

Physique des particules (1)

Yasmine Amhis

IJCLab, CNRS & Université Paris-Saclay, Orsay

La physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit
02/07/24

Cours rédigé par S. Descotes-Genon. Un grand merci à lui !

- Physicienne des particules, Dir. Recherche CNRS
- Thèse au Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire, Orsay
- 3 ans de post-doctorat à EPFL, Suisse
- Chercheuse au LAL → IJCLab (2012-aujourd'hui)



What's new?



www.yasmineamhis.com

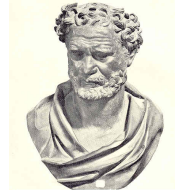
Entrée en matière

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

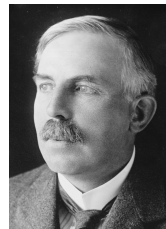
Démocrite



Lavoisier



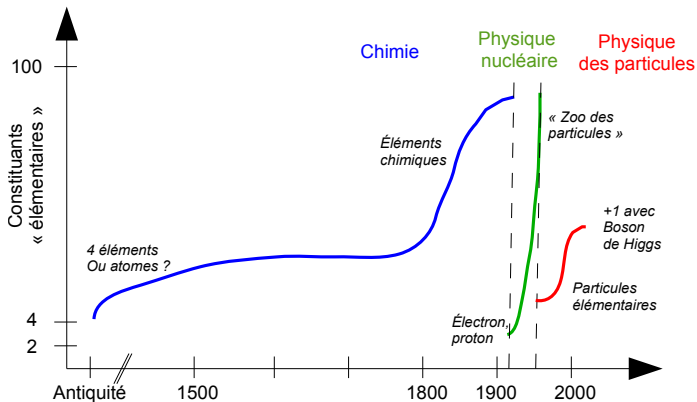
Rutherford



Weinberg



A la bourse des particules élémentaires



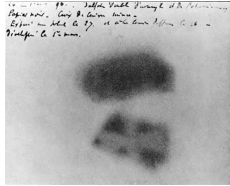
- les "krachs" ne sont pas rares...
- ... du fait de changements de paradigmes
(évolution de la notion de constituants élémentaires)

La classification périodique des éléments

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 Lr	

- proposée par Mendeleïev en 1869
- basée sur les résultats expérimentaux de l'époque
- avec de nombreux emplacements vides (remplis depuis !)
- heuristique, sans connaître la structure électronique des atomes

Au tournant du 20ème siècle

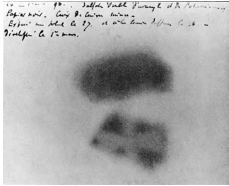


1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement

⇒ découverte de la **radioactivité**

(H. Becquerel, P. et M. Curie)

Au tournant du 20ème siècle

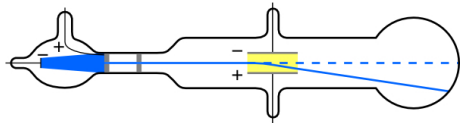


1892: certains composés sont instables et se désintègrent en émettant un rayonnement

⇒ découverte de la **radioactivité**

(H. Becquerel, P. et M. Curie)

1897: rayonnement cathodique infléchi par \vec{E} (J.J. Thomson)

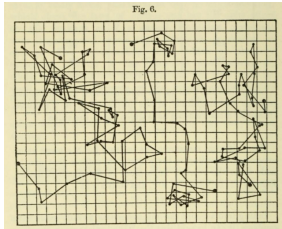


- charge négative
- rapport charge/masse très élevé
- indépendant du matériau utilisé

(corpuscules très légers ou très chargés)

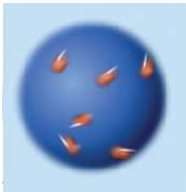
⇒ **l'électron**, constituant de l'atome

L'hypothèse atomique

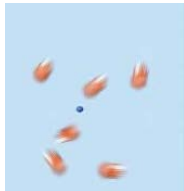


- mouvement aléatoire de pollen dans l'eau (R. Brown 1827)
- due aux collisions du pollen avec les molécules d'eau (A. Einstein, 1905, vérifié par J. Perrin, 1908)

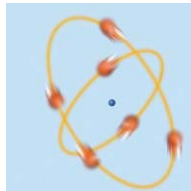
avec diverses visions de plus en plus quantiques sur le rôle de l'électron
(à présent, une probabilité de présence autour du noyau)



Thomson (1903)



Rutherford(1909)

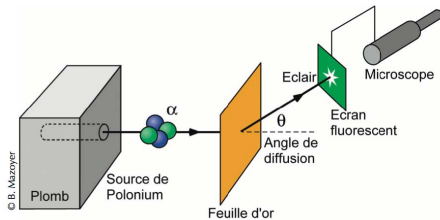


Bohr (1913)



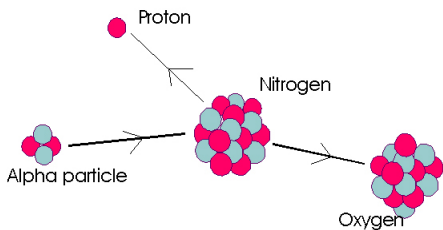
Vision moderne

Du plein avec du vide

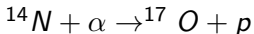


- en 1909, Geiger, Marsden, Rutherford frappe une feuille d'or avec des noyaux d'hélium (particules α)
 - la plupart traverse la feuille sans problème
 - une petite fraction “rebondit” sur un obstacle de petite taille
- ⇒ le noyau atomique (10000 fois plus petit que l'atome)

Le proton et le neutron



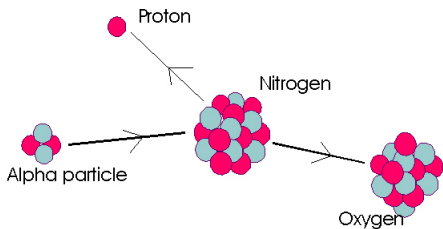
1917-1919: première réaction nucléaire



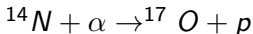
\Rightarrow noyau d'*H* ou **proton**

constituant de tous les noyaux
(E. Rutherford)

Le proton et le neutron



1917-1919: première réaction nucléaire

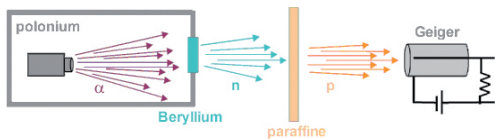


\Rightarrow noyau d' H ou **proton**

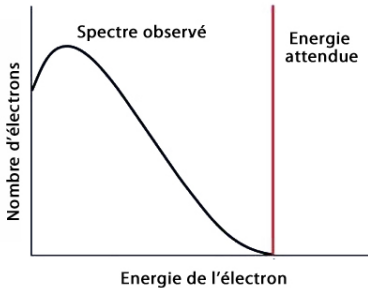
constituant de tous les noyaux
(E. Rutherford)

1932: nouveau rayonnement inconnu, fait de particules de masse quasi-identique au proton, mais neutres

\Rightarrow **neutron** (J. Chadwick, prédit par Rutherford en 1920)

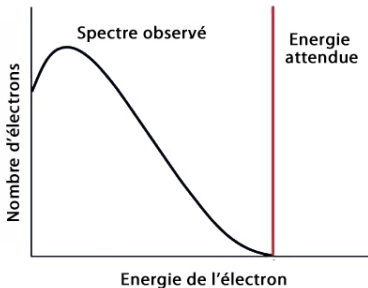


Le neutrino



1930: si les désintégrations β conservent l'énergie, $X \rightarrow Y + e^-$ aboutirait à E_e fixe

Le neutrino

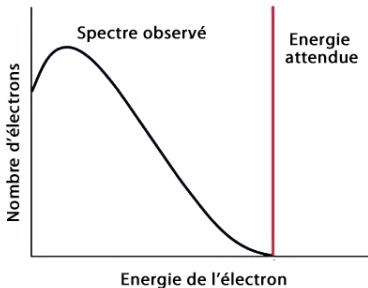


1930: si les désintégrations β conservent l'énergie, $X \rightarrow Y + e^-$ aboutirait à E_e fixe

En fait $X \rightarrow Y + e + \nu$, ce qui explique que les e^- émis n'ont pas tous la même E !

\Rightarrow **neutrino** imaginé par W. Pauli, décrit par E. Fermi

Le neutrino

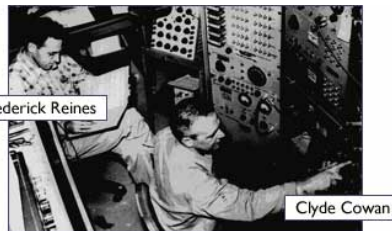


1930: si les désintégrations β conservent l'énergie, $X \rightarrow Y + e^-$ aboutirait à E_e fixe

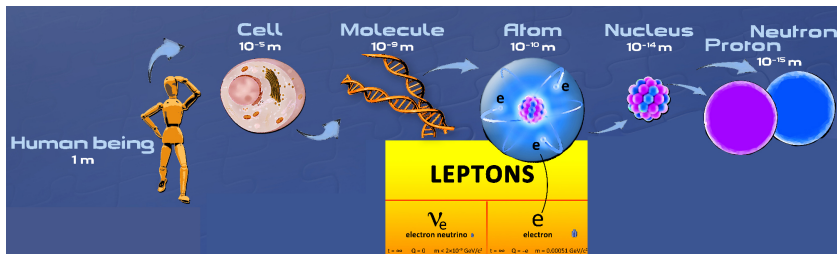
En fait $X \rightarrow Y + e + \nu$, ce qui explique que les e^- émis n'ont pas tous la même E !

⇒ **neutrino** imaginé par W. Pauli, décrit par E. Fermi

1956 : détection du neutrino électronique par Reines et Cowan auprès d'une centrale nucléaire, selon la réaction $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^- + n$



La matière ordinaire



Au tournant des années 1930, 4 constituants

- Protons et neutrons : constituants des noyaux atomiques
- Électrons: liaisons chimiques, électricité
- Neutrino: désintégrations radioactives: $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}_e$ (15 min)

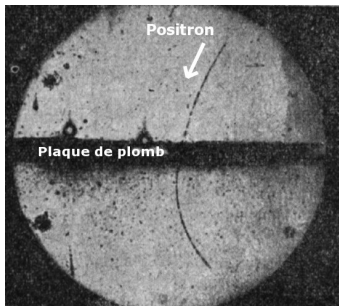
⇒ la physique nucléaire a poursuivi l'approche de Mendeleïev
en simplifiant beaucoup le problème !

Dépasser le reductionnisme



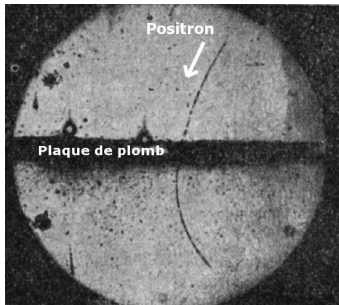
Anderson (1932)

- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre



Anderson (1932)

- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre
- Cliché de chambre à brouillard, pour visualiser particules chargées + \vec{B}
- Même masse qu'un électron, mais charge électrique opposée : **positron**



Anderson (1932)

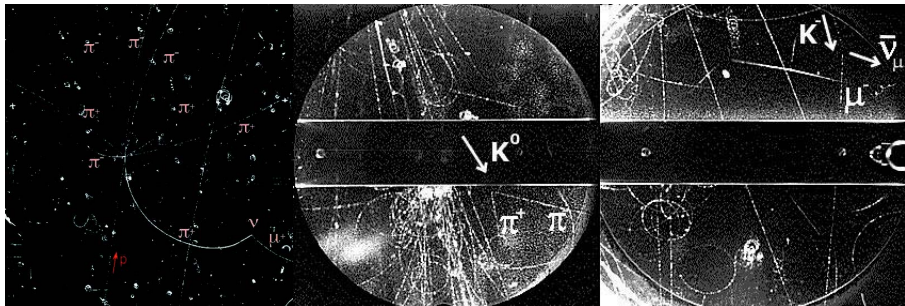
- Analyse les particules dans les rayons cosmiques arrivant sur Terre
- Cliché de chambre à brouillard, pour visualiser particules chargées + \vec{B}
- Même masse qu'un électron, mais charge électrique opposée : **positron**

Dirac (1928)

- Equation pour décrire l'électron: Mécanique Quantique + Relativité restreinte
- Solutions supplémentaires, inattendues, vues comme **anti-particule de l'électron**



Qui a commandé ça ?



Clichés de rayons cosmiques dans des chambres à brouillard

- 1937: muon μ^- (sorte d'électron massif et instable)
- 1947: pions π , particules étranges K , Λ^0

I. Rabi à propos du muon : “Who ordered that ?”

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)

Et la liste n'est pas close !

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)

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

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)

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

π , ρ , η , σ , κ ...

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)

Et la liste n'est pas close !

proton, neutron...

π , ρ , η , σ , κ ...

a_0 , f_0 , π' , N^* ...

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)

Et la liste n'est pas close !
proton, neutron... Ω , Λ , Ξ , Θ ...

π , ρ , η , σ , κ ...

a_0 , f_0 , π' , N^* ...

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)

Et la liste n'est pas close !

proton, neutron... Ω , Λ , Ξ , Θ ...

π , ρ , η , σ , κ ... D , D_S , B , B_S ...

a_0 , f_0 , π' , N^* ...

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)

Et la liste n'est pas close !

proton, neutron... Ω , Λ , Ξ , Θ ...

π , ρ , η , σ , κ ... D , D_s , B , B_s ...

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

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)



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, π', N^* ... $X(3850), Y(3950)$...

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

Trop de particules !

Années 1950: trop de part. "élémentaires" (p , n , pion, kaon, Λ^0 ...)

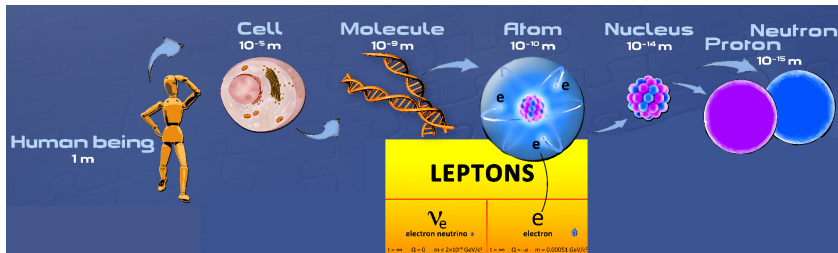


Et la liste n'est pas close !
proton, neutron... $\Omega, \Lambda, \Xi, \Theta$...
 $\pi, \rho, \eta, \sigma, \kappa$... D, D_s, B, B_s ...
 a_0, f_0, π', N^* ... $X(3850), Y(3950)$...

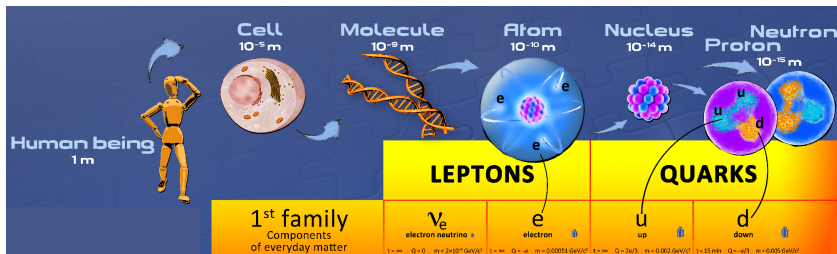
Wolfgang Pauli : *Si je pouvais me souvenir
du nom de toutes ces particules,
je serais devenu botaniste !*

Temps pour un changement de paradigme !

Les quarks



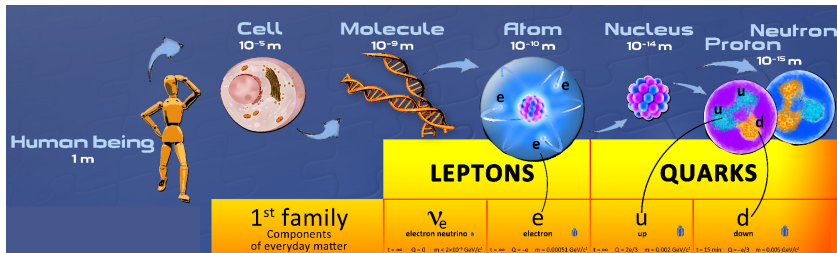
Les quarks



Gell-Mann et Zweig (1964): les **quarks**, constituants de toutes ces particules pas si élémentaires que cela: $p = uud$, $n = udd$, $\Lambda^0 = uds$

u : up d : down s : étrange

Les quarks



Gell-Mann et Zweig (1964): les **quarks**, constituants de toutes ces particules pas si élémentaires que cela: $p = uud$, $n = udd$, $\Lambda^0 = uds$

u : up d : down s : étrange

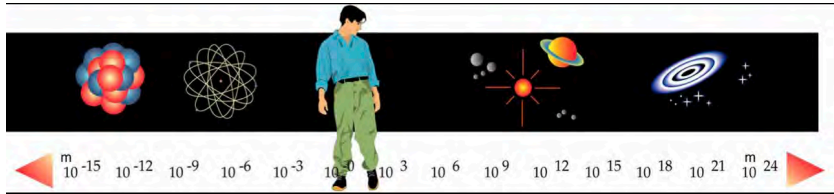
- prédit de nouvelles combinaisons ($\Delta = uuu$, $\Omega = sss$)
ainsi que leurs masses, caractéristiques et désintégrations
- sous-structure du proton confirmée en 1968 (e^- sur p déviés)
- mais d'où vient ce quark étrange ? et le muon ?

Des questions ?



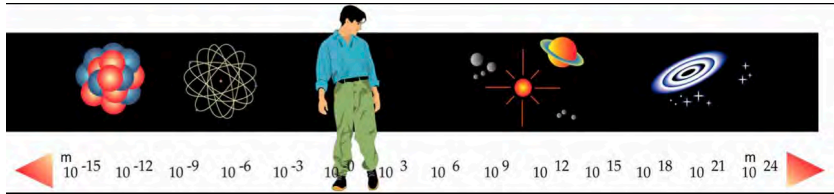
Casser ou créer ?

Monter en énergie, diminuer en taille

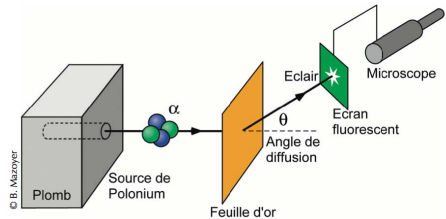


- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' E de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X, γ)

Monter en énergie, diminuer en taille



- sonder sur des distances plus petites
- avec des particules d' E de plus en plus élevée
- photons de plus en plus énergétiques (UV, X, γ)
- ou d'autres projectiles déviés par constituants [cf. Geiger, Marsden, Rutherford qui "voient" le noyau avec α sur atome d'or]



Quelques ordres 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 (α , β , γ)	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

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

Une montée en énergie avec des conséquences inattendues...

Dessine-moi une particule

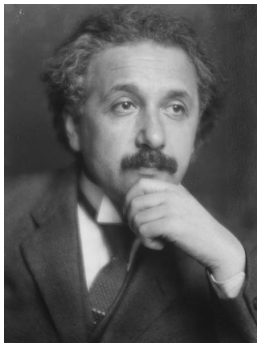


Pas vraiment du billard...

- Elles ont parfois les propriétés d'onde (étendue) plutôt que particule (ponctuelle)
- Capables d'atteindre des vitesses proches de celle de la lumière
- Peuvent disparaître en laissant apparaître d'autres particules à leur place (désintégration)

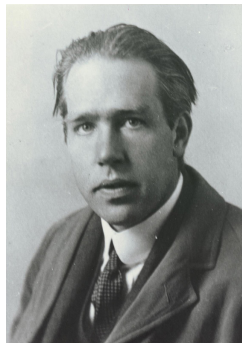
Un champ de bataille théorique

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

Une cohabitation qui fait des étincelles en physique des particules !

- **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: identique dans tout référentiel
- représente le coût énergétique pour atteindre une vitesse donnée

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

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

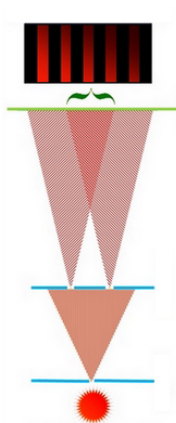
- vitesse de la lumière identique dans tous les référentiels
 - dilatation des temps, contraction des longueurs
 - notion de référentiel propre (au repos) de la particule
- Energie, impulsion et vitesse

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

- masse: 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

- Lumière

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



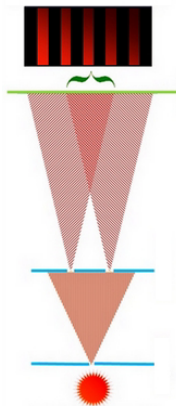
La mécanique quantique

- Lumière

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

- Probabilités

- Proba de présence (\equiv intensité) donnée par $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$
avec $A(\mathcal{C})$ amplitudes complexes $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$



La mécanique quantique

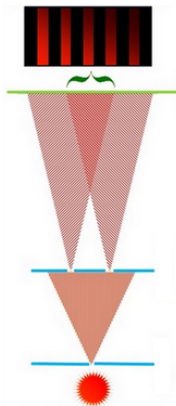
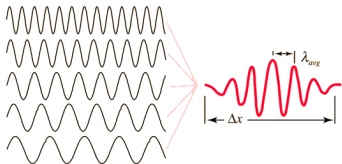
- Lumière

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

- Probabilités

- Proba de présence (\equiv intensité) donnée par $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$
avec $A(\mathcal{C})$ amplitudes complexes $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$

- 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

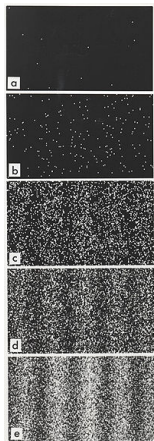
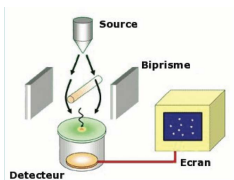
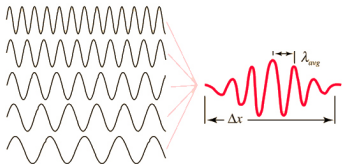
- Lumière

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

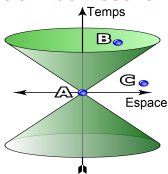
- Probabilités

- Proba de présence (\equiv intensité) donnée par $|A|^2$
- $P(X \rightarrow Y) = |\sum_{\mathcal{C} \text{ chemin } X \rightarrow Y} A(\mathcal{C})|^2$
avec $A(\mathcal{C})$ amplitudes complexes $\langle Y|X \rangle_{\mathcal{C}}$

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



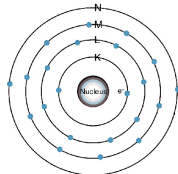
Relativité restreinte



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

Plus de temps, d'espace absolus

Mécanique quantique



- Processus discontinus (ΔE 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 déterminisme classique

Les adversaires réconciliés

- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant, E suffisamment élevée pour des effets
 - Relativiste: $E = mc^2$, équivalence entre énergie et masse
 - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



Les adversaires réconciliés

- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant, E suffisamment élevée pour des effets
 - Relativiste: $E = mc^2$, équivalence entre énergie et masse
 - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



- A chaque particule son antiparticule: $E \leftrightarrow$ particule + antiparticule

Les adversaires réconciliés

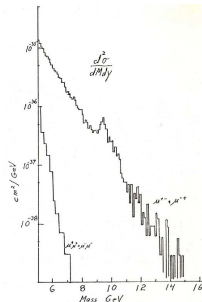
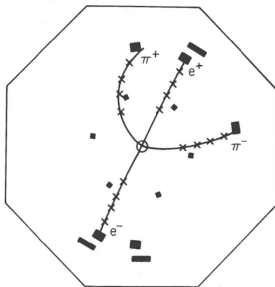
- Jusque là, collisions pour sonder des échelles de + en + fines
- En cassant la matière en ses constituants de plus en plus petits
- Dorénavant, E suffisamment élevée pour des effets
 - Relativiste: $E = mc^2$, équivalence entre énergie et masse
 - Quantique: envisager tous les chemins, même non classiques



- A chaque particule son antiparticule: $E \leftrightarrow$ particule + antiparticule
- On ne casse plus la matière en sous-constituants. . .
- . . . on crée de **nouvelles particules** lors de collisions violentes

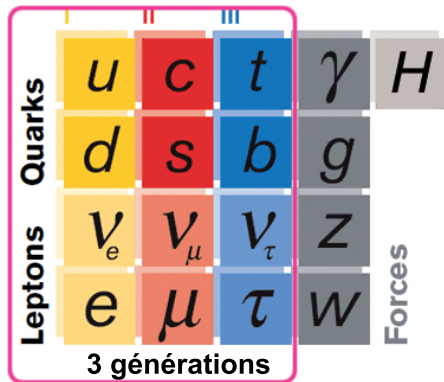
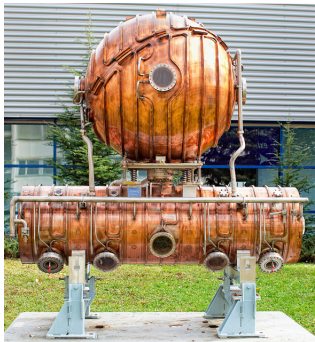
La révolution de novembre

- Le 11 novembre 1974, SLAC et Brookhaven (sur les deux côtes des USA) annoncent ensemble une nouvelle particule, le J/ψ
- produite dans des collisions e^+e^- , constituée d'un quark charmé et d'un antiquark charmé ($c\bar{c}$)
- suivi dès 1977 d'un cinquième quark b sous la forme d'un Υ ($b\bar{b}$)
- et d'études sur la "colle" qui maintient ensemble les quarks



Les trois générations

- Dans les rayons cosmiques, puis accélérateurs de particules, des collisions de haute énergie créant de nouvelles particules



- Copies de la 1ere famille (charge électrique...) hormis la masse:
top t 60 000 fois plus lourd que up u (aussi massif qu'atome d'or)
- Instables: t se désintègre en quelques 10^{-25} secondes

Carte d'identité d'une particule

- Nom
- Constitution (si particule composite)
- Masse
- Spin (moment angulaire intrinsèque, d'origine quantique)
- Sensibilité aux interactions (charge électrique, couleur. . .)
- Durée de vie
- Modes de désintégration (dans des particules plus légères), et probabilités associées, par ex
 - $t \rightarrow be^+\nu$ (99.8%)
 - $t \rightarrow se^+\nu$ (0.15%)
 - $t \rightarrow de^+\nu$ (6×10^{-5})

$c\bar{c}$ MESONS			
J^PC	$J^G(J^PC) - 0^+(0^-+)$		
Mass $m = 2080.5 \pm 1.2$ MeV (S - 1.7)		Full width $\Gamma = 27.4 \pm 2.9$ MeV (S - 2.0)	
$\eta_c(1S)$	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	$\frac{P}{\text{MeV}(c)}$
$\eta_c(1S)$ DECAY MODES			
Decays involving hadronic resonances			
$\eta(950)\pi\pi$	(4.1 \pm 1.7) %		1321
$\rho\rho$	(2.0 \pm 0.7) %		1273
$K^*(892)^0 K^- \pi^+ + c.c.$	(2.0 \pm 0.7) %		1276
$K^*(892) K^+ K^-$	(9.2 \pm 3.4) $\times 10^{-3}$		1194
$K^{*0} K^+ \pi^-$	(1.1 \pm 0.5) %		1071
$\phi K^+ K^-$	(2.9 \pm 1.4) $\times 10^{-3}$		1102
$\phi\phi$	(2.7 \pm 0.9) $\times 10^{-3}$		1087
$\phi 2(\pi^+ \pi^-)$	< 3.5 $\times 10^{-3}$	90%	1249
$a_0(980)\pi$	< 2 %	90%	1335
$a_2(1320)\pi$	< 2 %	90%	1194
$K^*(892) K^+ + c.c.$	< 1.20 %	90%	1308
$f_2(1270)\eta$	< 1.1 %	90%	1143
$\omega\omega$	< 3.1 $\times 10^{-3}$	90%	1268
$\omega\phi$	< 1.7 $\times 10^{-3}$	90%	1183
$f_2(1270)f_2(1270)$	(7.6 \pm $\frac{3.1}{3.4}$) $\times 10^{-3}$		771
$f_2(1270)f_2'(1525)$	(1.0 \pm $\frac{0.3}{0.4}$) %		500
Decays into stable hadrons			
$K\bar{K}\pi$	(7.0 \pm 1.2) %		1370
$\eta\pi\pi$	(4.9 \pm 1.6) %		1427
$\pi^+ \pi^- K^+ K^-$	(1.5 \pm 0.6) %		1343
$K^+ K^- 2(\pi^+ \pi^-)$	(7.0 \pm 2.9) $\times 10^{-3}$		1252
$2(K^+ K^-)$	(1.5 \pm 0.7) $\times 10^{-3}$		1053
$2(\pi^+ \pi^-)$	(1.20 \pm 0.30) %		1457
$3(\pi^+ \pi^-)$	(1.5 \pm 0.5) %		1405
$\rho\rho$	(1.3 \pm 0.4) $\times 10^{-3}$		1158
$A_1 A_1$	(1.04 \pm 0.31) $\times 10^{-3}$		988
$K\bar{K}\eta$	< 3.1 %	90%	1263
$\pi^+ \pi^- \rho\rho$	< 1.2 %	90%	1075
Radiative decays			
??	(1.8 \pm $\frac{0.6}{0.5}$) $\times 10^{-4}$		1490

résumé dans le Particle Data Book

Antiparticule et antimatière

Equation de Dirac pour l'électron (et particules de spin 1/2)

- Méca Quantique + Relativité : $E = p^2/(2m_e) \rightarrow E^2 = p^2c^2 + m_e^2c^4$
- Sol $E < 0$ comme **antiparticule**, même masse, charges opposées
- A chaque particule de matière (spin 1/2) son antiparticule

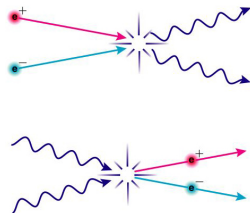
Antiparticule et antimatière

Equation de Dirac pour l'électron (et particules de spin 1/2)

- Méca Quantique + Relativité : $E = p^2/(2m_e) \rightarrow E^2 = p^2c^2 + m_e^2c^4$
- Sol $E < 0$ comme **antiparticule**, même masse, charges opposées
- A chaque particule de matière (spin 1/2) son antiparticule

Relation énergie ($E = 2m_e c^2$) \leftrightarrow Masse (paire particule/antiparticule)

- **Annihilation** : $e^+ e^- \rightarrow$ photons, utilisation par ex en Tomographie par Emissions de Positrons
- **Création** : des collisions énergétiques génèrent de nouvelles paires particule antiparticule



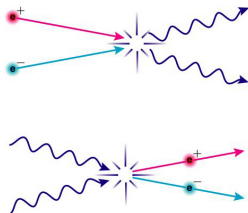
Antiparticule et antimatière

Equation de Dirac pour l'électron (et particules de spin 1/2)

- Méca Quantique + Relativité : $E = p^2/(2m_e) \rightarrow E^2 = p^2c^2 + m_e^2c^4$
- Sol $E < 0$ comme **antiparticule**, même masse, charges opposées
- A chaque particule de matière (spin 1/2) son antiparticule

Relation énergie ($E = 2m_e c^2$) \leftrightarrow Masse (paire particule/antiparticule)

- **Annihilation** : $e^+ e^- \rightarrow$ photons, utilisation par ex en Tomographie par Emissions de Positrons
- **Création** : des collisions énergétiques génèrent de nouvelles paires particule antiparticule



Désintégration et annihilation sont deux concepts différents

- Une particule lourde se désintègre en part. plus légères (ex: le top)
- Une antiparticule peut être stable dans le vide (ex: le positron)

(Re)dessine-moi une particule

Modèle Standard basé sur la Théorie quantique des champs

- description relativiste et quantique des particules élémentaires
- particule = excitation d'un champ (quantique)
- qui se propage comme une vague se déplaçant sur la mer



- l'énergie d'une excitation utilisable pour exciter d'autres champs
- décrit les processus à nombre de particules variable

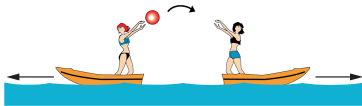
*désintégration d'une particule en plusieurs plus légères,
annihilation et création de paires particules/antiparticules.*

Comment remonter le mécano des particules

Les interactions fondamentales

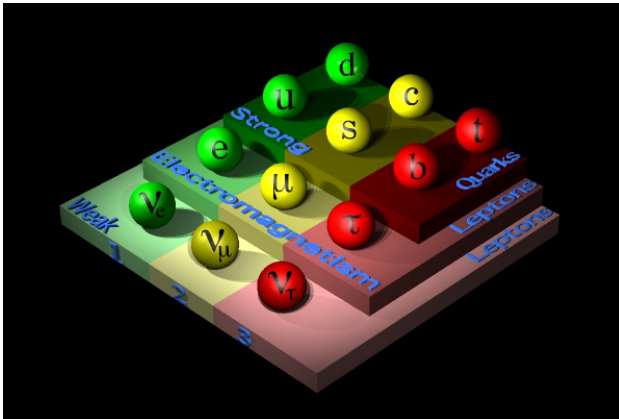
	I	II	III		
Quarks	u	c	t	γ	H
	d	s	b	g	
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	Forces
	e	μ	τ	W	

3 générations



- Gravitation
étoiles, galaxies... [10⁻³⁸]
 - Force faible (bosons W, Z)
radioactivité β [10⁻⁵]
 - Electromagnétisme (photon γ)
électricité, chimie... [10⁻³]
 - Force forte (gluons g)
cohésion des noyaux [1]
-
- 3 interactions sur 4 en termes d'échanges de particules (boson médiateurs spin 1)
 - gravitation négligeable [intensité relative subatomique]

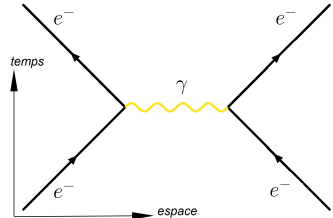
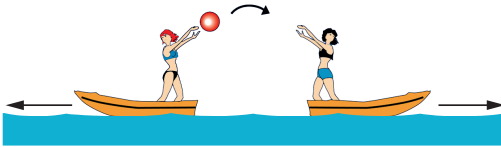
Trois interactions très différentes



Les trois interactions ne parlent pas toutes
aux mêmes particules élémentaires
... et elles ont des domaines d'action (portées) différentes

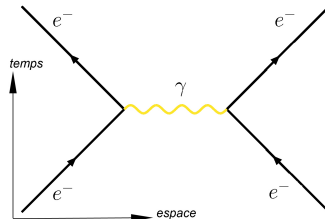
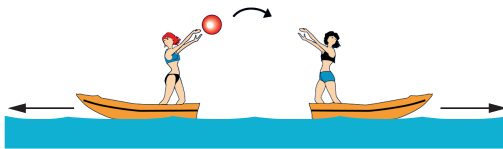
Interaction électromagnétique

- Boson médiateur : **photon** de masse nulle
- Interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand r , potentiel $V(r) \sim 1/r$ de portée infinie



Interaction électromagnétique

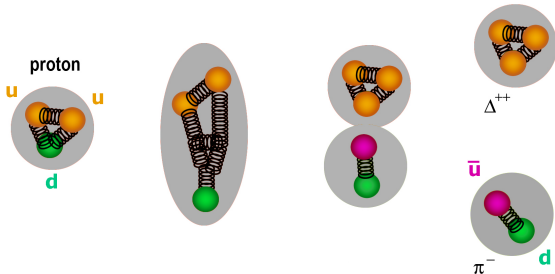
- Boson médiateur : **photon** de masse nulle
- Interagit avec les particules chargées électriquement
- A grand r , potentiel $V(r) \sim 1/r$ de portée infinie



- atomes (états liés électrons-noyau), chimie...
- interaction lumière-matière (laser, effet photoélectrique)

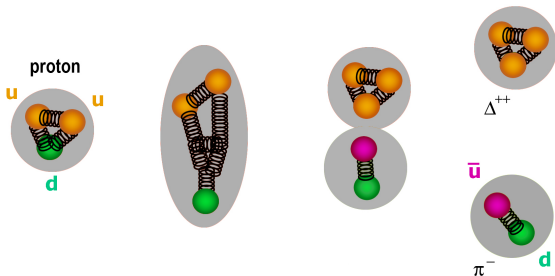
Interaction forte

- Bosons médiateurs : **8 gluons**
- Interagit avec les particules portant une charge de "couleur" (vert, rouge, bleu) à savoir les quarks. . . et les gluons eux-mêmes (!)
- A grand r , potentiel $V(r) \sim r$



Interaction forte

- Bosons médiateurs : **8 gluons**
- Interagit avec les particules portant une charge de “couleur” (vert, rouge, bleu) à savoir les quarks. . . et les gluons eux-mêmes (!)
- A grand r , potentiel $V(r) \sim r$



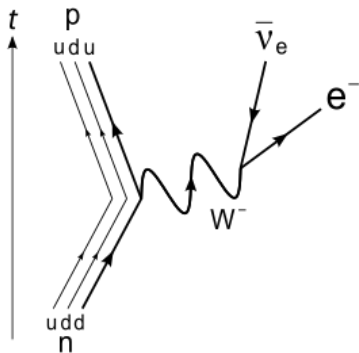
- Les quarks restent **confinés** dans de objets de rayon $O(1 \text{ fm})$
- . . . des hadrons, états liés de trois quarks (proton, neutron. . .) ou d'un quark et d'un anti-quark (pion, kaon. . .), observés exp.
- Interaction forte aussi nécessaire pour la stabilité des noyaux

Interaction faible

- Bosons médiateurs : 2 bosons chargés électriquement W^\pm et un boson neutre Z^0 , massifs (80 à 90 GeV)
- Interagit avec tout le monde, hormis les gluons
- $V(r) \propto e^{-Mr}/r$ avec $M = M_{W,Z}$, portée d'ordre $10^{-17}m$

Interaction faible

- Bosons médiateurs : 2 bosons chargés électriquement W^\pm et un boson neutre Z^0 , massifs (80 à 90 GeV)
- Interagit avec tout le monde, hormis les gluons
- $V(r) \propto e^{-Mr}/r$ avec $M = M_{W,Z}$, portée d'ordre $10^{-17}m$



- Portée **subatomique**, pas d'état lié
- Désintégrations, en particulier désintégration nucléaire β
- ... via un boson W^\pm impliquant (u, d) et/ou (e, ν_e)
- ... ou leurs copies plus lourdes des autres familles
- Certains bosons médiateurs (W^\pm) chargés électriquement

Le cadre théorique de la physique des particules

Mécanique quantique

Comportement d'objets pour énergie ou temps petits

Mécanique
quantique
+
Relativité
restreinte

Comportement d'objets de vitesse très grande

Mécanique
quantique
+
Relativité
restreinte

} → Théorie quantique
des champs

Nombre de particules variable

Mécanique
quantique
+
Relativité
restreinte

} → Théorie quantique
des champs

Théorie
des groupes

Structure mathématique des interactions

Mécanique
quantique
+
Relativité
restreinte

} → Théorie quantique
des champs

Théorie
des groupes
+
Géométrie
différentielle

Dépendance spatiale des interactions

Le cadre théorique de la physique des particules

Mécanique
quantique
+
Relativité
restreinte

} → Théorie quantique
des champs

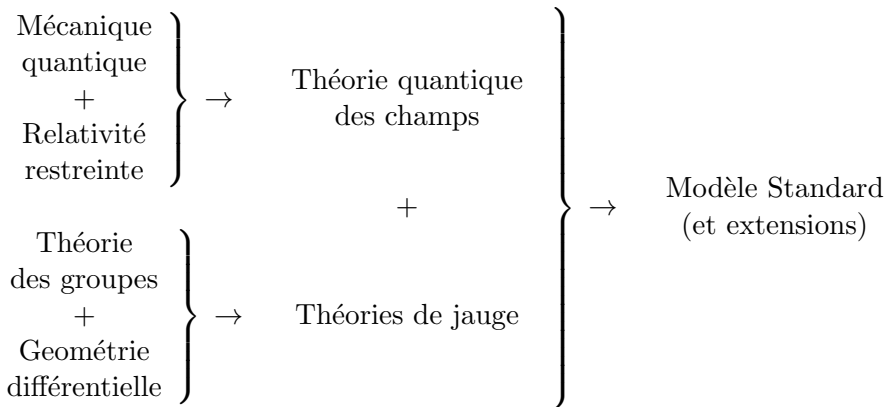
+

Théorie
des groupes
+
Geométrie
différentielle

} → Théories de jauge

Bosons médiateurs des interactions

Le cadre théorique de la physique des particules

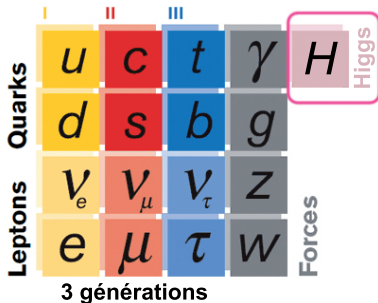


Cadre général en physique des particules contemporaine

Parachever le Modèle Standard

Vision actuelle de la physique des particules, très bien testée

- depuis plus d'un siècle: électromagnétisme, électron, photon
- 1960-70: interaction forte, quarks
- 1990-2010: interaction faible, neutrinos



Un dernier ingrédient
du Modèle Standard

le boson H , ou de Higgs

- pour unifier interactions électromagnétique et faible
- pour donner une masse aux particules

Le mécanisme de Higgs et le boson H

Propagation de la lumière dans un milieu

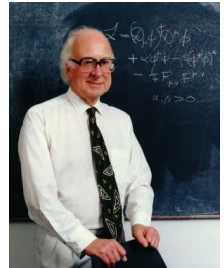
- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution: l'interaction de la lumière avec son environnement (milieu optique non relativiste)



Le mécanisme de Higgs et le boson H

Propagation de la lumière dans un milieu

- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution: l'interaction de la lumière avec son environnement (milieu optique non relativiste)



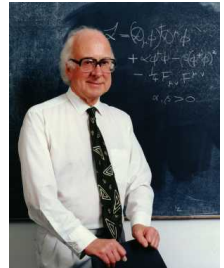
Problème similaire dans le Modèle Standard

- Eqs. (origine géométrique): $m = 0$ pour toutes les particules

Le mécanisme de Higgs et le boson H

Propagation de la lumière dans un milieu

- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution: l'interaction de la lumière avec son environnement (milieu optique non relativiste)



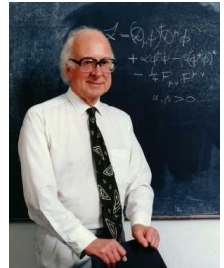
Problème similaire dans le Modèle Standard

- Eqs. (origine géométrique): $m = 0$ pour toutes les particules
- Milieu (champ de Higgs) qui interagit et les "freine" plus ou moins
- ... ce qui les rend (pour nous) plus ou moins massives

Le mécanisme de Higgs et le boson H

Propagation de la lumière dans un milieu

- Indice de réfraction $n = c_{\text{vide}}/c_{\text{milieu}}$
- Vitesse de la lumière différente de celle prédite par la relativité c_{vide}
- ... alors que les équations (Maxwell) ont une formulation relativiste !?
- Solution: l'interaction de la lumière avec son environnement (milieu optique non relativiste)

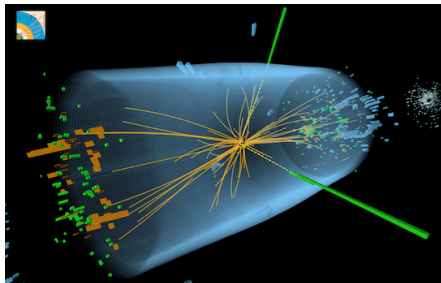


Problème similaire dans le Modèle Standard

- Eqs. (origine géométrique): $m = 0$ pour toutes les particules
- Milieu (champ de Higgs) qui interagit et les “freine” plus ou moins
- ... ce qui les rend (pour nous) plus ou moins massives

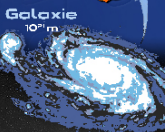
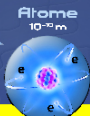
Ce champ de Higgs peut être excité
pour engendrer un boson H (spin 0) observable... et observé

Champagne pour le LHC



- 4 juillet 2012: ATLAS et CMS voient un signal de type boson H
- étudiés dans 2 premiers runs du LHC (2009-2013, 2015-2018)
- nécessite d'accumuler beaucoup de données
 - les collisions du LHC ne produisent pas toutes un boson H
 - ce boson a de nombreuses manières de se désintégrer
 - en très bon accord avec le Modèle Standard

Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique	e électron	u haut / up	d bas / down	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il prénopce aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charm / charmes	s strange / étrange	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / bottom / bottom	

INTERACTIONS FONDAMENTALES		Bosons Z, W [±]	
10 ⁻¹⁷ m	Interaction faible	Déstabilisation radioactive (α, β, γ), certaines réactions nucléaires	
infinie	Interaction électromagnétique	Frottement, rayonnement, cohésion des atomes et des molécules, lumière	
10 ⁻¹⁵ m	Interaction forte	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire	
infinie	Gravitation	Gravité, pesantes, système solaire, galaxies	

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui rassemblent, en particulier, les Soleils :

- la gravitation pour rassembler les matières et les tenir à l'intérieur ;
- l'interaction électromagnétique pour empêcher les gaz de se contracter ;
- l'interaction nucléaire forte pour assurer la fusion au cœur ;
- l'interaction électrofaible pour empêcher les étoiles de se contracter trop vite.



ANTIMATIÈRE

Ainsi, pour chaque particule, il existe une antiparticule. Les particules et les antiparticules ont la même masse, mais des charges opposées.

Des questions ?

