

# Le Modèle Standard I

Sébastien Descotes-Genon

`descotes@th.u-psud.fr`

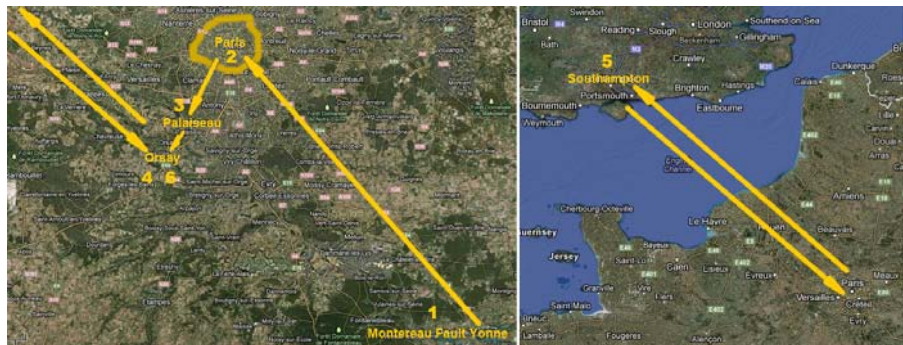
Laboratoire de Physique Théorique  
CNRS & Université Paris-Sud, 91405 Orsay, France

Science à l'école, CPPM, 19 juin 2014



# Préambule

- 39 ans, directeur de recherche CNRS
- Thèse à Orsay (Institut de Physique Nucléaire)
- 2 ans de post-doctorat à Southampton (Grande-Bretagne)
- Actuellement, directeur du Lab. de Physique Théorique (Orsay)



Mots-clés: Physique des particules, Physique des saveurs,  
Asymétrie particule/antiparticule, Vulgarisation

# Deux heures

## Première heure

- Notion de constituants élémentaires
- La matière dans le Modèle Standard
- Les interactions dans le Modèle Standard
- Le cas de l'interaction électromagnétique et de l'interaction forte

## Deuxième heure

- Le cas de l'interaction faible
- Le boson de Higgs
- Les questions en suspens

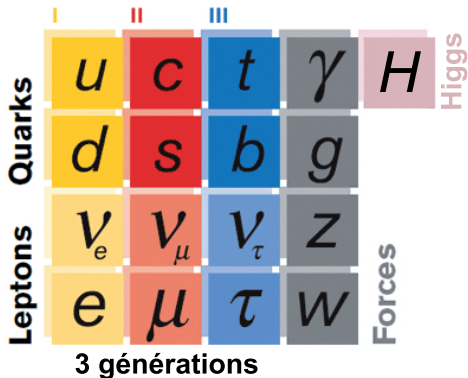
# Constituants élémentaires

# D'une démarche analytique...

A hand-drawn periodic table of elements, showing atomic numbers and chemical symbols. The table is organized into groups and periods, with the lanthanide and actinide series shown as separate rows at the bottom.

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lw	

... à une autre, un siècle plus tard

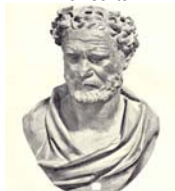


# Physique des particules

Au fond, de quoi la matière est-elle constituée ?

- Antiquité (philosophe grec)  
air, eau, terre, feu ou atomes ?
- 18-19ième siècle (chimiste)  
molécules faites d'atomes
- 19-20ème siècle  
(physicien(ne) atomique & nucléaire)  
électrons et noyaux atomiques
- 21ème siècle  
(physicien(ne) des particules)  
particules élémentaires

Démocrite



Lavoisier



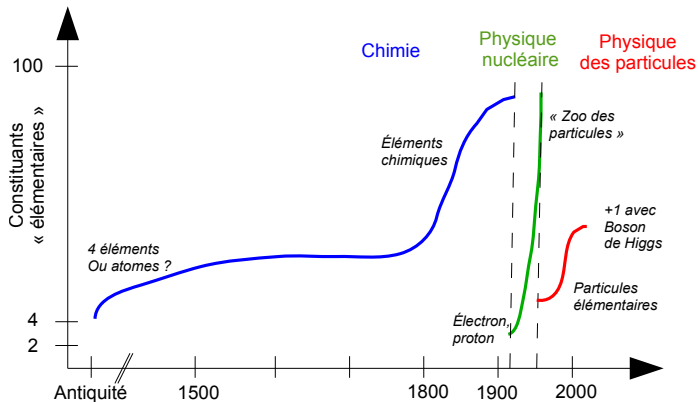
Rutherford



Weinberg



# A la bourse des particules élémentaires

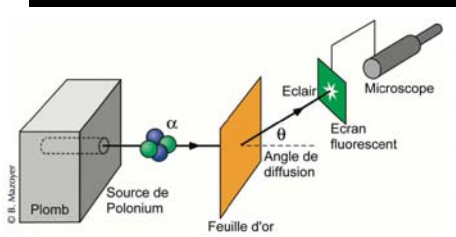
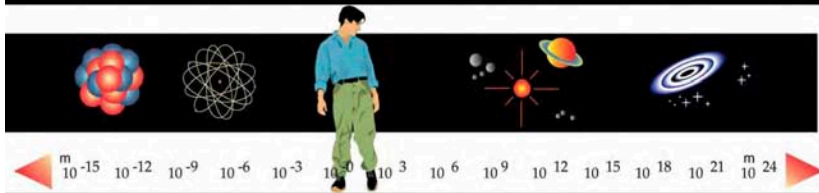


- les "krachs" ne sont pas rares...
- ... du fait de changements de paradigmes (évolution de la notion de constituants élémentaires)



La Physique des particules étudie la matière dans ses dimensions les plus petites

L'astrophysique étudie la matière dans ses dimensions les plus grandes



Télescopes  
Optique et radio

elles  
ulaires

énergétiques (UV, X,  $\gamma$ )

- ou d'autres projectiles déviés par constituants
  - 1909: Geiger, Marsden, Rutherford "voient" le noyau avec  $\alpha$  sur atome d'or
  - 1968: SLAC (Stanford) "voit" les quarks avec  $e$  sur protons et neutrons

## Quelques ordre de grandeur

$E$ : accélération d'un électron soumis à 1 volt de différence de potentiel

1 electron-volt:  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Energie thermique d'une molécule	0.04 eV
Lumière visible	1.5-3.5 eV
Energie de dissociation NaCl en ions	4.2 eV
Energie d'ionisation d'un atome d'hydrogène	13.6 eV
Energie d'un électron frappant un écran cathodique	20 keV
Rayons X pour la médecine	0.2 MeV
Rayonnements nucléaires ( $\alpha, \beta, \gamma$ )	1-10 MeV
Energie de masse d'un proton	1 GeV
Énergie de collision au LHC	7-14 TeV
Rayons cosmiques	1 MeV à 1000 TeV

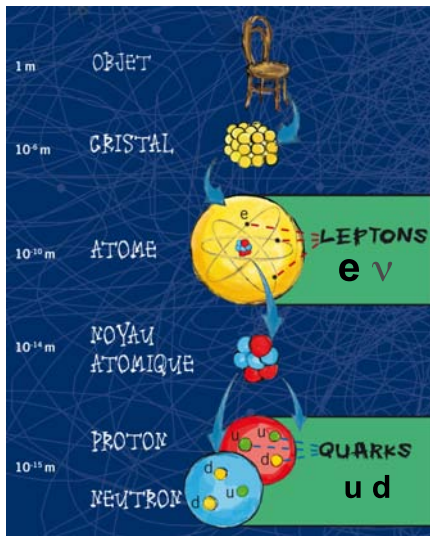
$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}, 1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

**Unités naturelles:** Cte de Planck  $\hbar =$  vitesse de la lumière  $c = 1$ :

$$\implies 1 \text{ eV} = 1 / (0.2 \mu\text{m}) = 10^{-36} \text{ kg} = 1 / (0.7 \text{ fs})$$

# La matière

# Les composants de l'atome



	I	II	III	
Quarks	<i>u</i>	<i>c</i>	<i>t</i>	$\gamma$
	<i>d</i>	<i>s</i>	<i>b</i>	<i>g</i>
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	<i>Z</i>
	<i>e</i>	$\mu$	$\tau$	<i>W</i>
				Forces

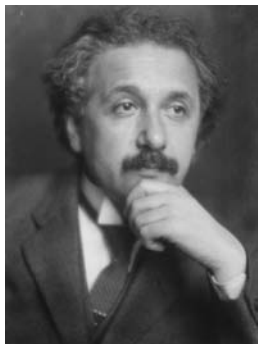
**3 générations**

- Quarks: protons, neutrons
- Électron: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives:  $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$  (15 min)

Mais  $E$  augmentant, des surprises avec cette approche analytique...

# Réconcilier deux célèbres adversaires

*Albert Einstein*



**Relativité restreinte**

(Poincaré, Lorentz. . .)

$c$  vitesse de la lumière ( $v$  max)

objets rapides

*Niels Bohr*



**Mécanique quantique**

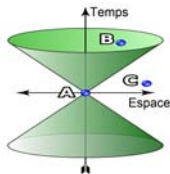
(Schrödinger, Heisenberg. . .)

$h$  quantum d'action ( $E \cdot t$  min)

temps courts

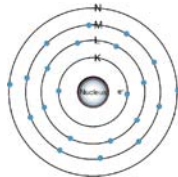
# ... défiant le sens commun

## Relativité restreinte



- Espace et temps reliés
- Loi de composition des vitesses modifiée
- Simultanéité dépendant du référentiel, notion de causalité à modifier
- Equivalence entre énergie et matière  $E = mc^2$

## Mécanique quantique



- Processus discontinus ( $\Delta E$  niveaux atomiques)
- Etats qu'on peut superposer (chat de Schrödinger)
- Probabilités (être dans un état, changer d'état)
- Principe d'incertitude d'Heisenberg

Plus de temps, d'espace absolus

Plus de déterminisme classique

# La relativité

- **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
- dilatation des temps, contraction des longueurs
- notion de référentiel propre (au repos) de la particule

- **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
  - dilatation des temps, contraction des longueurs
  - notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- **Energie, impulsion et vitesse**

$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

- masse: invariant de Lorentz (identique dans tout référentiel)
- représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée



- **Espace et temps** liés lors d'un changement de référentiel

$$t' = \gamma(t - vx/c^2), \quad x' = \gamma(x - vt) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
  - dilatation des temps, contraction des longueurs
  - notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- **Energie, impulsion et vitesse**

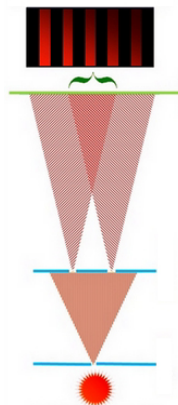
$$E = \frac{Mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad p = \frac{Mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E^2 - (pc)^2 = (Mc^2)^2$$

- masse: invariant de Lorentz (identique dans tout référentiel)
  - représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée
- **Equivalence entre masse et énergie**  $E = Mc^2$ 
    - Possible de convertir de la matière en énergie et vice-versa

# La mécanique quantique

- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique



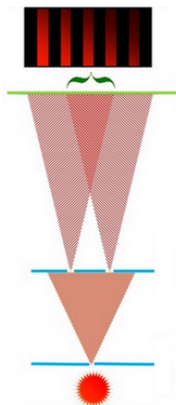
# La mécanique quantique

- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

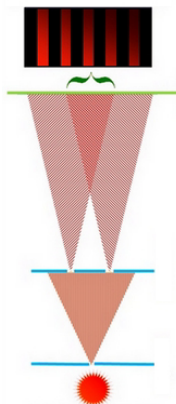
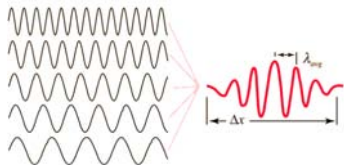
- Probabilités

- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$   
avec  $A(\mathcal{C})$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$



# La mécanique quantique

- Lumière
  - Onde: expériences des fentes de Young
  - Particule: explication de l'effet photoélectrique
- Probabilités
  - Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
  - Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
  - $P(X \rightarrow Y) = |\sum_C \text{chemin } X \rightarrow Y A(C)|^2$   
avec  $A(C)$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_c$
- Toute particule décrite par une superposition d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



# La mécanique quantique

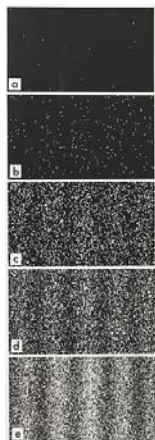
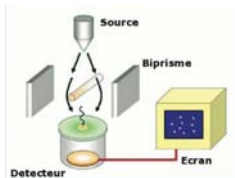
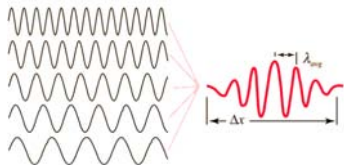
- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

- Probabilités

- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_C \text{chemin } X \rightarrow Y A(C)|^2$   
avec  $A(C)$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_C$

- Toute particule décrite par une superposition d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



# La mécanique quantique

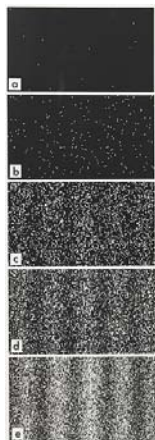
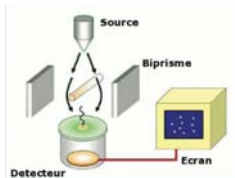
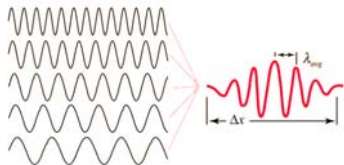
- Lumière

- Onde: expériences des fentes de Young
- Particule: explication de l'effet photoélectrique

- Probabilités

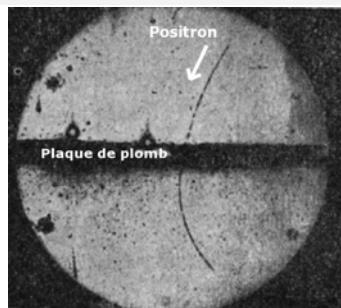
- Proba de présence ( $\equiv$  intensité) donnée par  $|A|^2$
- Principe d'incertitude d'Heisenberg  $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_C \text{chemin } X \rightarrow Y A(C)|^2$   
avec  $A(C)$  amplitudes complexes  $\langle Y|X \rangle_C$

- Toute particule décrite par une superposition d'ondes planes  $e^{i(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})}$  avec  $p = h/\lambda$ ,  $E = h\nu$



$\implies$  Purement quantique : le spin (moment angulaire intrinsèque) !

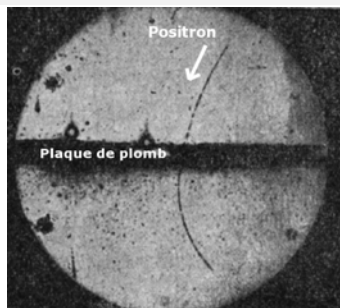
# Les antiparticules



Anderson (1932): rayons cosmiques

- Chambre de Wilson remplie de vapeur d'eau avec  $\vec{B}$
- Des gouttes d'eau se forment sur le passage des particules chargées
- Même masse qu'un électron, mais charge opposée : **positron**

# Les antiparticules



Anderson (1932): rayons cosmiques

- Chambre de Wilson remplie de vapeur d'eau avec  $\vec{B}$
- Des gouttes d'eau se forment sur le passage des particules chargées
- Même masse qu'un électron, mais charge opposée : **positron**

Dirac (1928): équation pour décrire l'électron

- Mécanique Quantique + Relativité restreinte
$$E = p^2/(2m_e) \rightarrow E^2 = p^2 c^2 + m_e^2 c^4$$
- Solution  $E < 0$  vue comme **anti-particule**
- Permet l'équivalence Énergie ( $E = 2m_e c^2$ )  
↔ Masse (paire particule/antiparticule)
- De nouvelles particules dans des collisions ?





# Les trois générations



	I	II	III	
Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$
	$d$	$s$	$b$	$g$
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
	$e$	$\mu$	$\tau$	$W$
	3 générations			Forces

- Dans les rayons cosmiques ('30), puis accélérateurs de particules
- Copies de la première famille (charge électrique. . .) **sauf masses !**  
top  $t$  60 000 fois plus lourd que up  $u$  ( $\simeq$  atome d'or)
- Créées en paires particule-antipart. dans collisions  $E > 2m_q c^2$
- Instables (sauf  $\nu$ 's):  $t$  se désintègre en quelques  $10^{-25}$  secondes  
 $t \rightarrow be^+\nu$  (99.8%),  $t \rightarrow se^+\nu$  (0.15%),  $t \rightarrow de^+\nu$  ( $6 \times 10^{-5}$ )...

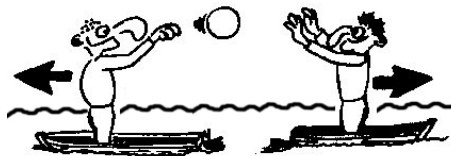
# Les interactions

# Les forces fondamentales

	I	II	III	
Quarks	$u$	$c$	$t$	$\gamma$
Quarks	$d$	$s$	$b$	$g$
Leptons	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$Z$
Leptons	$e$	$\mu$	$\tau$	$W$

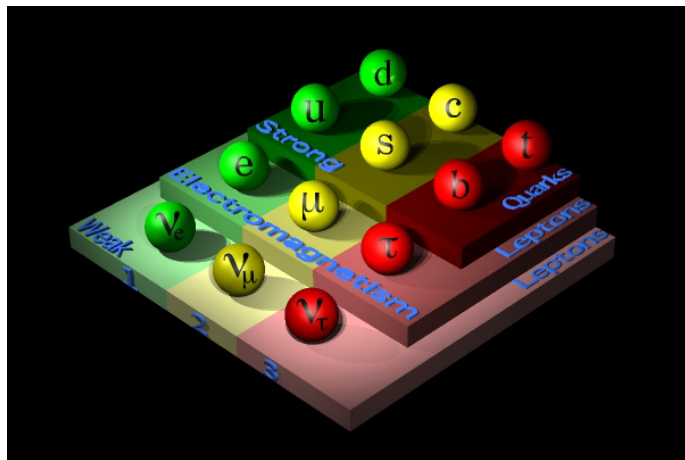
3 générations

Forces



- Gravitation  
étoiles, galaxies... [10<sup>-40</sup>]
  - Force faible (bosons  $W, Z$ )  
radioactivité  $\beta$  [10<sup>-8</sup>]
  - Electromagnétisme (photon  $\gamma$ )  
électricité, chimie... [10<sup>-2</sup>]
  - Force forte (gluons  $g$ )  
cohésion des noyaux [1]
- 
- 3 interactions sur 4 en termes d'échanges de particules (boson médiateurs)
  - gravitation négligeable [intensité relative au niveau subatomique]

# Des différences de sensibilités

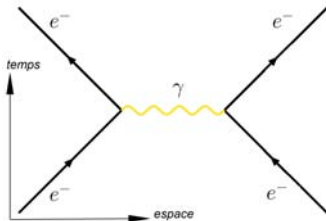
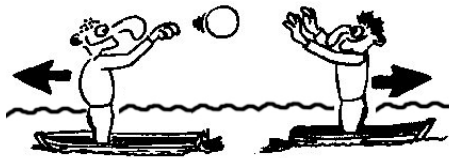


- Faible : tout le monde
- Electromagnétique : tout le monde sauf les neutrinos
- Forte : seulement les quarks

# Matière et interaction, tout est particule !

Interaction décrite par échange de bosons vecteurs, différenciée par

- type de messenger
- portée de l'interaction
- charge du messenger



Portée de l'interaction  $V(r) \propto e^{-Mr}/r$

- Electromag. ( $M_\gamma = 0$ ): Potentiel de Coulomb  $1/r$  avec portée  $\infty$
- Faible ( $M_{W,Z} \simeq 80 \text{ GeV}/c^2$ ): Suppress. exponentielle avec portée subatomique ( $r_0 = \hbar c/M = 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$ ), pas d'état lié

# Les adversaires réconciliés



## Théorie Quantique des Champs

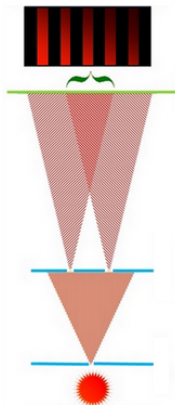
- une particule est vue comme excitation du vide qui se propage
- ... comme une vague se déplaçant sur la mer
- subissant des interactions ponctuelles qui modifient
  - l'état des particules (impulsion...)
  - leur nature (désintégrations)
  - ou leur nombre (création/annihilation paires particule/antipart.)

# La théorie quantique des champs

## Optique

- Intensité lumineuse
- Interférences liées à une différence de marche

$$I = |A|^2 = |e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2}|^2 = 2 + 2 \cos(\delta_1 - \delta_2)$$



# La théorie quantique des champs

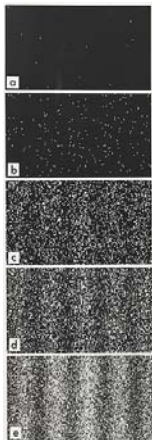
## Optique

- Intensité lumineuse
- Interférences liées à une différence de marche

$$I = |A|^2 = |e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2}|^2 = 2 + 2 \cos(\delta_1 - \delta_2)$$

## Mécanique Quantique

- Probabilité de présence d'un électron





# La théorie quantique des champs

## Optique

- Intensité lumineuse
- Interférences liées à une différence de marche

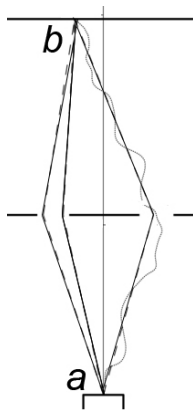
$$I = |A|^2 = |e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2}|^2 = 2 + 2 \cos(\delta_1 - \delta_2)$$

## Mécanique Quantique

- Probabilité de présence d'un électron
- Chaque chemin noté par une action  $S$

$$P(a \rightarrow b) = |A(a \rightarrow b)|^2 = \left| \sum_{\text{tous chemins}} e^{i \cdot S/\hbar} \right|^2$$

- Limite classique:  $\hbar \rightarrow 0$ , seul reste le chemin d'action minimale (principe de Maupertuis)



# La théorie quantique des champs

## Optique

- Intensité lumineuse
- Interférences liées à une différence de marche

$$I = |A|^2 = |e^{i\delta_1} + e^{i\delta_2}|^2 = 2 + 2 \cos(\delta_1 - \delta_2)$$

## Mécanique Quantique

- Probabilité de présence d'un électron
- Chaque chemin noté par une action  $S$

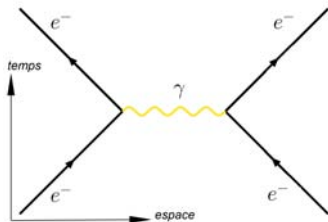
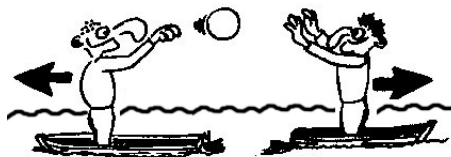
$$P(a \rightarrow b) = |A(a \rightarrow b)|^2 = \left| \sum_{\text{tous chemins}} e^{i \cdot S/\hbar} \right|^2$$

- Limite classique:  $\hbar \rightarrow 0$ , seul reste le chemin d'action minimale (principe de Maupertuis)

## Théorie Quantique des Champs

- Probabilité de transition d'état initial à état final (multiparticules)
- $S$  opérateur capable de créer ou d'annihiler des particules

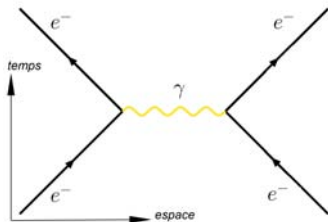
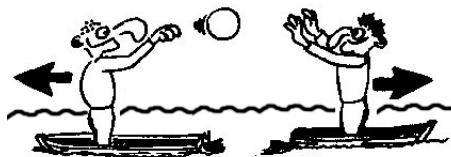
# Les diagrammes de Feynman



**Diagrammes de Feynman:** probabilité des processus

- Chaque ligne décrit la propagation d'une particule
- Chaque sommet: interaction, avec couplage  $Q \cdot e$
- Théorie des perturbations: par ex échanger un photon "coûte"  
 $\alpha = e^2/(4\pi) \simeq 1/137$

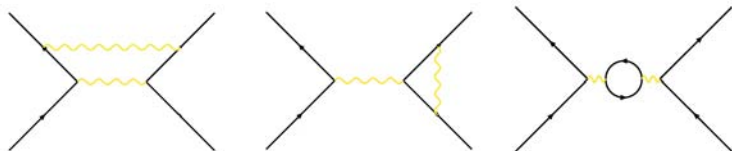
# Les diagrammes de Feynman



**Diagrammes de Feynman:** probabilité des processus

- Chaque ligne décrit la propagation d'une particule
- Chaque sommet: interaction, avec couplage  $Q \cdot e$
- Théorie des perturbations: par ex échanger un photon "coûte"

$$\alpha = e^2/(4\pi) \simeq 1/137$$



# Interaction électromagnétique, interaction forte

# L'interaction électromagnétique



Dirac



Schwinger



Feynman

Electrodynamique Quantique (Quantum ElectroDynamics ou QED)

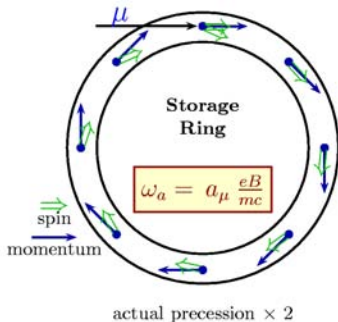
- Photon responsable des ondes électromagnétiques
- Se couplant à toutes les particules chargées électriquement
- Reproduit les équations (relativistes) de Maxwell

La partie la mieux testée du Modèle Standard  
et le modèle pour toutes les autres interactions

$$(g - 2)_\ell (1)$$

Moment magnétique anormal de  $e, \mu, \tau$ :  
interaction avec un champ magnétique  
(precession selon le facteur de Landé  $g$ )

$$\mu_\ell = g_\ell \frac{e}{2m_\ell} \quad a_\ell = \frac{g_\ell - 2}{2}$$



$$(g - 2)_\ell (1)$$

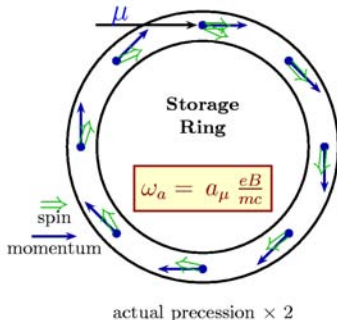
Moment magnétique anormal de  $e, \mu, \tau$ :  
interaction avec un champ magnétique  
(precession selon le facteur de Landé  $g$ )

$$\mu_\ell = g_\ell \frac{e}{2m_\ell}$$

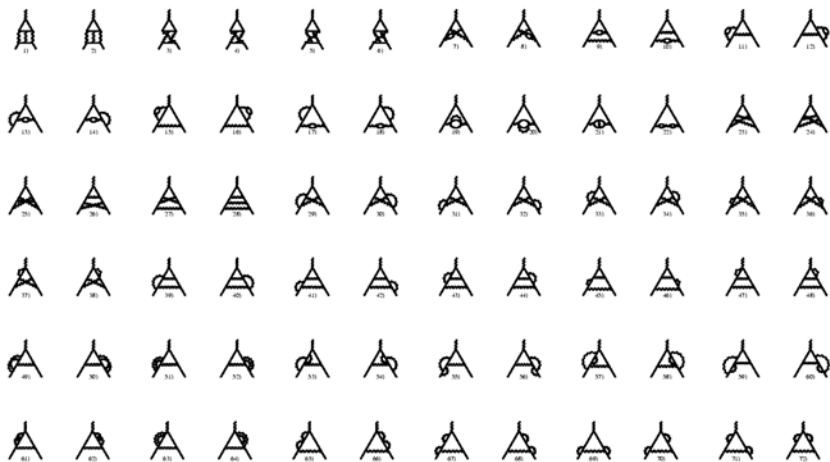
$$a_\ell = \frac{g_\ell - 2}{2}$$



$$a_e = a_\mu = a_\tau = \frac{\alpha}{2\pi}$$







## $(g - 2)_\ell$ (2)

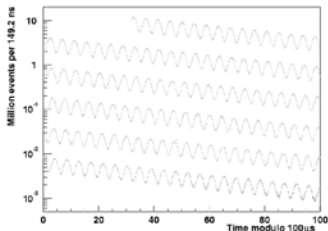
- QED jusqu'au 5ème ordre (4 boucles)

$$a_e = (115\,965\,218.073 \pm 0.028) \cdot 10^{-11}$$
$$\implies 1/\alpha = 137.035\,999\,679 \pm 0.000\,000\,094 \dots$$

- Cette valeur de  $\alpha$  peut être utilisée pour prédire pour  $\mu$

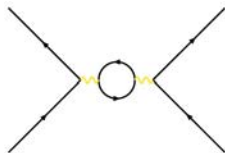
$$a_\mu^{th} = (116\,591\,793 \pm 68) \cdot 10^{-11}$$

$$a_\mu^{exp} = (116\,592\,080 \pm 63) \cdot 10^{-11}$$



- A **ce niveau de précision**, on ne teste plus QED, mais aussi les autres secteurs du Modèle Standard (interaction faible et forte) intervenant aux ordres élevés de la théorie de perturbations

# La "constante" de structure fine

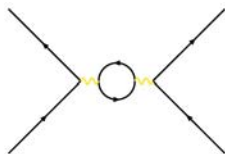


## Répulsion entre deux électrons

- $\Sigma$  sur toutes configs. possibles
- Conservation de l'énergie-impulsion: certains  $(E, p)$  intermédiaires libres
- Particules intermédiaires virtuelles:  
 $E^2 - p^2 c^2 \neq M^2 c^4$

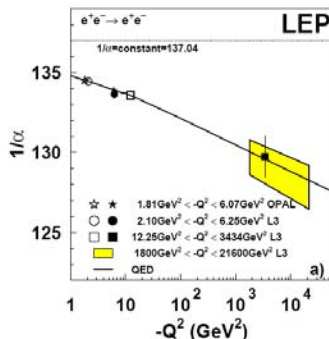
# La "constante" de structure fine

## Répulsion entre deux électrons



- Ecrantage de la charge par la présence de paires virtuelles particule-antiparticule
- La constante de couplage de QED (constante de structure fine)  $\alpha$  n'est pas constante
- Elle dépend de l'énergie du processus comme  $\log(E)$ , augmentant avec  $E$

- $\Sigma$  sur toutes configs. possibles
- Conservation de l'énergie-impulsion: certains  $(E, p)$  intermédiaires libres
- Particules intermédiaires virtuelles:  $E^2 - p^2 c^2 \neq M^2 c^4$



# L'interaction forte

Dans les années 1950, on découvre sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$  . . .

Et la liste n'est pas close !

# L'interaction forte

Dans les années 1950, on découvre sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$ ...

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

# L'interaction forte

Dans les années 1950, on découvre sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$ ...

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

$\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa \dots$

# L'interaction forte

Dans les années 1950, on croule sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$ ...

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...

$\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa \dots$

$a_0, f_0, \pi', N^* \dots$



# L'interaction forte

Dans les années 1950, on croule sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$ ...

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...

$\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...

$a_0, f_0, \pi', N^*$ ...

# L'interaction forte

Dans les années 1950, on découvre sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$ ...

Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...  
 $\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...  
 $a_0, f_0, \pi', N^*$ ...

# L'interaction forte

Dans les années 1950, on découvre sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$ ...

Et la liste n'est pas close !

proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...

$\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...

$a_0, f_0, \pi', N^*$ ...  $X(3850), Y(3950)$ ...

# L'interaction forte

Dans les années 1950, on croule sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$ ...



Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...  
 $\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...  
 $a_0, f_0, \pi', N^*$ ...  $X(3850), Y(3950)$ ...

Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir du nom de toutes ces particules, je serais devenu botaniste !*

# L'interaction forte

Dans les années 1950, on croule sous les particules "élémentaires", les hadrons sensibles à l'interaction forte : proton, neutron,  $\Lambda$ ...



Et la liste n'est pas close !  
proton, neutron...  $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$ ...  
 $\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$ ...  $D, D_s, B, B_s$ ...  
 $a_0, f_0, \pi', N^*$ ...  $X(3850), Y(3950)$ ...

Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir du nom de toutes ces particules, je serais devenu botaniste !*

⇒ Gell-Mann et Zweig (1964): les **quarks**, constituants des hadrons

# La couleur

- Quarks constituants des proton  $uud$ , neutron  $udd$ ...
- Et possédant un spin (moment angulaire intrinsèque)
- Parmi les particules observées:  $\Delta^{++} = u^\uparrow u^\uparrow u^\uparrow$
- Mais  $\Delta$  fermion, avec fonction d'onde antisym (principe de Pauli)

# La couleur

- Quarks constituants des proton  $uud$ , neutron  $udd$ ...
- Et possédant un spin (moment angulaire intrinsèque)
- Parmi les particules observées:  $\Delta^{++} = u^\uparrow u^\uparrow u^\uparrow$
- Mais  $\Delta$  fermion, avec fonction d'onde antisym (principe de Pauli)

⇒ La couleur (vert, bleu, rouge)

$$\Delta^{++} = \sum_{\alpha, \beta, \gamma} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} u_\alpha^\uparrow u_\beta^\uparrow u_\gamma^\uparrow$$

avec  $\epsilon^{123} = 1$  antisymétrique

# La couleur

Contenu en quarks de quelques hadrons

- Quarks constituants des proton  $uud$ , neutron  $udd$
- Et possédant un spin (moment angulaire intrinsèque)
- Parmi les particules observées:  $\Delta^{++} = u \uparrow u \uparrow u \uparrow$
- Mais  $\Delta$  fermion, avec fonction d'onde antisym (principe de Pauli)

Il existe deux types de hadrons : les baryons sont constitués de trois quarks (chacun d'une couleur différente : bleu, rouge et vert) tandis que les mésons sont formés d'une paire quark-antiquark de couleur et anticouleur associées (rouge et bleu et antibleu).

Jusqu'au milieu des années 1960, les neutrons étaient considérés comme des particules élémentaires ou produites de particules plus élémentaires. En 1964, Murray Gell-Mann et George Zweig ont proposé que les baryons et les mésons sont constitués de quarks.

Aujourd'hui nous appelons plus précisément les quarks les constituants des baryons et des mésons.

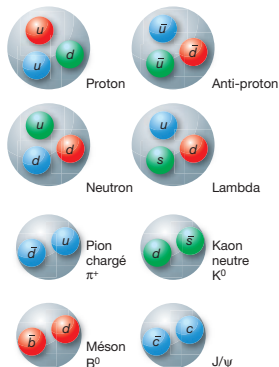
⇒ La couleur (vert, bleu, rouge)

$$\Delta^{++} = \sum_{\alpha, \beta, \gamma} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} u_{\alpha}^{\uparrow} u_{\beta}^{\uparrow} u_{\gamma}^{\uparrow}$$

avec  $\epsilon^{123} = 1$  antisymétrique

Plus généralement, pas de quarks seuls, mais en combinaison sans couleur, les hadrons

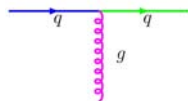
- Baryons (3 quarks):  $\sum_{\alpha, \beta, \gamma} \epsilon^{\alpha\beta\gamma} q_{\alpha} q'_{\beta} q''_{\gamma}$
- Mesons (quark antiquark):  $\sum_{\alpha, \beta} \delta^{\alpha\beta} q_{\alpha} \bar{q}'_{\beta}$



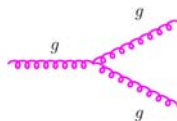


En Chromodynamique Quantique (QCD),

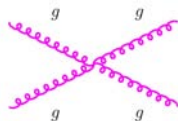
- seulement pour les quarks (pas pour les leptons)
- des gluons (colorés) échangés au lieu du photon (neutre)



[comme QED]



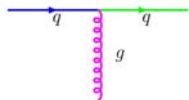
[nouveau !]



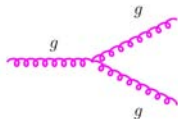
[nouveau !]

En Chromodynamique Quantique (QCD),

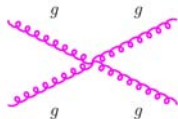
- seulement pour les quarks (pas pour les leptons)
- des gluons (colorés) échangés au lieu du photon (neutre)



[comme QED]

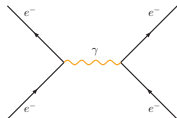


[nouveau !]

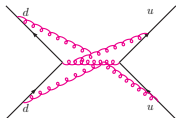


[nouveau !]

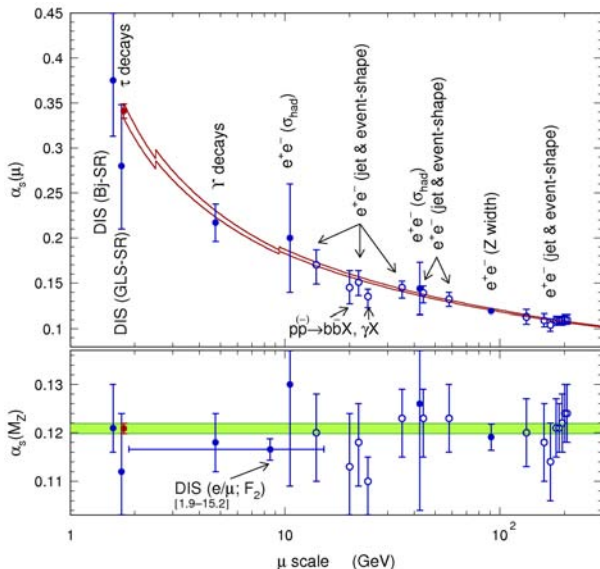
QED  
1 photon  
neutre electriquement  
différentes charges  $eQ$



QCD  
8 gluons  
colorés  
une seule charge  $g_s$



# $\alpha_s$ à différentes énergies

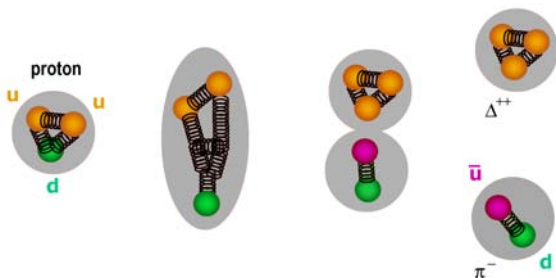


Glucos sensibles à l'interaction forte

- “Constante” de couplage  
 $\alpha_s = g_s^2/(4\pi)$   
 dépend fortement de l'énergie en jeu
- Liberté asymptotique: à grande  $E$ , les interactions (fortes) sont de petites perturbations

# Confinement

A des distances de l'ordre d'1 fm ( $10^{-15}$  m),  $\alpha_s = O(1)$



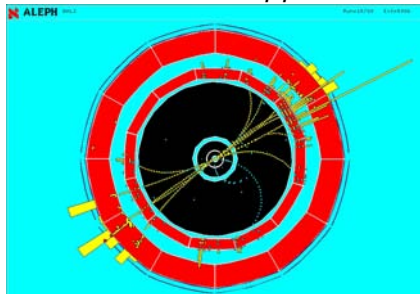
- Potentiel  $V(r) \propto r$  à grand  $r$
- Quarks ne peuvent sortir des hadrons,  
et restent donc confinés dans de objets de rayon  $O(1 \text{ fm})$
- Difficile de connecter la théorie (quarks) et expérience (hadrons)

# Jets

Dans les collisions, les quarks/gluons émettent d'autres gluons/quarks en cascades et perdent de l'énergie

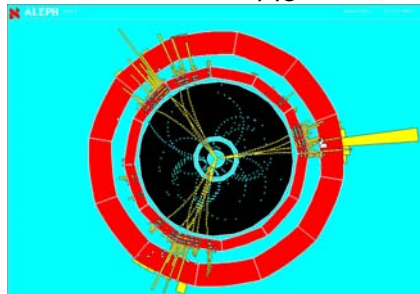
jusqu'à ce qu'ils deviennent "mous" ( $\sim 1$  GeV) pour s'unir en hadrons

$$e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}$$



Deux jets

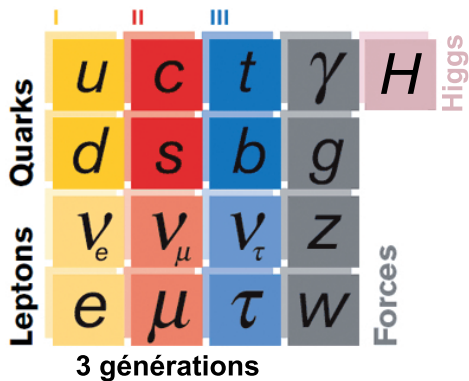
$$e^+ e^- \rightarrow q\bar{q}g$$



Trois jets

Un problème quotidien pour les expériences !

# Le Modèle Standard



# Des questions ?

