



# PARTICULES ET INTERACTIONS

MASTER CLASS 2013 @ IRFU

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

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

FABRICE COUDERC

26 FÉVRIER 2013

# DE LA SIMPLICITÉ AVANT TOUTE CHOSE

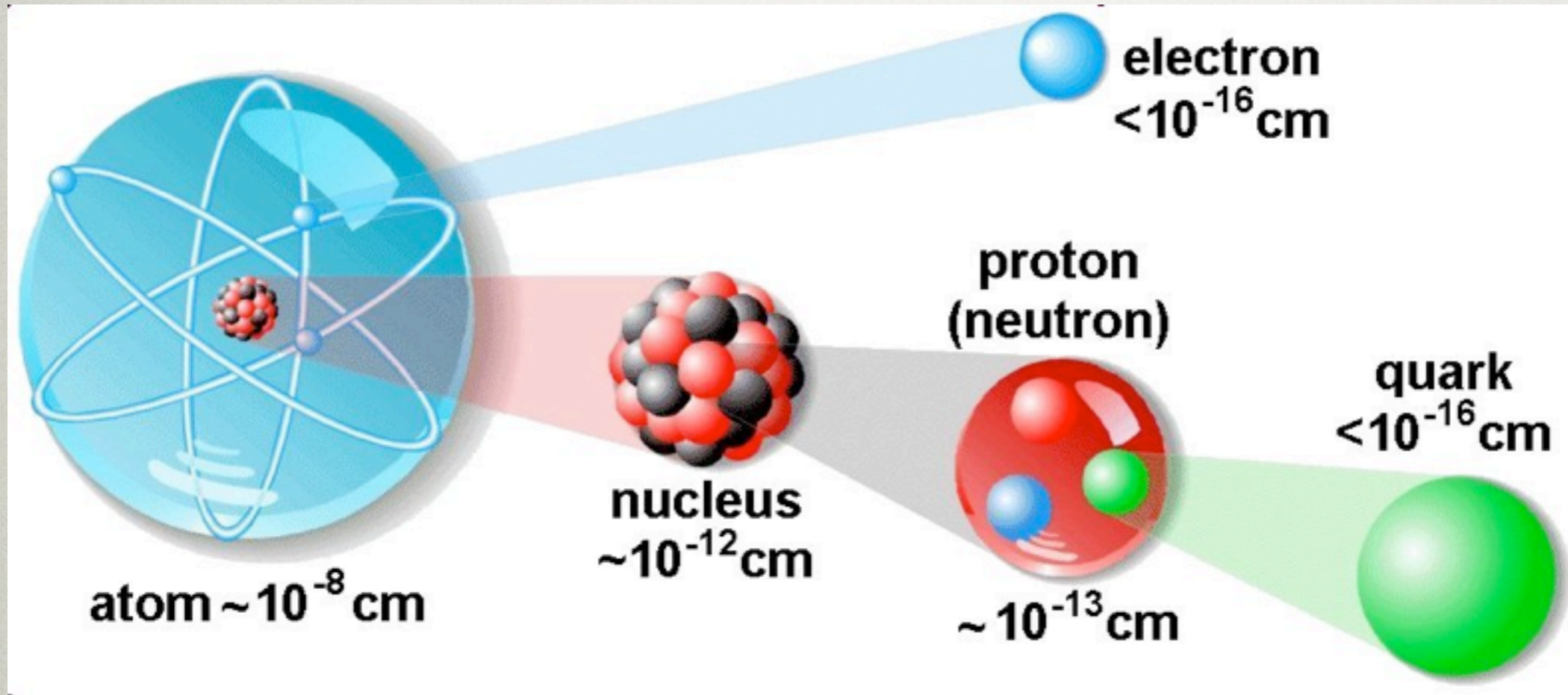


# DE LA SIMPLICITÉ AVANT TOUTE CHOSE

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

# DE LA SIMPLICITÉ AVANT TOUTE CHOSE



électrons

quarks **up**  
**down**

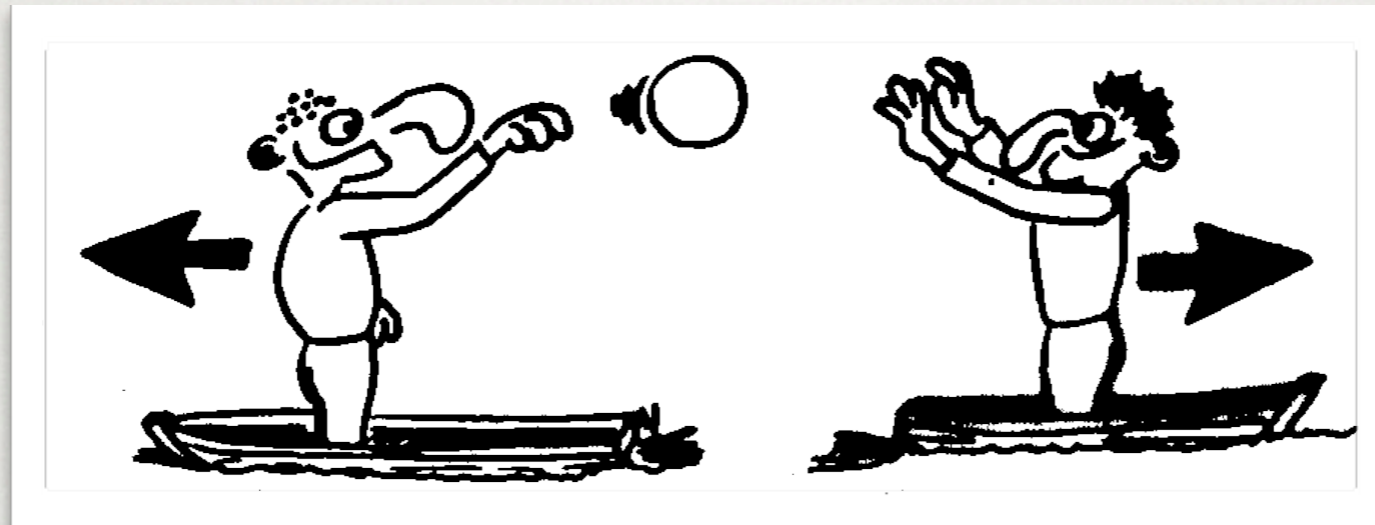
0.000000000001 m      /1000      /10      ?

*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?

---



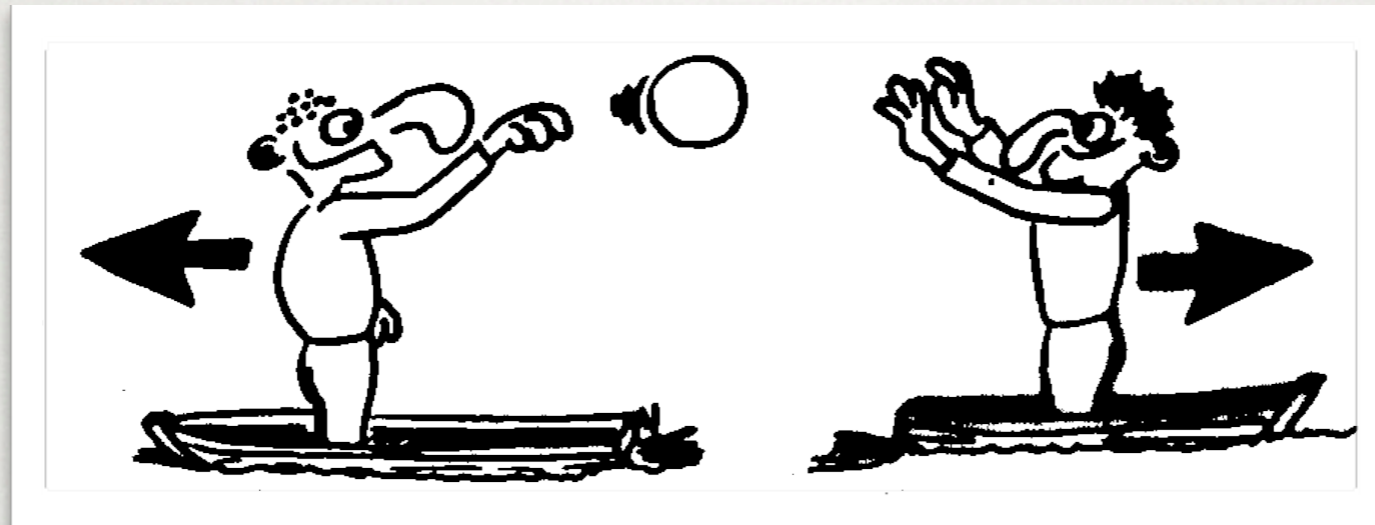
vue d'artiste

*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)

# COMMENT ÇA TIENT TOUT ÇA?



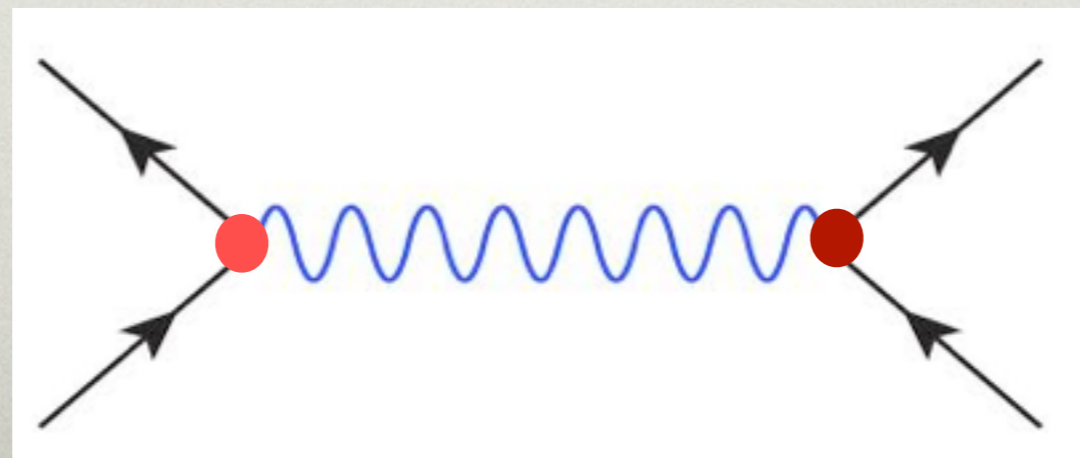
vue d'artiste

*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 ( $\gamma$ ) entre particules chargées

$\gamma$ : masse nulle (portée infinie)  
charge électrique nulle

# INTERACTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE

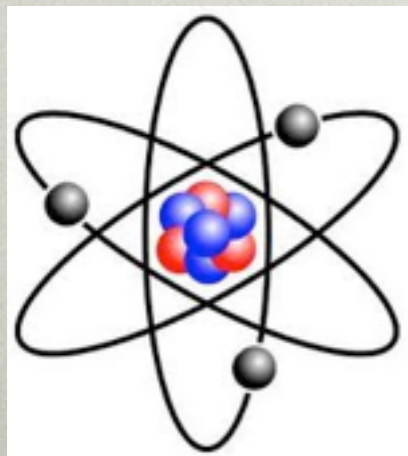


Unification des phénomènes électriques  
et magnétique 1820-1830

La "lumière" est aussi impliquée  
Maxwell 1890

*Électromagnétisme: échange d'un  
photon ( $\gamma$ ) entre particules chargées*

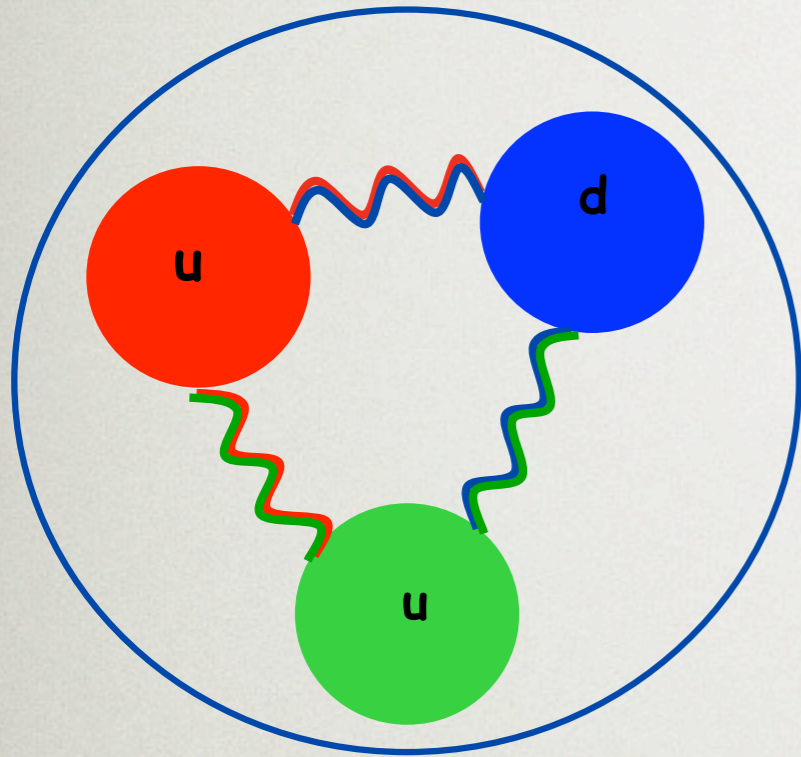
$\gamma$ : masse nulle (portée infinie)  
charge électrique nulle





# INTERACTION FORTE

---



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

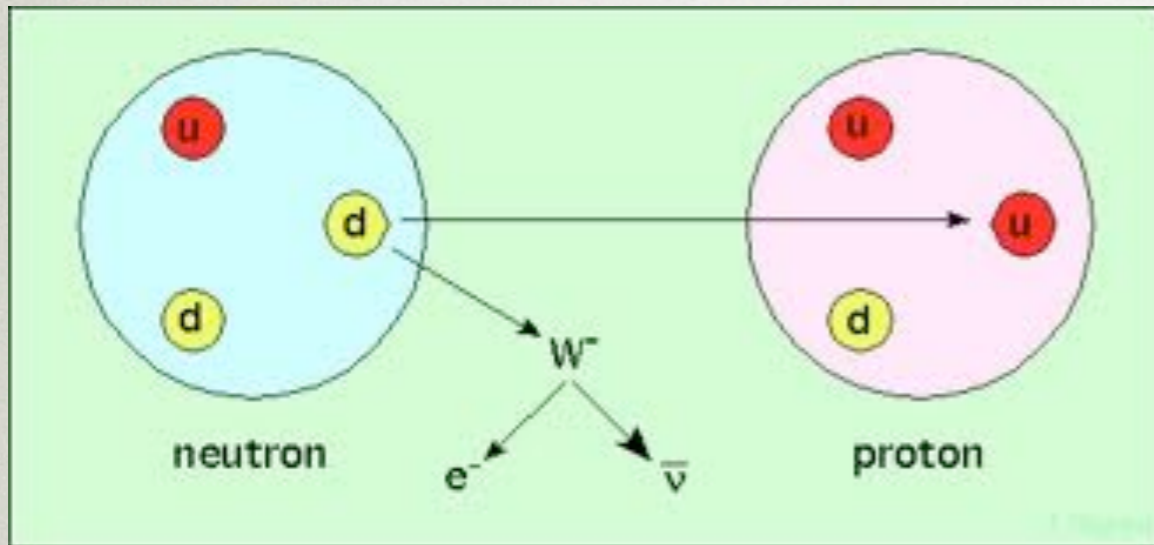
L'interaction forte colle les quarks entre eux, elle est responsable de la cohésion du noyau atomique

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  $\beta$*
- 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

# 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 acquière 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.

# 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):

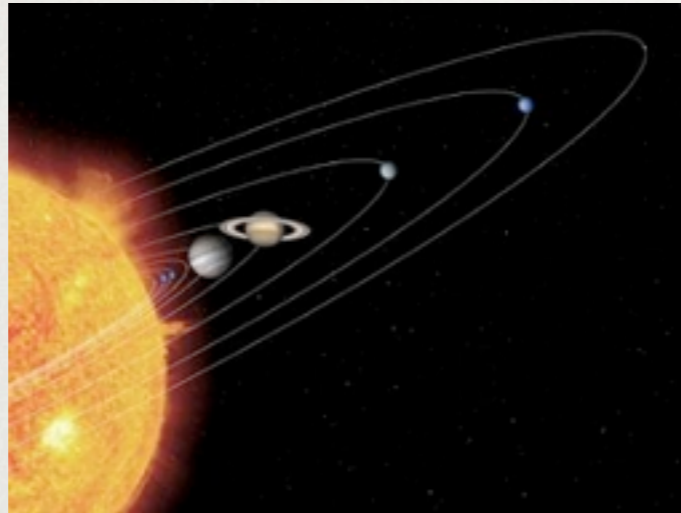
- la carte est NOIRE ET BLANCHE, au moment de la mesure elle acquiert sa couleur observée!
- 1/2: chat noir
- 1/2: chat blanc
- l'aléatoire est intrinsèque à la mécanique quantique, on ne peut pas trouver une théorie qui permettrait de donner une couleur à la carte avant de l'observer.

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

# MÉCANIQUE QUANTIQUE

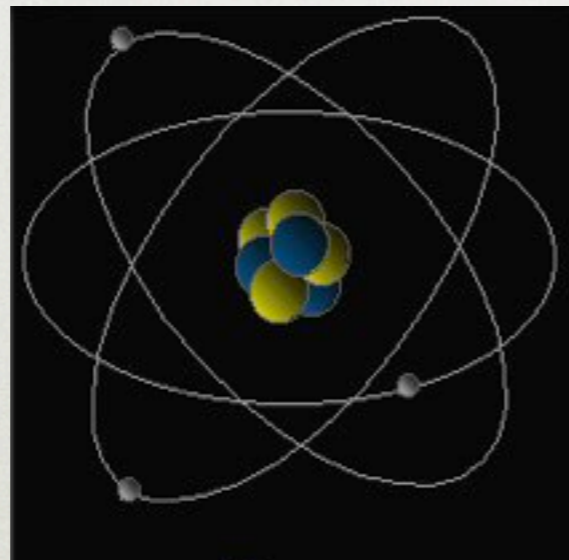
---

Monde  
classique

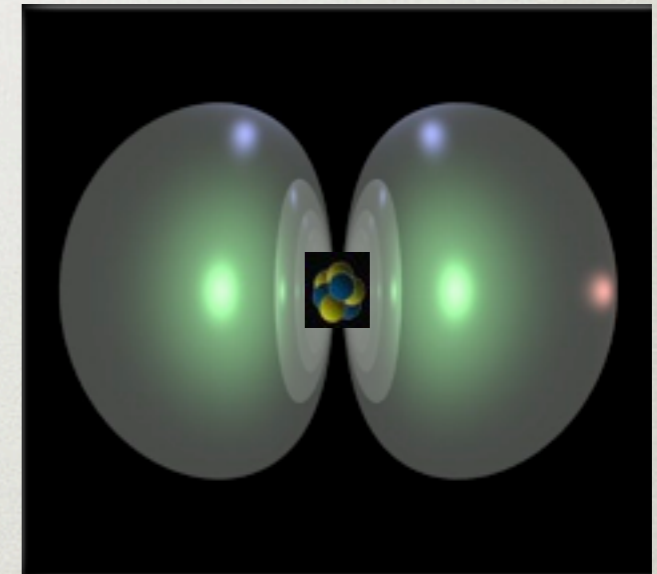


- Position de la terre dans 12356 ans?  
réponse simple et précise...
- Position de l'électron autour du noyau?  
pas si simple, on ne peut prédire qu'une  
probabilité de présence

Monde  
quantique



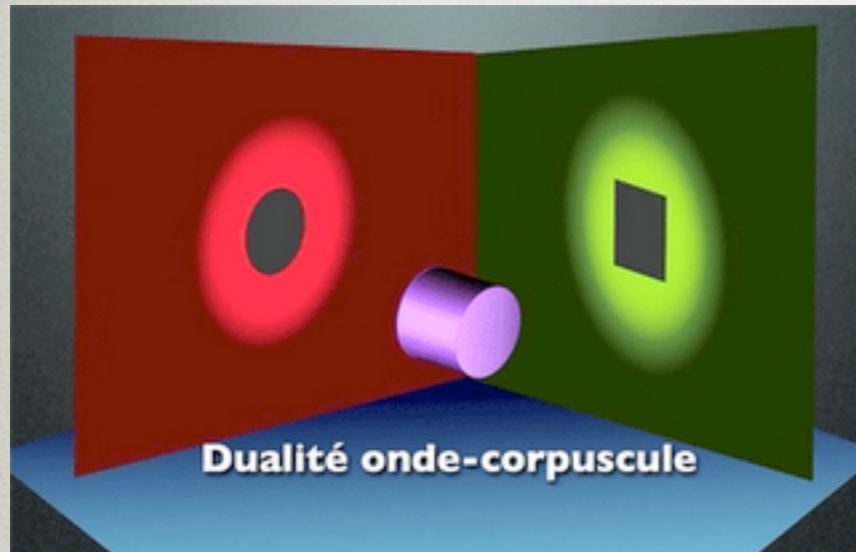
représentation classique:  
simple mais erronée!



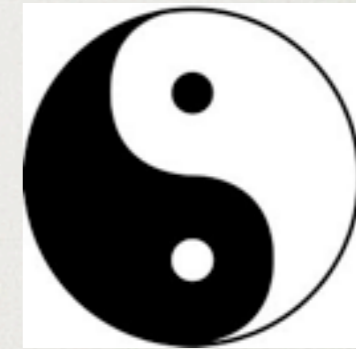
représentation plus réaliste:  
l'électron est partout à la fois!

... 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...

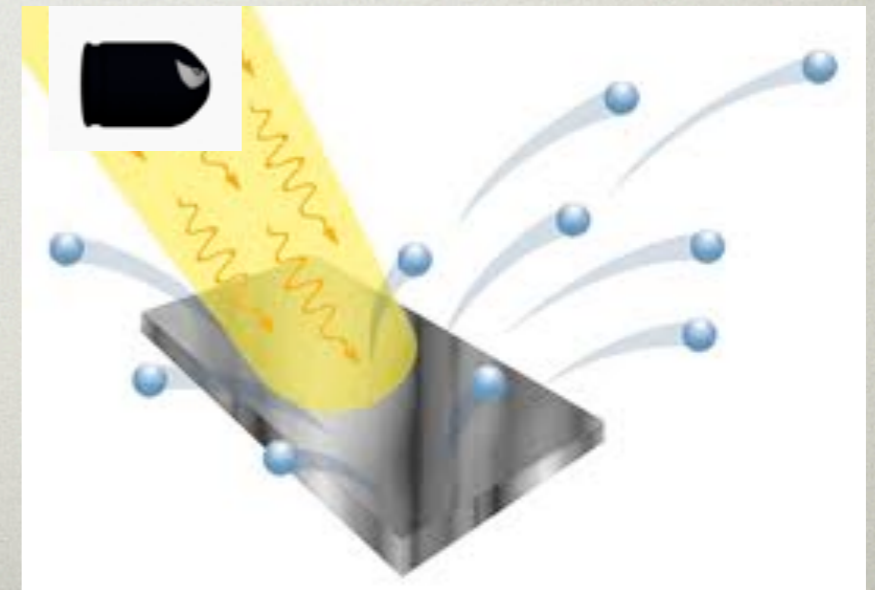
*Exemples:* Ondes radios (lumière), sonores...



*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.

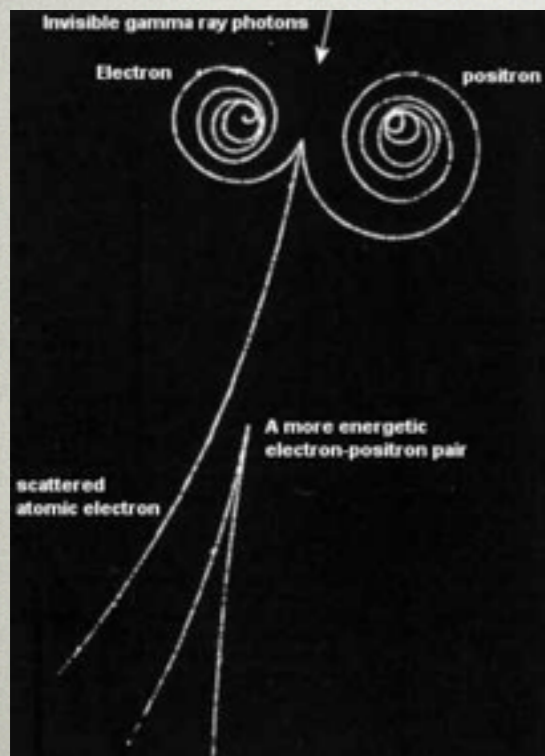
# M.Q. + R.R.



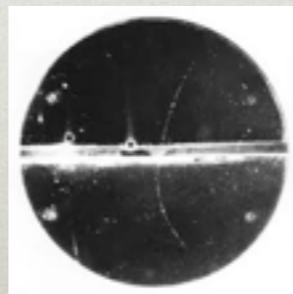
En 1928, Paul Dirac essaie de décrire l'électron par une équation quantique ET relativiste (au sens relativité restreinte).

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



# RÉCAPITULATIF

quarks

leptons

messagers  
interactions



# RÉCAPITULATIF

quarks

leptons

messagers  
interactions

 up	 down	 electron	 neutrino $e$
 charm	 strange	 muon	 neutrino $\mu$



# RÉCAPITULATIF

quarks

leptons

messagers  
interactions

 up	 down	 electron	 neutrino $e$
 charm	 strange	 muon	 neutrino $\mu$
 top	 beauty	 tau	 neutrino $\tau$





# RÉCAPITULATIF

quarks

leptons

messagers  
interactions

 up	 down	 electron	 neutrino $e$
 charm	 strange	 muon	 neutrino $\mu$
 top	 beauty	 tau	 neutrino $\tau$



# RÉCAPITULATIF

quarks

leptons

messagers  
interactions

 up	 down	 electron	 neutrino $e$
 charm	 strange	 muon	 neutrino $\mu$
 top	 beauty	 tau	 neutrino $\tau$



# RÉCAPITULATIF

quarks

leptons

messagers  
interactions

stable

 up	 down	 electron	 neutrino e
 charm	 strange	 muon	 neutrino $\mu$
 top	 beauty	 tau	 neutrino $\tau$

instable

instable

 photon	stable
 gluon	stable
 $Z^0 W^\pm$	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!*

# 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)

# 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



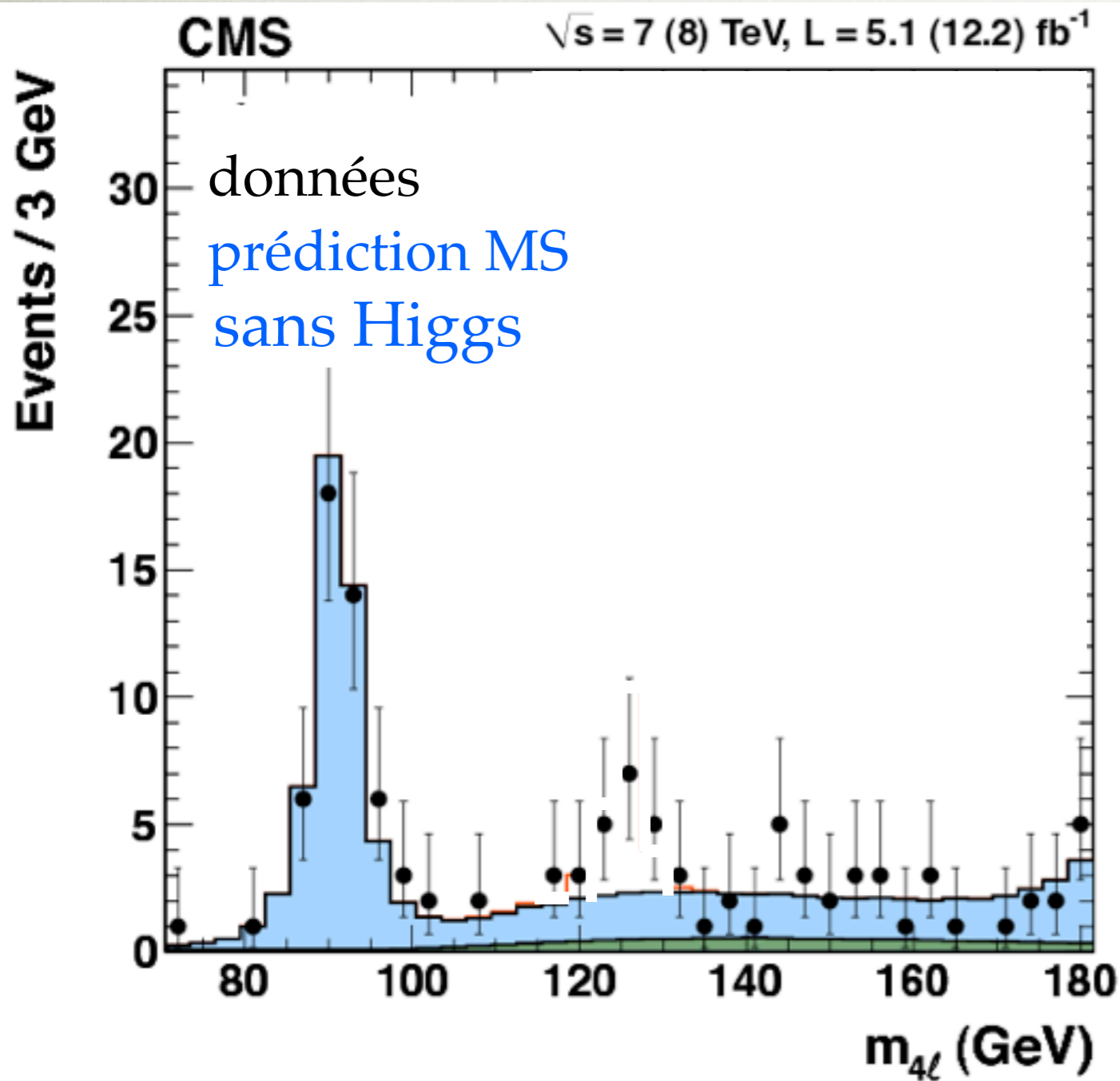
La rumeur se propage  
(elle acquiert un masse)



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

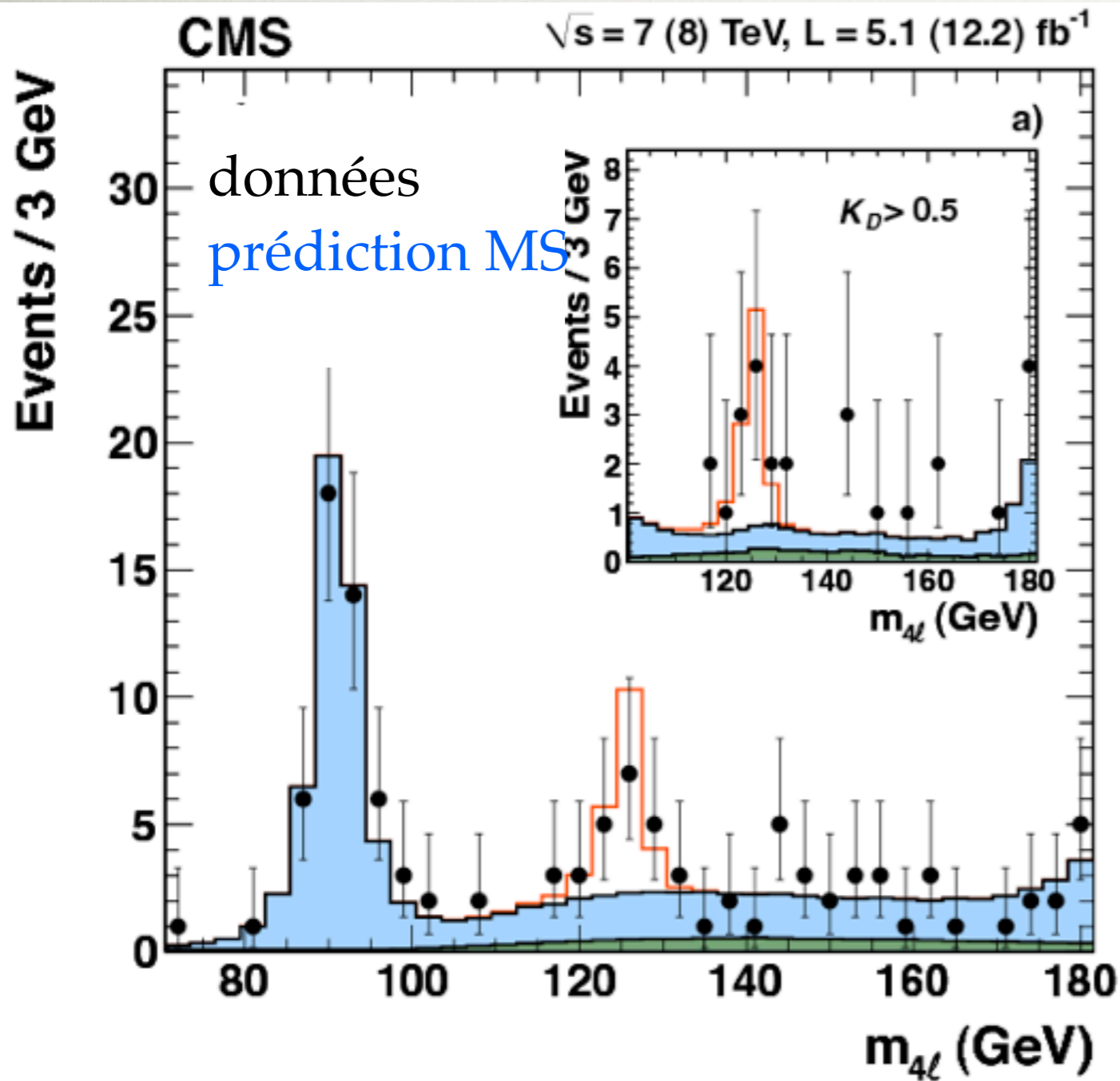


# LA DÉCOUVERTE DU BOSON



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  $m_{4\ell}$ , la M.Q. prédit seulement sa "distribution" statistique pour les MS.

# LA DÉCOUVERTE DU BOSON



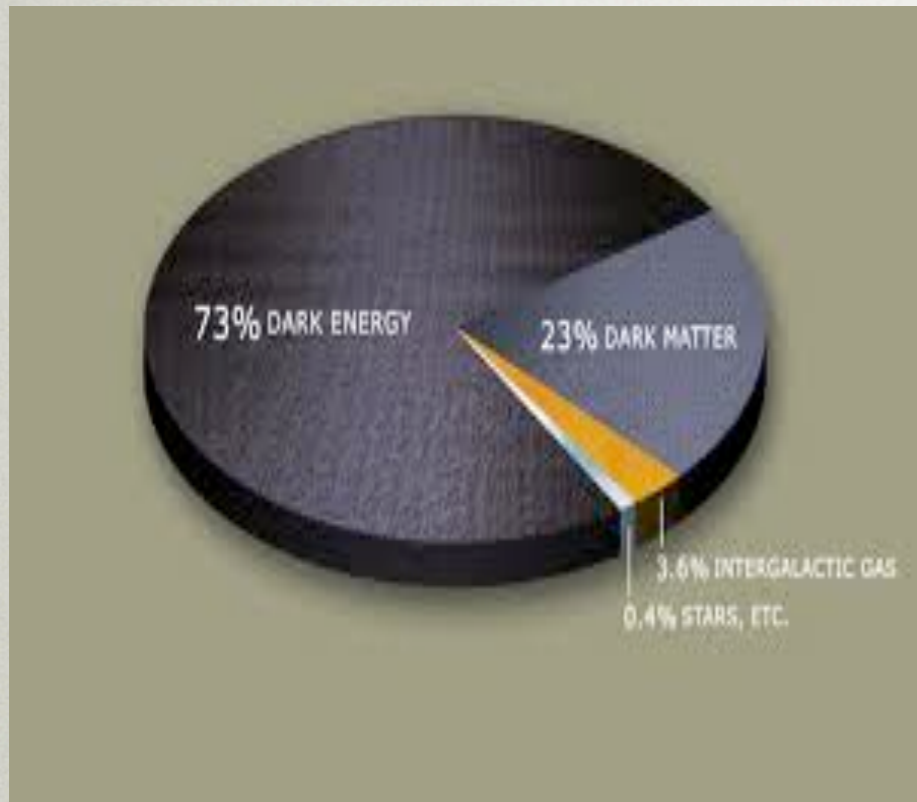
Collisions sélectionnées provenant potentiellement d'un boson de Higgs: plusieurs processus physiques sont très similaires. Pour une collision donnée, on ne peut pas prédire la valeur de la variable  $m_{4\ell}$ , la M.Q. prédit seulement sa "distribution" statistique pour les MS.

# 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 \Lambda_\nu \partial_\mu \Lambda_\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 \Lambda_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \Lambda_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \Lambda_\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 (\Lambda_\mu W_\mu^+ \Lambda_\nu W_\nu^- - \Lambda_\mu \Lambda_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) \\
 & +g^2 s_w c_w \left[ \Lambda_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2\Lambda_\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 \Lambda_\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 \Lambda_\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 \Lambda_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) \\
 & +\frac{1}{2}ig^2 s_w \Lambda_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 \Lambda_\mu \Lambda_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda \\
 & -\bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + igs_w \Lambda_\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 \Lambda_\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^-] + igM s_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?

...



# MAIS CE N'EST PAS FINI

