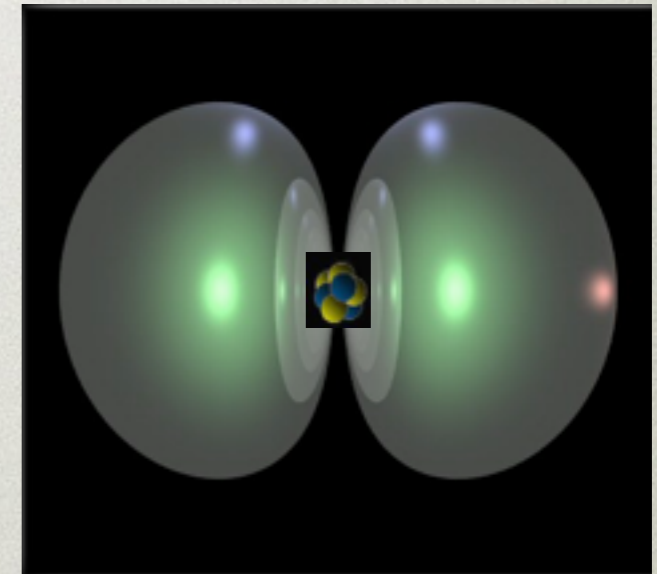


- Position de la terre dans 12356 ans?
réponse simple et précise...
- Position de l'électron autour du noyau?
pas si simple, on ne peut prédire qu'une
probabilité de présence

Monde
quantique



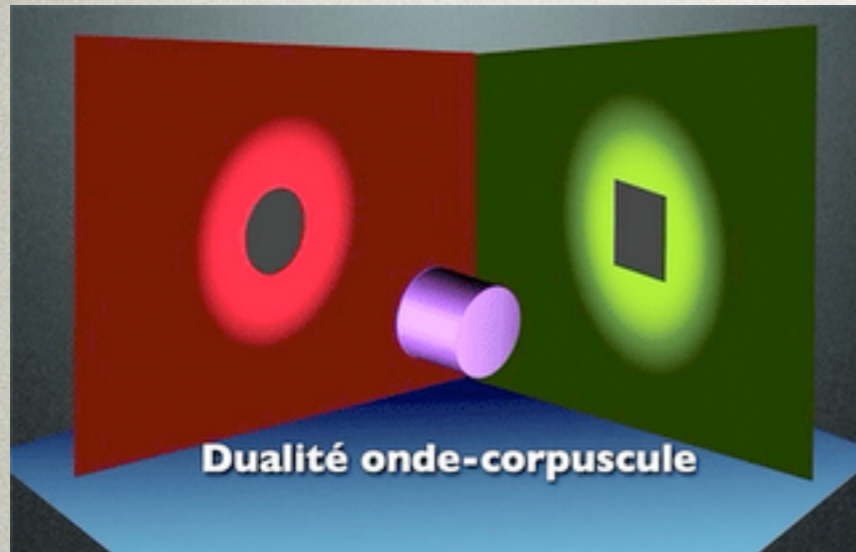
représentation classique:
simple mais erronée!



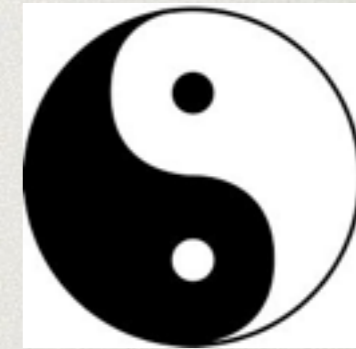
représentation plus réaliste:
l'électron est partout à la fois!

... Et pourtant si! J.S. Bell(1964) +...+ Aspect *et al.* (1982)

MÉCANIQUE QUANTIQUE



Les deux faces
d'une même
"réalité"



Onde: propagation d'une déformation d'un milieu (support).

Propriétés: Interférences, diffraction...

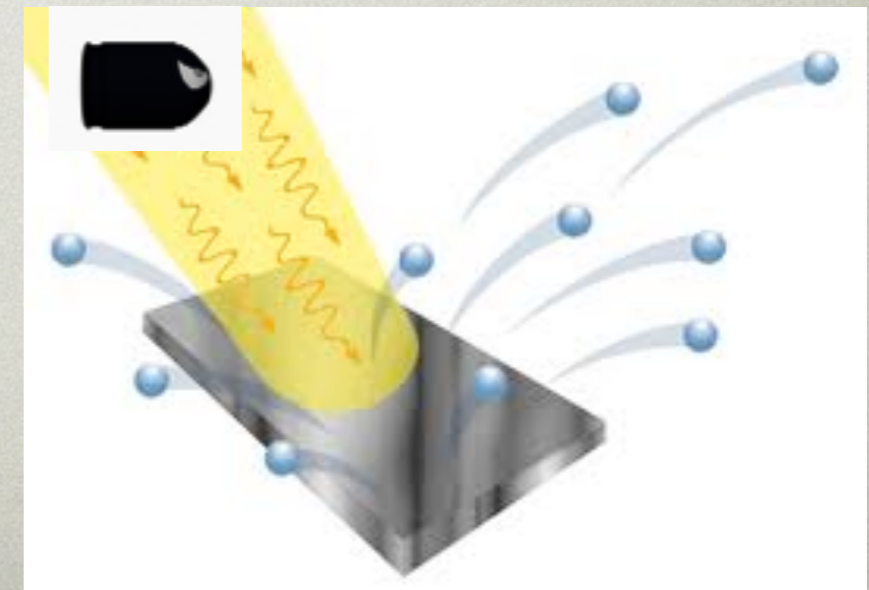
Exemples: Ondes radios (lumière), sonores...



Corpuscule: corps d'une extrême ténuité!

Propriétés: mécanique classique

Exemple: particules, mais elles ont aussi des propriétés ondulatoires.



RELATIVITÉ RESTREINTE (1905)

Relativité galiléenne: coordonnées d'espace x dépendent du référentiel, temps "absolu"

Relativité restreinte: le temps dépend aussi du référentiel, notion d'espace-temps.

Référentiel: 3 axes d'espace + 1 axe de temps + origine pour les 4 coordonnées

Les lois de la physique doivent s'écrire de la même façon dans tous les référentiels galiléens.

Plusieurs conséquences surprenantes:

- les durées et les longueurs dépendent du référentiel:
⇒ Quel âge as-tu? ça dépend...
- il existe une vitesse limite: c , la vitesse de la lumière
⇒ c ne dépend pas du référentiel
- $E = mc^2$: **équivalence masse énergie**
⇒ on peut créer un objet à partir d'énergie pure
- la **masse d'une particule m est la même qq soit le référentiel**



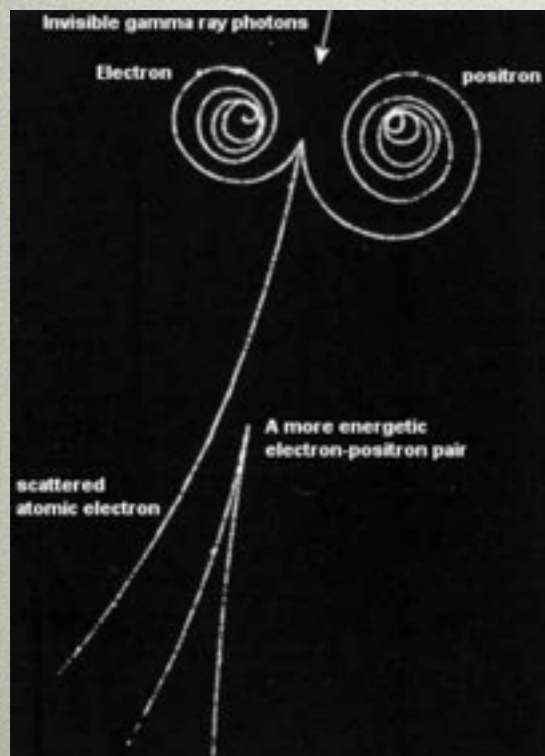
M.Q. + R.R.



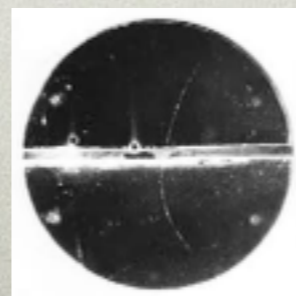
En 1928, Paul Dirac essaie de décrire l'électron par une équation quantique ET relativiste (au sens relativité restreinte).

L'équation a deux solutions:

- l'une décrit bien un électron
- l'autre solution décrit une particule presque identique (même masse) mais de charge opposée.



En 1932, Carl Anderson démontre expérimentalement l'existence du positron:
un électron de charge positive



PRENDRE DES PARTICULES DE MATIÈRE
AJOUTER LES INTERACTIONS
BIEN MÉLANGER AVEC LA MQ+RR



LE MODÈLE STANDARD ET LE BOSON DE HIGGS

RÉCAPITULATIF

quarks

leptons

messagers
interactions

stable

 up	 down	 electron	 neutrino e
 charm	 strange	 muon	 neutrino μ
 top	 beauty	 tau	 neutrino τ

instable

instable



stable

stable

instable

La nature préfère les particules légères: les particules lourdes se désintègrent quasiment instantanément

LE BOSON DE HIGGS

- 1960-1967, Glashow Salam & Weinberg propose une description cohérente des particules et de leurs interactions: le *modèle standard (MS)*.
- *Les interactions électromagnétique et faible sont unifiées!*
- Prédit remarquablement toutes les observations expérimentales mais toutes les particules doivent être de masse nulle, en particulier les bosons Z et W, cousins du photon...
- Or les bosons W, Z sont très massifs (interaction faible de très courte portée)
- Mécanisme de Brout-Englert-Higgs permet de "donner une masse" aux particules
- Une nouvelle particule résulte de ce mécanisme: *le boson de Higgs*



LE BOSON DE HIGGS



Cocktail
le "vide quantique"



Arrive
Lady Gaga



Lady Gaga est
"lourde"

LE BOSON DE HIGGS



Cocktail
le "vide quantique"



rumeur
Lady Gaga est là

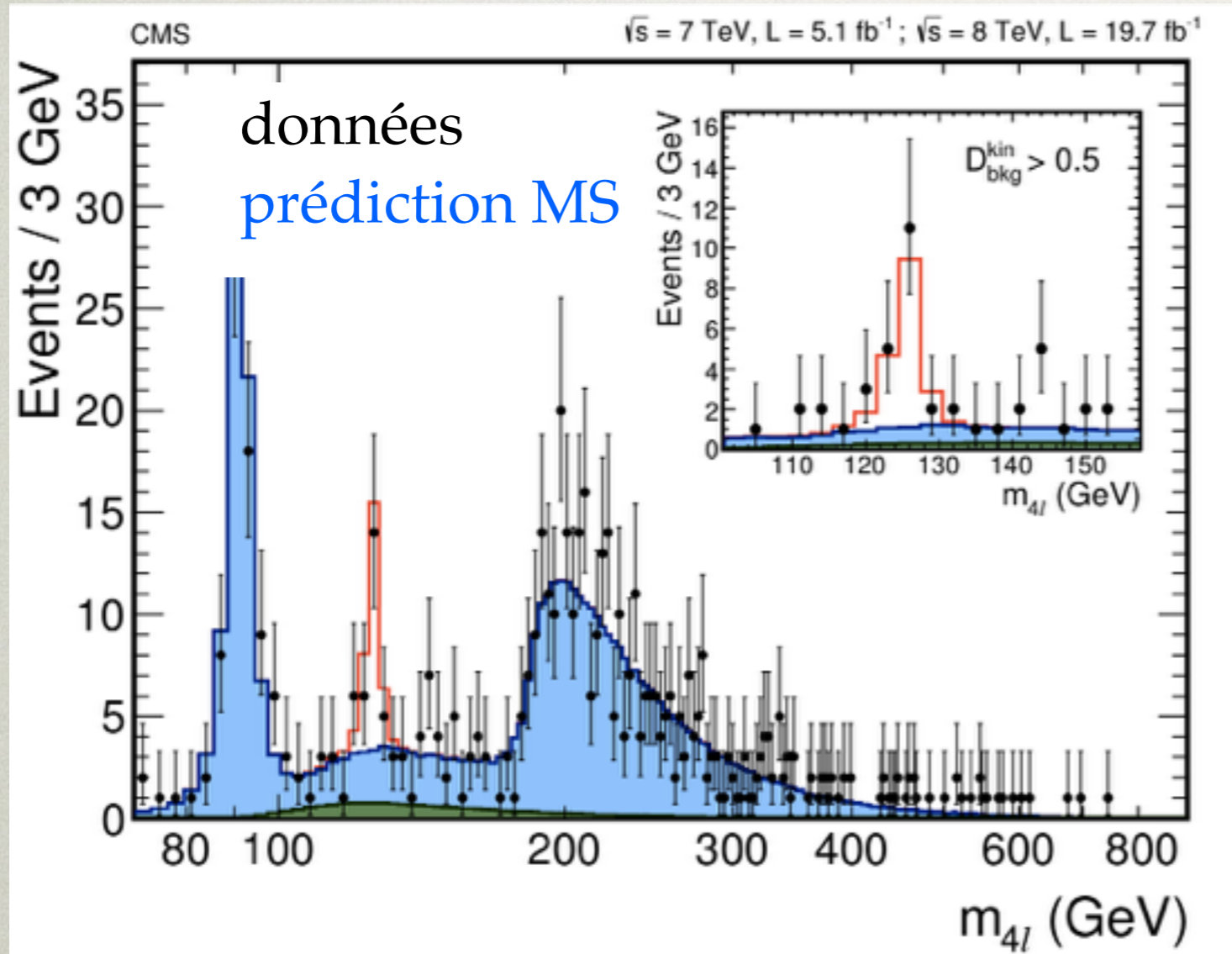


La rumeur se propage
(elle acquiert un masse)



A force de taper dans rien, il finit
toujours par en sortir quelque chose.

LA DÉCOUVERTE DU BOSON



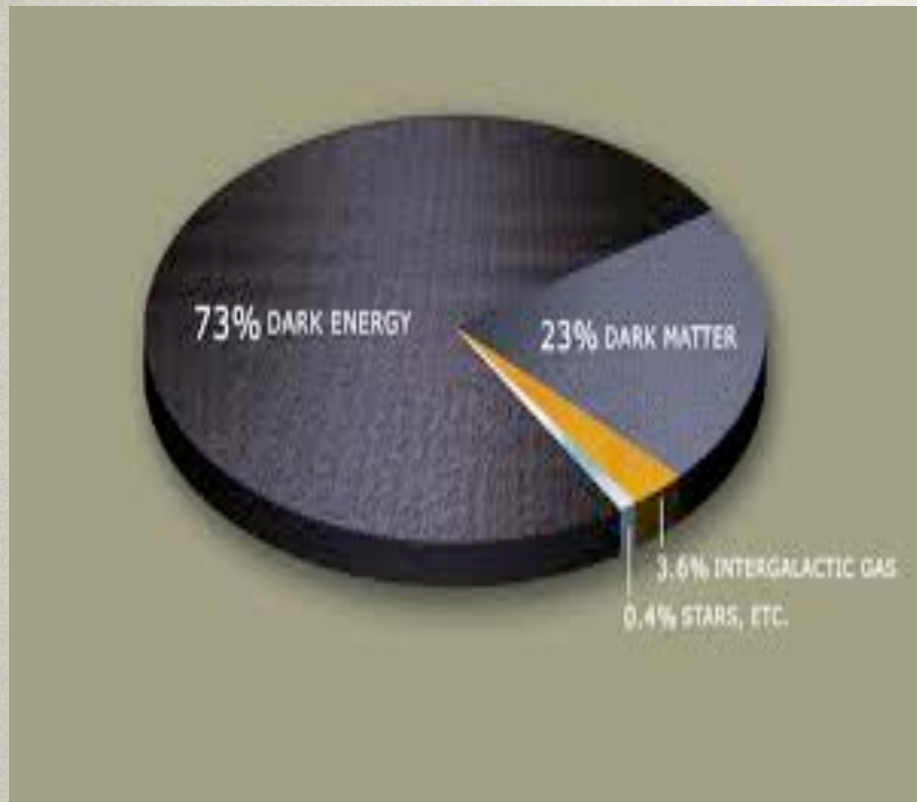
Collisions sélectionnées provenant potentiellement d'un boson de Higgs: plusieurs processus physiques sont très similaires. Pour une collision donnée, on ne peut pas prédire la valeur de la variable m_{4l} , la M.Q. prédit seulement sa "distribution" statistique pour les MS.

LE MS, C'EST SIMPLE

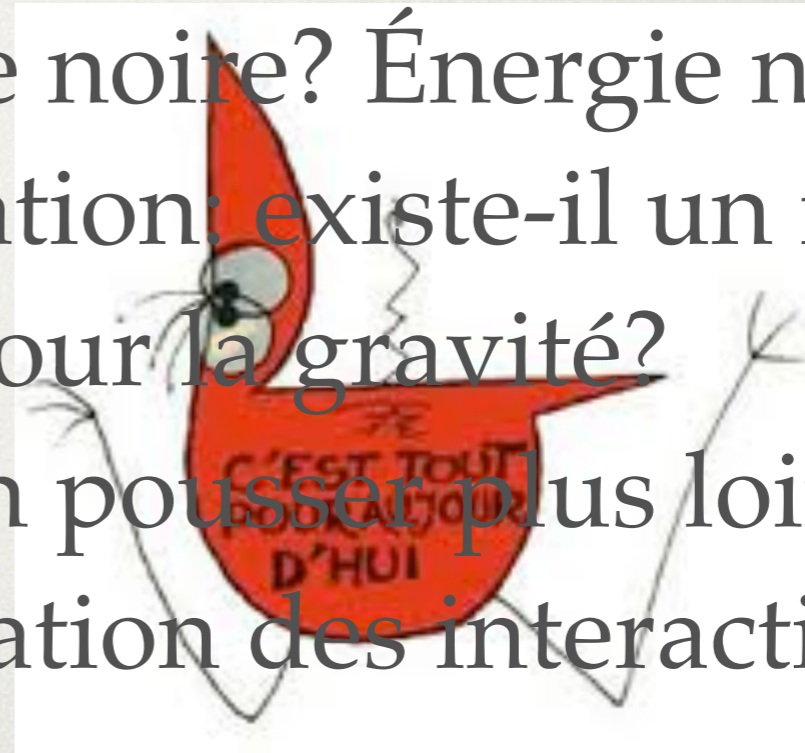


$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c \\
 & -\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 - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- \\
 & -M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \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 \\
 & -igc_w \left[\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_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] \\
 & -igs_w \left[\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^+) \right] \\
 & -\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 \left[A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g\alpha \left[H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^- \right] \\
 & -\frac{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)^2 H^2 \right] - gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H \\
 & -\frac{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] + \frac{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] \\
 & +\frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + igs_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^+) + igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{4}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^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\lambda \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma^\lambda \partial \nu^\lambda \\
 & -\bar{u}_j^\lambda (\gamma^\lambda \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\lambda \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_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 \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] \\
 & +\frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] \\
 & +\frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[H(\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right] \\
 & +\frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left[-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) \right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left[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) \right] \\
 & -\frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H(\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H(\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- \\
 & +\bar{X}^0 \left(\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) 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_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + igs_w 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^2} \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}$$

MAIS CE N'EST PAS FINI



Matière noire? Énergie noire?
Gravitation: existe-il un messenger
aussi pour la gravité?
Peut-on pousser plus loin
l'unification des interactions?



...

