



Le modèle standard de la physique des particules : une approche historique

Loïc Villain

Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique,
Département de Physique,
Université F. Rabelais de Tours
loic@lmpt.univ-tours.fr

Lycée Vaucanson, le 29 novembre 2013

Matière et interactions

- ▶ Qu'est-ce que la matière ?

- ▶ question probablement aussi ancienne que l'humanité ;

- ▶ R. Feynman (Nobel de physique 1965) : « Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le *maximum d'informations dans le minimum de mots* ? »

« Je pense que c'est l'*hypothèse atomique* (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) selon laquelle toutes les choses sont faites d'atomes - petites *particules* qui se déplacent en mouvement perpétuel, *s'attirant* mutuellement à petite distance les unes les autres et *se repoussant* lorsque l'on veut les faire se pénétrer. Dans cette seule phrase, vous verrez qu'il y a une énorme quantité d'information sur le monde, si on lui applique un peu d'imagination et de réflexion » ;

- ▶ description précise (mathématique) actuelle : le **Modèle Standard de la physique des particules**

Matière et interactions

- ▶ Qu'est-ce que la matière ?
- ▶ question probablement aussi ancienne que l'humanité ;
- ▶ R. Feynman (Nobel de physique 1965) : « *Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'informations dans le minimum de mots ?* »

« *Je pense que c'est l'hypothèse atomique (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) selon laquelle toutes les choses sont faites d'atomes - petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsque l'on veut les faire se pénétrer. Dans cette seule phrase, vous verrez qu'il y a une énorme quantité d'information sur le monde, si on lui applique un peu d'imagination et de réflexion* » ;

- ▶ description précise (mathématique) actuelle : le **Modèle Standard de la physique des particules**

Matière et interactions

- ▶ Qu'est-ce que la matière ?
- ▶ question probablement aussi ancienne que l'humanité ;
- ▶ R. Feynman (Nobel de physique 1965) : « *Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'informations dans le minimum de mots ?* »

« Je pense que c'est l'hypothèse atomique (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) selon laquelle toutes les choses sont faites d'atomes - petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsque l'on veut les faire se pénétrer. Dans cette seule phrase, vous verrez qu'il y a une énorme quantité d'information sur le monde, si on lui applique un peu d'imagination et de réflexion » ;

- ▶ description précise (mathématique) actuelle : le **Modèle Standard de la physique des particules**

Matière et interactions

- ▶ Qu'est-ce que la matière ?
- ▶ question probablement aussi ancienne que l'humanité ;
- ▶ R. Feynman (Nobel de physique 1965) : « *Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'informations dans le minimum de mots ?* »

« *Je pense que c'est l'hypothèse atomique (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) selon laquelle toutes les choses sont faites d'atomes - petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsque l'on veut les faire se pénétrer. Dans cette seule phrase, vous verrez qu'il y a une énorme quantité d'information sur le monde, si on lui applique un peu d'imagination et de réflexion* » ;

- ▶ description précise (mathématique) actuelle : le **Modèle Standard de la physique des particules**

Matière et interactions

- ▶ Qu'est-ce que la matière ?
- ▶ question probablement aussi ancienne que l'humanité ;
- ▶ R. Feynman (Nobel de physique 1965) : « *Si, dans un cataclysme, toute notre connaissance scientifique devait être détruite et qu'une seule phrase passe aux générations futures, quelle affirmation contiendrait le maximum d'informations dans le minimum de mots ?* »

« *Je pense que c'est l'hypothèse atomique (ou le fait atomique, ou tout autre nom que vous voudrez lui donner) selon laquelle toutes les choses sont faites d'atomes - petites particules qui se déplacent en mouvement perpétuel, s'attirant mutuellement à petite distance les unes les autres et se repoussant lorsque l'on veut les faire se pénétrer. Dans cette seule phrase, vous verrez qu'il y a une énorme quantité d'information sur le monde, si on lui applique un peu d'imagination et de réflexion* » ;

- ▶ description précise (mathématique) actuelle : le **Modèle Standard de la physique des particules**

Plan

Corpuscules et forces

Atomes et particules quantiques

À l'intérieur de l'atome

De nouvelles particules...

Surprises et questions ouvertes du modèle standard

I Corpuscules et forces

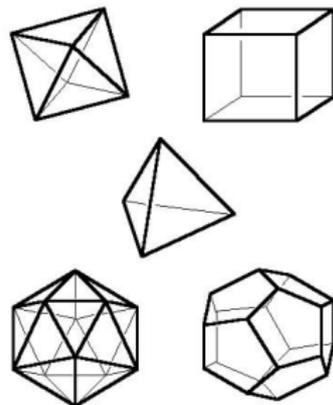


Matière discrète ou continue

question de la **divisibilité** de la matière ? → **matière discrète ou continue** ?

Constitution de la matière et ses « théories »

- ▶ **Empédocle** (−490 – −435 ?) : quatre éléments (Eau, Terre, Feu, Air) ;
- ▶ **Platon** : **solides platoniciens** (polyèdres réguliers et convexes) ;
- ▶ **quatre qualités élémentales** pour **Aristote** (monde sublunaire) + **cinquième élément**, la « **quinte essence** » ou l'éther, pour le Cosmos
→ vision **continue** → **pas de vide**.



Solides platoniciens

Atomes antiques

Limite à la divisibilité de la matière (**Démocrite**, -460 – -370)

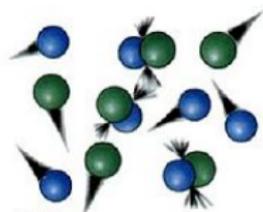
*Si tout corps est divisible à l'infini, de deux choses l'une : ou il ne restera rien ou il restera quelque chose. Dans le premier cas la matière n'aurait qu'une existence virtuelle, dans le second cas on se pose la question : que reste-t-il ? La réponse la plus logique, c'est l'existence d'éléments réels, indivisibles et **insécables** appelés donc **atomes**.*



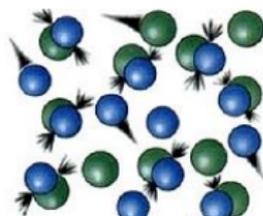
- ▶ **Démocrite** suppose l'existence de différents types d'**atomes crochus**
- ▶ domination de la science d'Aristote
- **idée des atomes (presque) oubliée pendant longtemps...**

Matière et corpuscules

- ▶ la **dynamique newtonienne** (\sim **1686**) décrit aussi bien le mouvement des planètes que celui de l'eau qui coule
- ▶ dans cette modélisation, l'Univers est un « **système mécanique déterministe** » composé de **corpuscules massifs ponctuels** qui interagissent grâce à des **forces**
- ▶ **1733** : Daniel **Bernoulli** explique la **pression** et la **température** des gaz à l'aide d'un modèle de **collisions de corpuscules**



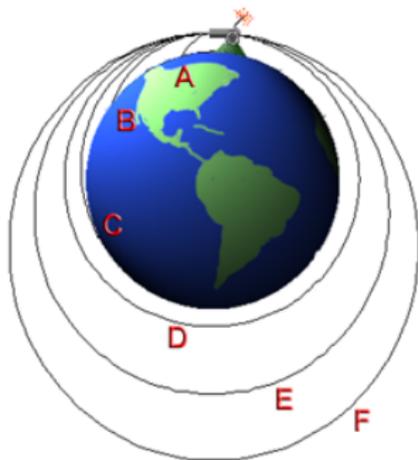
Faible concentration =
Peu de collisions



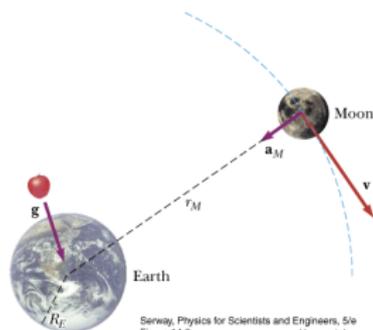
Forte concentration =
Plus de collisions

Forces à distance : gravitation (Newton, 1686)

- ▶ force universelle attractive entre masses
- ▶ même action de la Terre sur une pomme ou sur la Lune

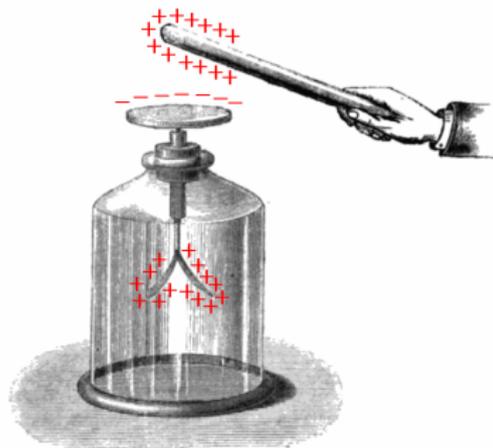
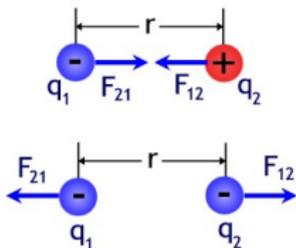


- ▶ **explications** : lois de Kepler, phénomène des marées, forme sphérique des étoiles et planètes, etc.
- ▶ **prédictions** : forme de la Terre, retour prochain d'une comète (Halley), etc.



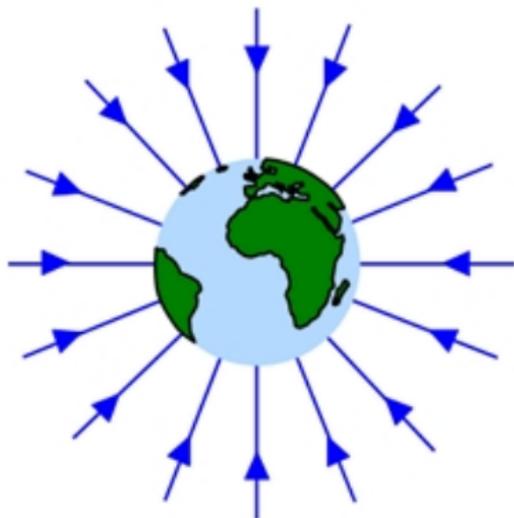
Forces à distance : électricité et magnétisme

- ▶ phénomènes connus depuis l'Antiquité (ambre = « électron » en grec ancien ; magnétite = roche) ;
- ▶ **1734, DuFay** : deux « fluides électriques » (= deux signes pour la charge) ;
- ▶ **1785, Coulomb** : force entre charges électriques → opposés s'attirent.

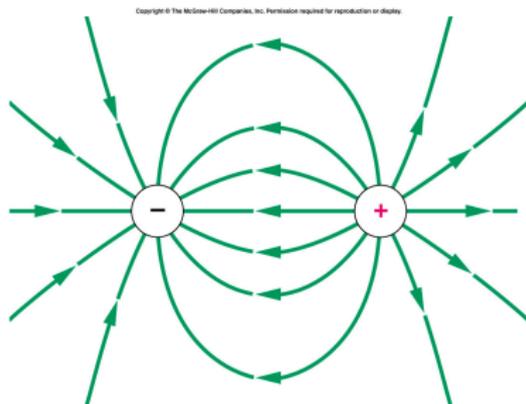


Forces à distance : champ de force

- ▶ les forces **gravitationnelle** et **électrostatique** se comprennent mieux à l'aide de la notion de « **champ de force** » ;
- ▶ les masses ou charges créent des champs de forces **en tout point de l'espace** ;
- ▶ ces **champs agissent sur d'autres masses ou charges** (qui sont elles-mêmes aussi sources) ;
- ▶ opposition entre la **matière** (**discrète**) et les **champs de force** (**continus**).

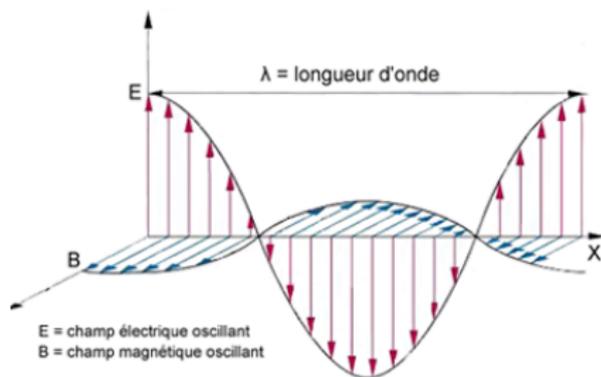
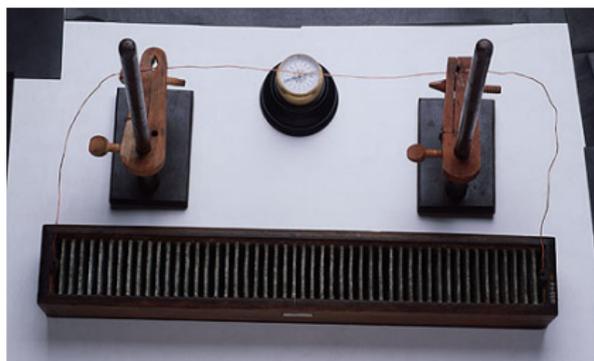


(LMPT)



Champ électromagnétique

- ▶ **1820, Ørsted** : courant électrique dévie une boussole
→ lien entre **électricité** et **magnétisme** ;
- ▶ **1831, Faraday** : notion de **champ magnétique** ;
- ▶ **1864, Maxwell** : théorie de l'**électromagnétisme** :
unification des champs électrique et magnétique
- ▶ influence **réciroque** → **ondes électromagnétiques**
(lumière = cas particulier)
- ▶ onde = **oscillation/excitation du champ** qui se propage



Bilan provisoire (deuxième moitié du XIX^{ème})

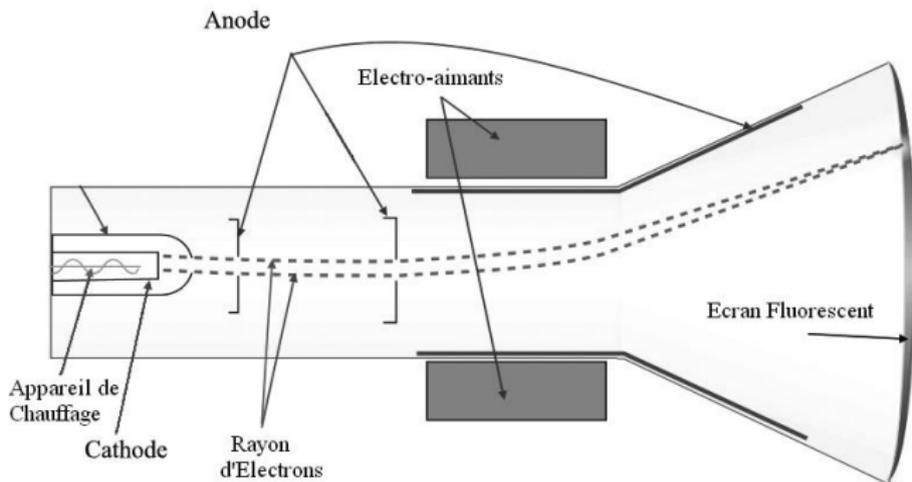
- ▶ il existe (probablement) des **atomes et molécules**, « **corpuscules** » ayant une **masse** et parfois une **charge électrique** ;
- ▶ il existe des « **champs de force** », le champ gravitationnel et le champ électromagnétique (**omniprésents/continus**) ;
- ▶ les corpuscules sont **sources des champs qui agissent en retour sur eux** ;
- ▶ le **champ gravitationnel** se manifeste surtout aux **grandes échelles** ;
- ▶ le **champ électromagnétique** agit dans beaucoup de phénomènes « **microscopiques** » ;
- ▶ la lumière = oscillation du champ électromagnétique, lequel **existe même en l'absence d'onde électromagnétique**.

II Atomes et particules quantiques

LIGHT IS A
WAVE!

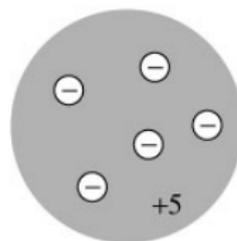
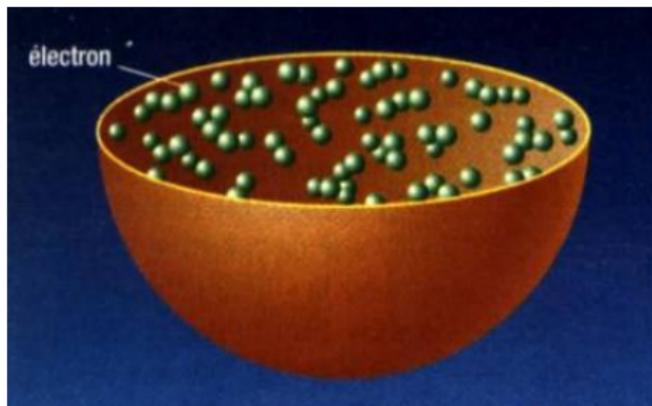
Électricité et rayons cathodiques

- ▶ **1838, Faraday** : rayons cathodiques dans gaz \sim fluide électrique ;
- ▶ **1897, Thomson** : rayons cathodiques formés de corpuscules, des électrons, de masse faible devant celle des atomes (estimée par la chimie) et de charge électrique négative
→ électrons inclus dans les atomes ?

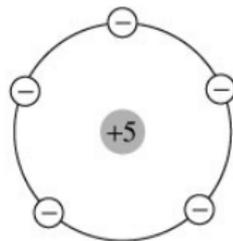


Les atomes ne sont pas insécables

- ▶ **1904, Thomson** : modèle du « pudding » ;
- ▶ **force électromagnétique** responsable de la **cohésion des atomes** ;
- ▶ **modèles d'atomes** proposés avant même la reconnaissance de leur existence (**Einstein, 1905** : explication du mouvement brownien ; **1906** : suicide de **Boltzmann**)



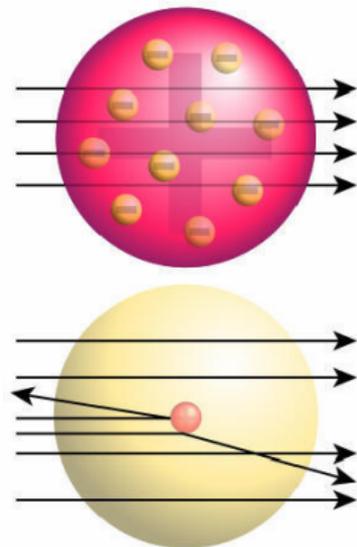
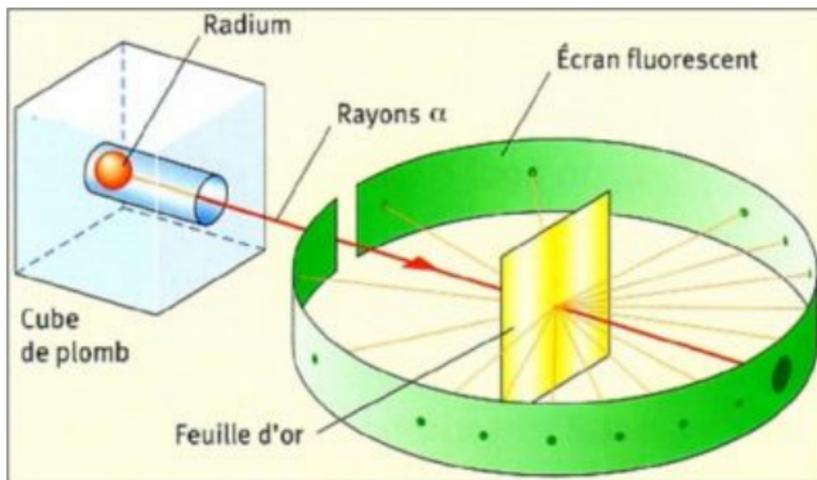
“Plum Pudding” Model
Thomson, 1904



“Saturnian” Model
Nagaoka, 1904

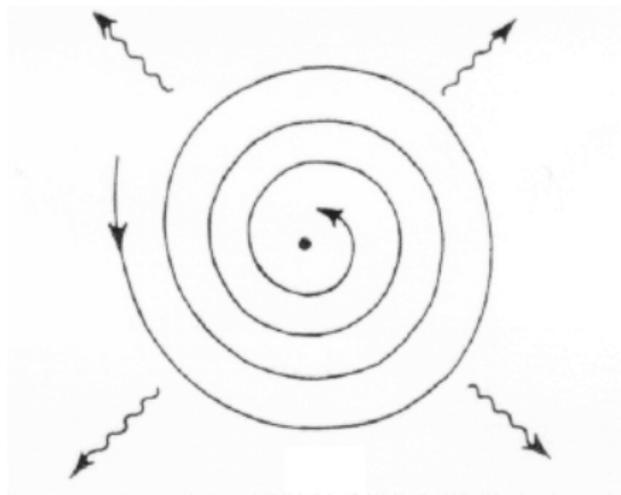
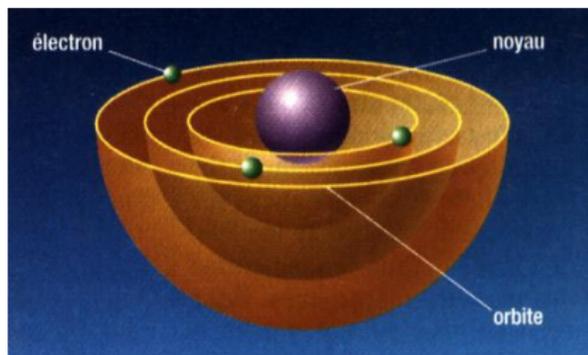
Expérience de Rutherford

1911, Rutherford : projectiles (noyaux d'hélium) lancés vers feuille d'or : la plupart passent **sans être déviés** mais certains font **demi-tour**
 → **la matière est principalement faite de vide** !



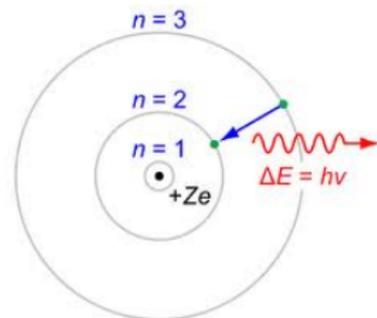
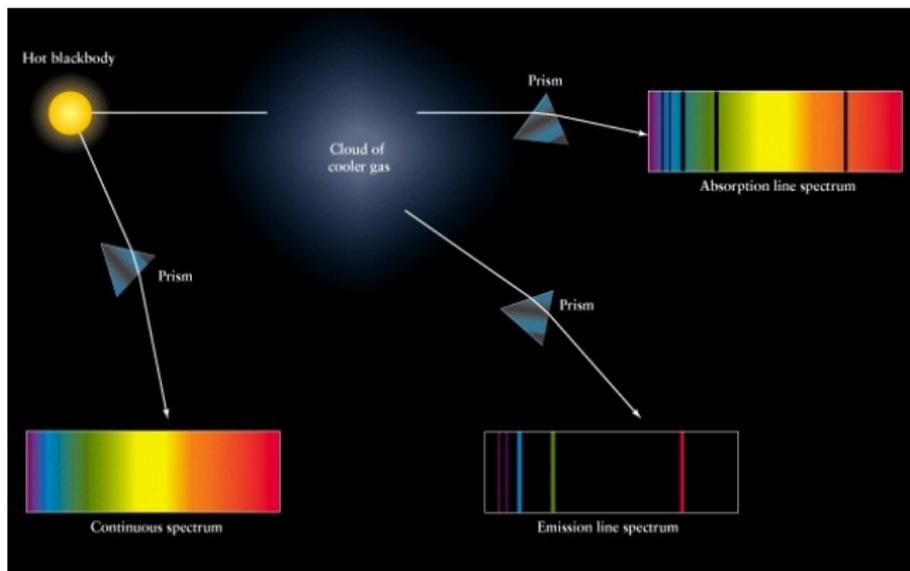
Modèle de Rutherford : un modèle atomique « planétaire »

- ▶ **noyau central** chargé positivement ;
- ▶ **électron(s) en orbite** de charge négative et de masse beaucoup plus faible ;
- ▶ atome 100 000 fois plus grand que noyau...
- ▶ **problème** : perd de l'énergie selon Maxwell → atome instable ?



Spectre de l'atome d'hydrogène

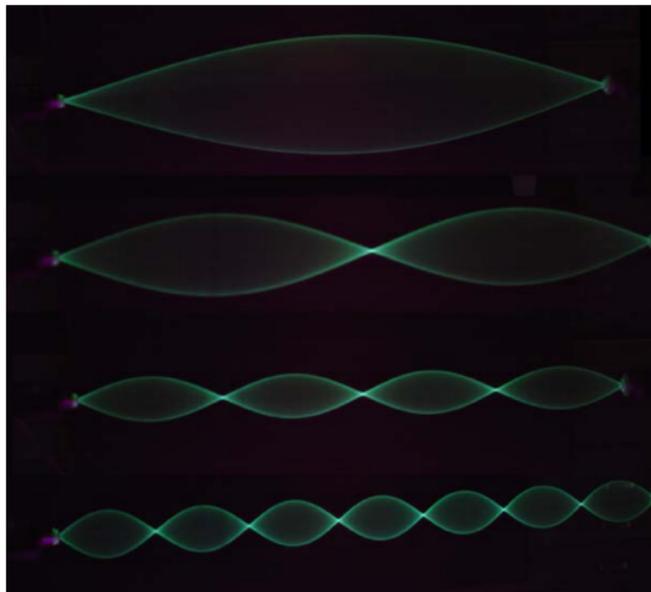
- ▶ **spectres** de gaz contiennent des **raies** (d'absorption ou d'émission)
- ▶ raies caractérisent la **composition chimique**
- ▶ **1913, Bohr** : **orbitales atomiques quantifiées** → **orbites interdites**



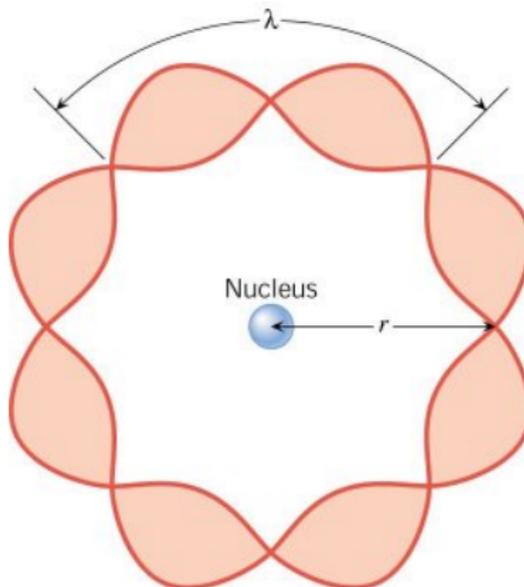
atome de Bohr

Hypothèse de de Broglie

- ▶ quantification de l'énergie dans les atomes : **constatée mais incomprise**
- ▶ **1923, de Broglie** : analogie avec une corde vibrante
 - « onde de matière » avec λ (longueur d'onde) inversement proportionnelle à la vitesse
 - dualité onde-corpuscule !



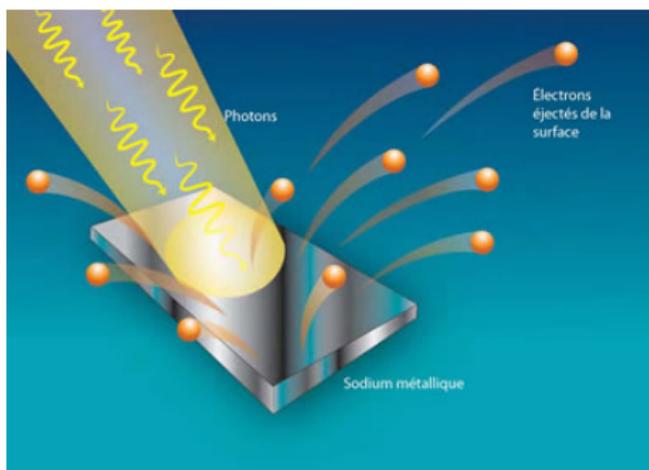
(LMPT)



Modèle Standard

Photons et effet photo-électrique

- ▶ **1905, Einstein** : effet photo-électrique se comprend bien en supposant qu'il existe des **particules lumineuses** avec λ **inversement proportionnelle à E**
→ prix Nobel de physique en 1921
- ▶ **1926, Lewis** : **photon** (particule associée au champ électromagnétique) ;
- ▶ **lumière parfois onde** (interférence, diffraction), parfois **particule** ?



Dualité onde-particule

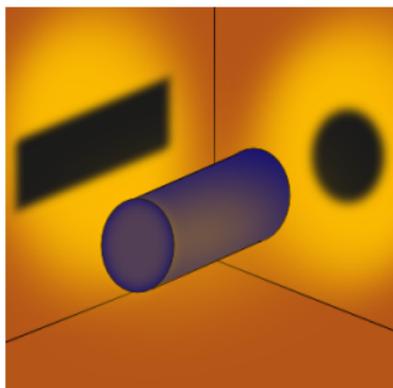
- ▶ tout système physique, selon l'expérience, doit être modélisé comme un ensemble soit de corpuscules, soit d'ondes :
 - principe de complémentarité (1927 : diffraction d'électrons)
- ▶ besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?

Dualité onde-particule

- ▶ tout système physique, selon l'expérience, doit être modélisé comme un ensemble soit de corpuscules, soit d'ondes :
→ principe de complémentarité (1927 : diffraction d'électrons)
- ▶ besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?
- ▶ exemple similaire : que peut être un « système » si parfois on voit un rectangle et parfois un disque quand on l'observe ?

Dualité onde-particule

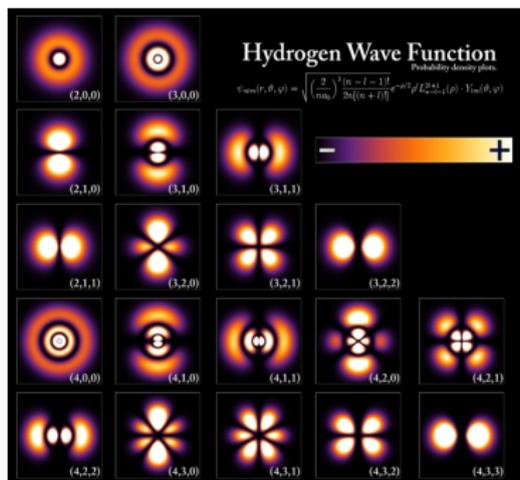
- ▶ tout système physique, selon l'expérience, doit être modélisé comme un ensemble soit de corpuscules, soit d'ondes :
→ principe de complémentarité (1927 : diffraction d'électrons)
- ▶ besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?
- ▶ exemple similaire : que peut être un « système » si parfois on voit un rectangle et parfois un disque quand on l'observe ?



→ description des « systèmes quantiques » par de nouveaux objets mathématiques

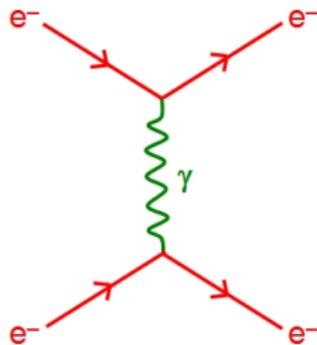
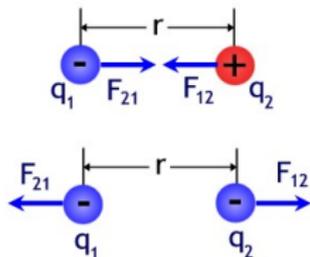
Indétermination et probabilité quantiques

- ▶ l'**observation** d'un système peut l'influencer ;
- ▶ il existe une limite **intrinsèque** sur la précision
→ **indétermination de Heisenberg** (ex. : position / vitesse)
→ « **particule quantique (ni corpuscule ni onde)** ; »
- ▶ **1926** : équation de **Schrödinger** ;
- ▶ **1926** : interprétation **probabiliste** de **Born** → **plus de déterminisme** ;
- ▶ version moderne : atome quantique avec **probabilité de présence**.



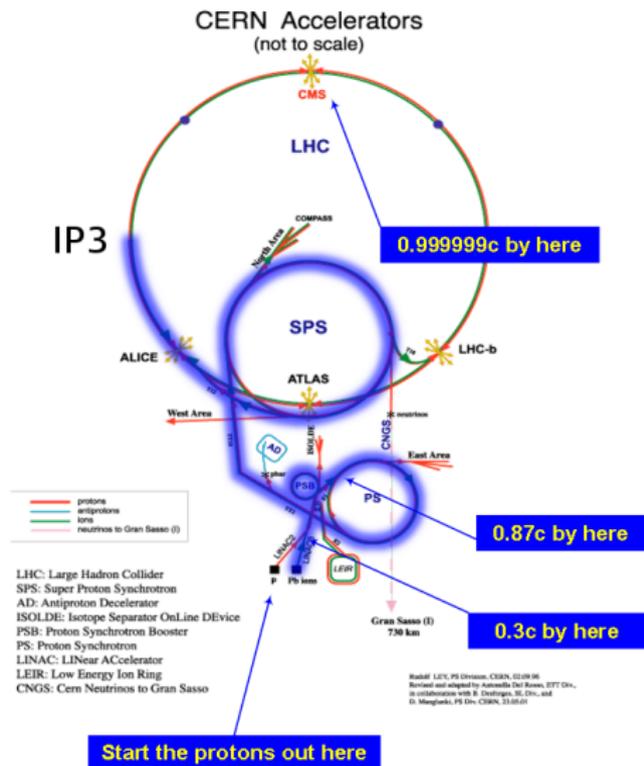
Interaction quantique

- ▶ **années 1930** : **interaction électromagnétique** explique phénomènes quotidiens (chimie, résistance des matériaux, etc.) ;
- ▶ dans un **cadre quantique** : échange de **photons**



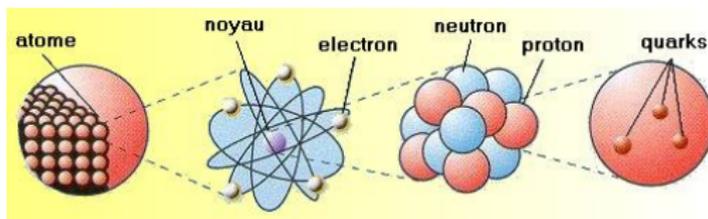
Théorie quantique des champs

- ▶ il faut décrire les « **particules de matière** » et le **champ électromagnétique** par des « **champs quantiques** »
- ▶ **dualité onde-corpuscule** s'applique à tout système physique
- ▶ plus l'**énergie** d'un système est **élevée**, plus la longueur d'onde associée sera petite (valable pour une masse donnée)
→ en accélérant des projectiles on regarde à des **échelles** de plus en plus **petites**



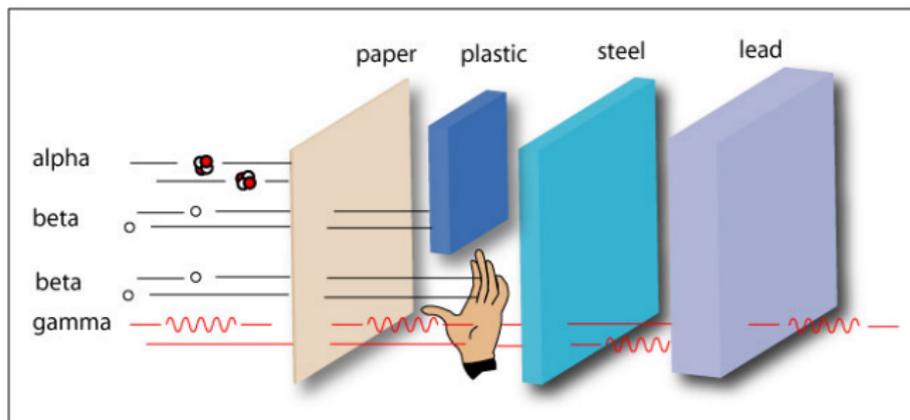
III

À l'intérieur de l'atome



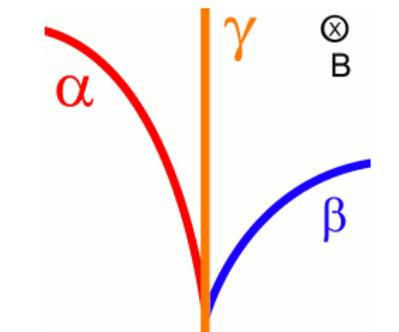
Les atomes ne sont pas éternels

- ▶ **1895, Röntgen** : découverte des **rayons X** (par décharge de tubes cathodiques) ;
- ▶ **1896, Becquerel & les Curie** : découverte de la **radio-activité** naturelle
→ **plusieurs types de « rayonnement »** (alpha, beta, gamma) ;
- ▶ **1900, Becquerel** : rayons bêta composés de « particules bêta » \equiv **électrons** ;
- ▶ **1901, Rutherford & Soddy** : radio-activité = **transmutation**
→ **les atomes sont-ils vraiment insécables ?**



(LMPT)

Modèle Standard

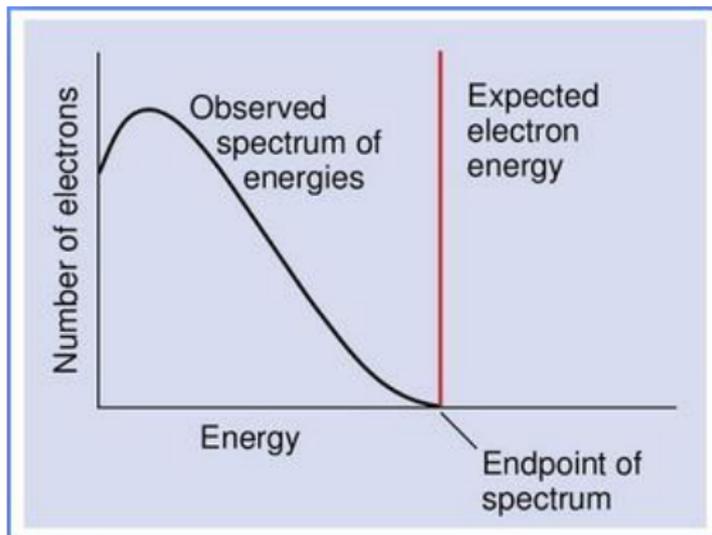


Compréhension du phénomène : la relativité restreinte

- ▶ étude du champ électromagnétique (lumière) pour observateurs en mouvement relatif → **invariance de la vitesse de la lumière**
- ▶ solution (Einstein, 1905) : **abandon des hypothèses d'un temps et d'un espace absolus**
 - durée et longueur relatives à l'observateur ;
- ▶ la masse est l'une des formes prises par l'énergie : $E = mc^2$
 - **possibilité de convertir du mouvement en masse et inversement...**
 - **seule l'énergie est conservée, pas la masse**
 - **radioactivité, création et destruction de particules, etc.**
- ▶ **impossible d'atteindre ou dépasser la vitesse c pour une particule de masse non nulle**

Énergie des électrons émis par la radio-activité bêta

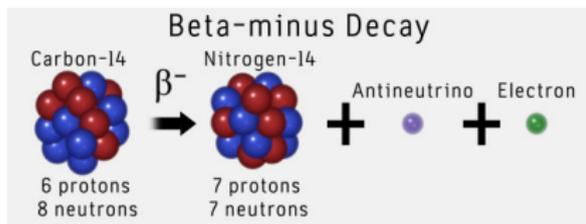
- ▶ **1911-14, Meitner & Hahan, Chadwick** : énergie émise variable et inférieure à la prédiction théorique ;
- ▶ **années 1920, Bohr** : principe de conservation de l'énergie violé ?



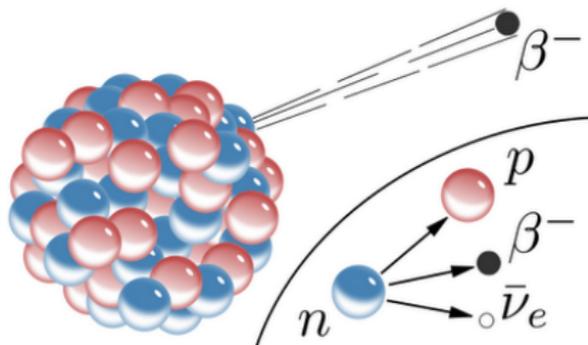
énergie moyenne des électrons émis : comparaison avec la prédiction théorique

Pauli et son « neutron »

- ▶ **1930, Pauli** : énergie perdue emportée par un « neutron »
- ▶ particule sans masse ni charge électrique :
→ une chance sur deux de traverser une année-lumière de plomb sans réagir !
- ▶ **1932, Chadwick** : découverte expérimentale d'une particule neutre massive au cœur des noyaux → neutron (noté n);
- ▶ **1933, Fermi** : le neutron de Pauli, plus petit, est un « neutrino » (noté ν).

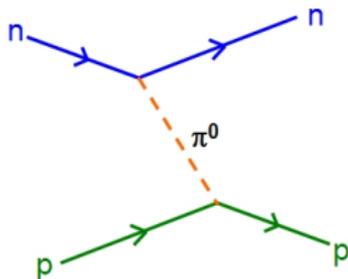


vision moderne de la radio-activité
bêta



Nouvelles interactions et particules associées

- ▶ **années 1930** : noyaux atomiques composés de protons et de **neutrons** liés par **interaction nucléaire forte**
 → **nouvelles particules d'interaction** (« pions » (π) \sim photon)

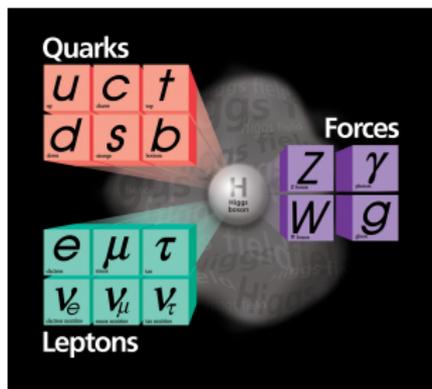


- ▶ **1934, Fermi** : théorie de l'« **interaction faible** » pour expliquer la radio-activité bêta
 → modèle sans particule d'interaction (interaction « au contact » (!?)).

Bilan provisoire et incomplet (vers 1930)

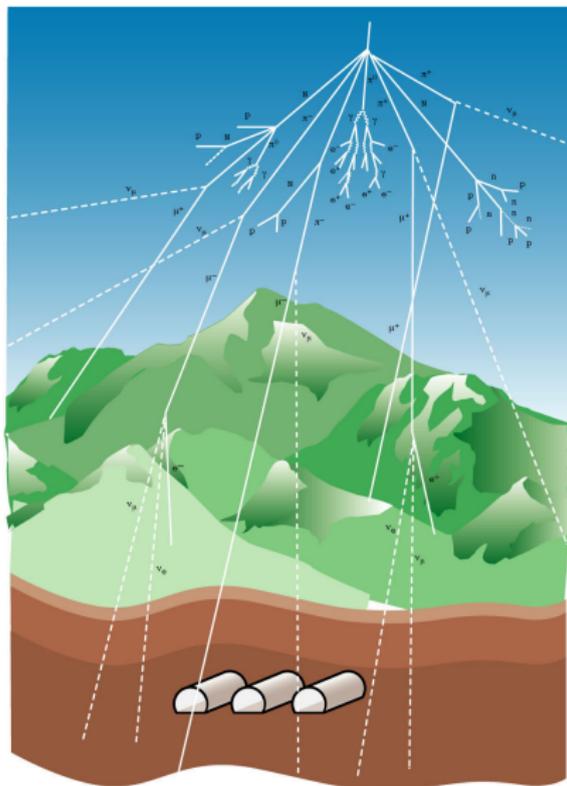
- ▶ la matière est composée d'**atomes**, eux-mêmes constitués d'un **noyau** et d'**électrons** qui sont liés grâce à l'**interaction électromagnétique** ;
- ▶ le noyau est formé de **protons** et de **neutrons** liés par **interaction forte** ;
- ▶ il existe probablement aussi une particule fantomatique, le **neutrino**, qui se manifeste uniquement lors de désintégrations bêta ;
- ▶ dans le cadre de la **théorie quantique**,
 1. l'**interaction électromagnétique** correspond à un échange de **photons** ;
 2. l'**interaction forte** devrait correspondre à un échange de « **pions** » ;
 3. toutes les particules (de matière ou d'interaction) sont des « **excitations/oscillations** » de **champs quantiques** plus fondamentaux ;
- ▶ il existe deux autres interactions fondamentales,
 1. l'**interaction gravitationnelle** négligeable au niveau des particules élémentaires et que l'on ne sait pas décrire quantiquement ;
 2. l'**interaction nucléaire faible**, qui est responsable des désintégrations bêta mais ne semble pas correspondre à un échange de particules.

IV De nouvelles particules...



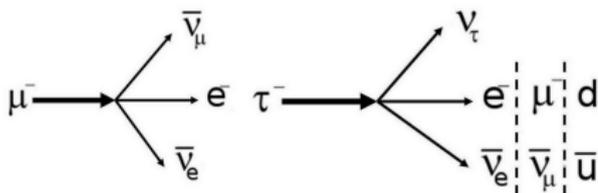
Nouvelles particules : rayons cosmiques et collisions

- ▶ **1912, Hess** : atmosphère frappée en continu par des **rayons cosmiques**
- ▶ **1932, Anderson** : découverte du **positon** (semblable à e^- mais charge positive) → **antimatière** prédite peu avant par **Dirac**
- ▶ **1936, Anderson** : découverte du **muon** (μ^- , cousin plus massif et instable de l' e^-)
- ▶ **expériences en collisionneurs** et analyses des rayons cosmiques
→ **nombreuses autres...**



Bestiaire du modèle standard : leptons

- ▶ électron et muon sont **élémentaires** et insensibles à l'interaction forte : ce sont des « **leptons** » ;
- ▶ il existe un **troisième lepton chargé** encore plus lourd et instable : le **tau** (τ) ;
- ▶ il y a ainsi **trois générations de particules matérielles élémentaires** comportant un doublet de quarks et un lepton chargé
- ▶ chaque famille comporte également un **neutrino** (lepton élémentaire neutre) qui réagit avec le lepton chargé associé : neutrino électronique (ν_e), neutrino muonique (ν_μ) et neutrino tauique (ν_τ).

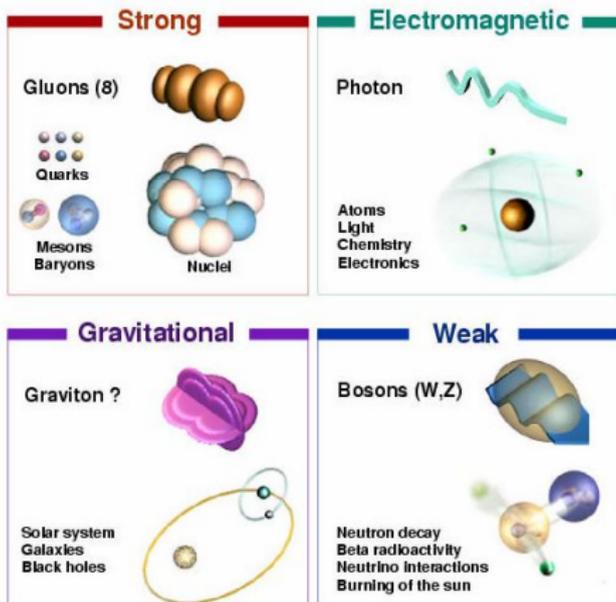


Leptons			Quarks		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

Bestiaire du modèle standard : bosons d'interaction

- ▶ les quarks interagissent par l'intermédiaire de **gluons** ;
- ▶ l'interaction faible correspond bien à l'échange de bosons mais très massifs : les **bosons W et Z**.

Forces



The particle drawings are simple artistic representations

Interactions nucléaires et quarks

la désintégration d'un neutron en proton par interaction faible ou l'interaction entre un neutron et un proton par interaction forte peuvent s'interpréter comme des interactions faisant intervenir des quarks.

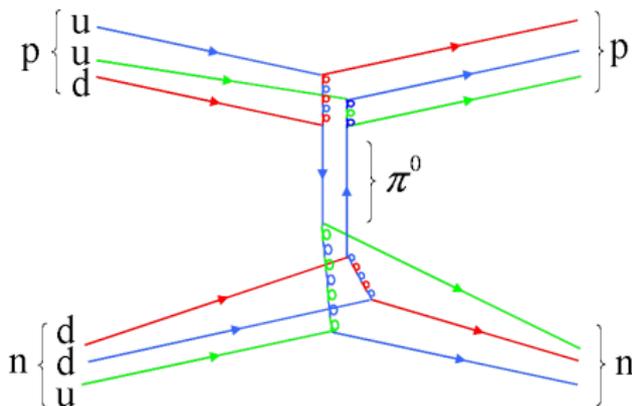
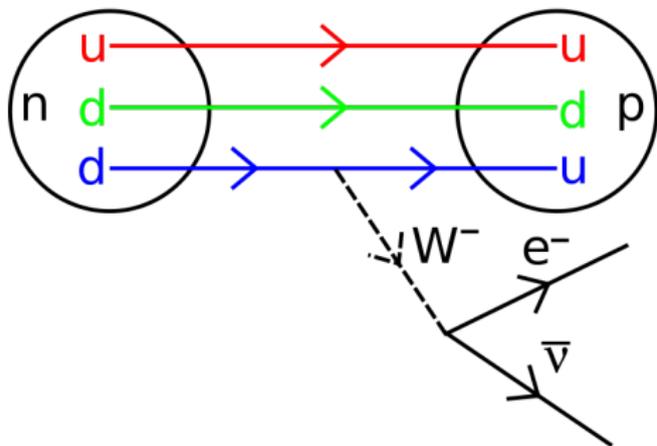
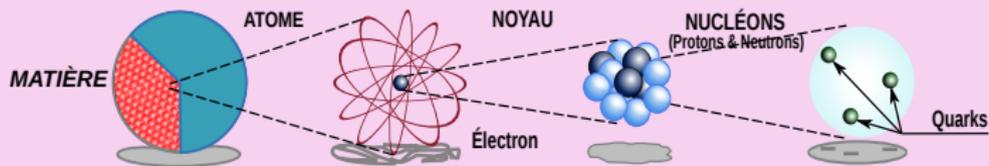


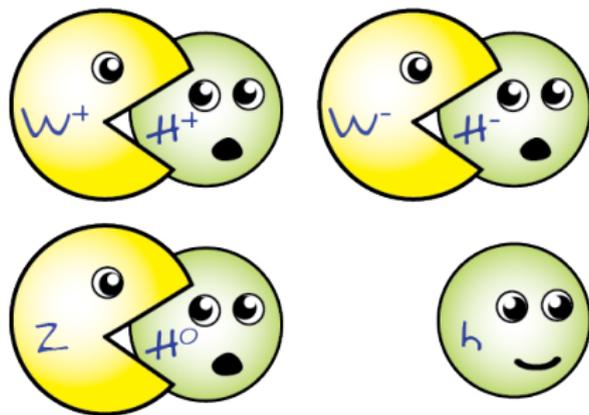
TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD



FERMIONS		LEPTONS peuvent se déplacer librement		QUARKS prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.	
<p>La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.</p> <p>Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.</p>	<p>Première famille</p> <p>ÉLECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est de -1.</p> 	<p>NEUTRINO ÉLECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.</p> 	<p>BAS Sa charge électrique est -1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.</p> 	<p>HAUT Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.</p> 	
	<p>Deuxième famille</p> <p>MUON Un compagnon plus massif de l'électron.</p> 	<p>NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.</p> 	<p>ÉTRANGE Un compagnon plus lourd du "Bas".</p> 	<p>CHARME Un compagnon plus lourd du "Haut"</p> 	
	<p>Troisième famille</p> <p>TAU Un compagnon encore plus lourd que le Muon.</p> 	<p>NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.</p> 	<p>BEAUTÉ Un compagnon encore plus lourd du "Bas".</p> 	<p>VÉRITÉ ou TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut"</p> 	
<p>BOSONS VECTEURS Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.</p>	<p>PHOTON Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.</p> 	<p>GLUON Porteur de la force "forte" entre Quarks.</p> 	<p>BOSONS INTERMÉDIAIRES : W⁺, W⁻ et Z⁰ Porteurs de la force "faible", responsables de certaines forces de désintégrations radioactives.</p> 		
<p>BOSON DE HIGGS ? Hypothétique</p>  <p>Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"</p>				<p>GRAVITON ? Hypothétique</p> 	

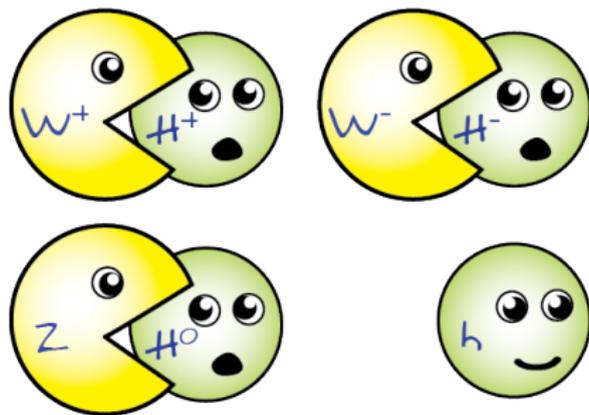
Les champs de Brout, Englert et Higgs

- ▶ Modèle standard version 1963 : théorie viable uniquement si les bosons W et Z sont sans masse ;
- ▶ dans ce cas : interaction faible moins faible !
- ▶ **problème** : si on ajoute une masse pour ces particules dans les équations la théorie ne fonctionne plus !
- ▶ 1964 : Brout, Englert et Higgs : modèle dans lequel quatre nouveaux champs (ni d'interaction ni de matière) expliquent la masse des bosons sans renoncer aux « symétries fondamentales » du modèle standard ;
- ▶ trois champs « avalés » par ces bosons qui se manifestent par leur masse.



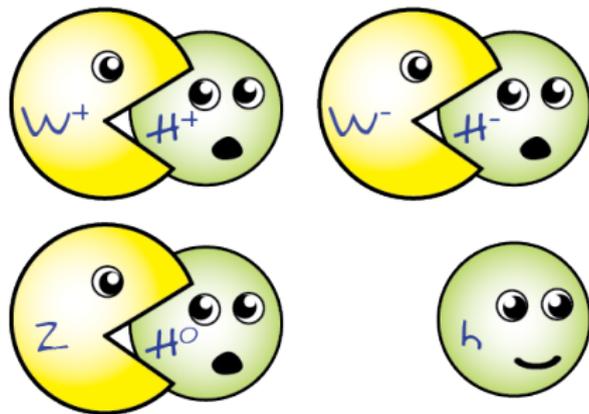
Les champs de Brout, Englert et Higgs

- ▶ Modèle standard version 1963 : théorie viable uniquement si les bosons W et Z sont sans masse ;
- ▶ dans ce cas : interaction faible moins faible !
- ▶ **problème** : si on ajoute une masse pour ces particules dans les équations la théorie ne fonctionne plus !
- ▶ 1964 : Brout, Englert et Higgs : modèle dans lequel quatre nouveaux champs (ni d'interaction ni de matière) expliquent la masse des bosons sans renoncer aux « symétries fondamentales » du modèle standard ;
- ▶ trois champs « avalés » par ces bosons qui se manifestent par leur masse.



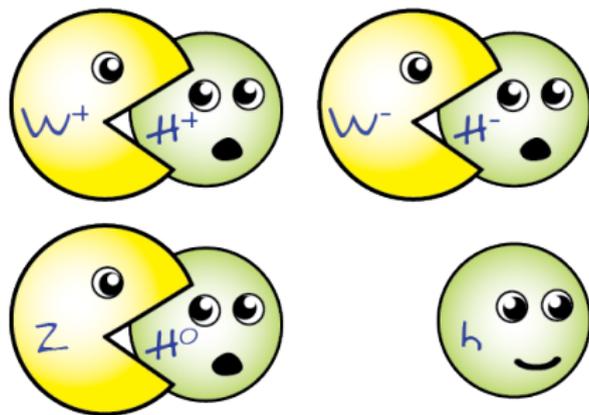
Les champs de Brout, Englert et Higgs

- ▶ Modèle standard version 1963 : théorie viable uniquement si les bosons W et Z sont sans masse ;
- ▶ dans ce cas : interaction faible moins faible !
- ▶ **problème** : si on ajoute une masse pour ces particules dans les équations la théorie ne fonctionne plus !
- ▶ 1964 : Brout, Englert et Higgs : modèle dans lequel quatre nouveaux champs (ni d'interaction ni de matière) expliquent la masse des bosons sans renoncer aux « symétries fondamentales » du modèle standard ;
- ▶ trois champs « avalés » par ces bosons qui se manifestent par leur masse.



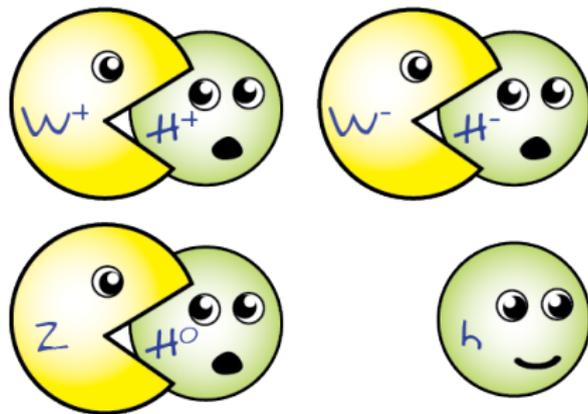
Les champs de Brout, Englert et Higgs

- ▶ Modèle standard version 1963 : théorie viable uniquement si les **bosons W et Z sont sans masse** ;
- ▶ dans ce cas : interaction faible moins faible !
- ▶ **problème** : si on ajoute une masse pour ces particules dans les équations **la théorie ne fonctionne plus !**
- ▶ **1964 : Brout, Englert et Higgs** : modèle dans lequel **quatre nouveaux champs** (ni d'interaction ni de matière) expliquent la masse des bosons sans renoncer aux « **symétries fondamentales** » du modèle standard ;
- ▶ trois champs « avalés » par ces bosons qui se manifestent par leur masse.



Les champs de Brout, Englert et Higgs

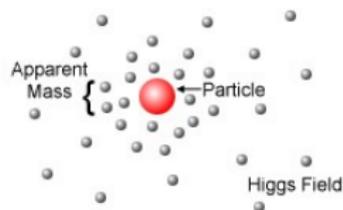
- ▶ Modèle standard version 1963 : théorie viable uniquement si les bosons W et Z sont sans masse ;
- ▶ dans ce cas : interaction faible moins faible !
- ▶ **problème** : si on ajoute une masse pour ces particules dans les équations la théorie ne fonctionne plus !
- ▶ **1964 : Brout, Englert et Higgs** : modèle dans lequel quatre nouveaux champs (ni d'interaction ni de matière) expliquent la masse des bosons sans renoncer aux « symétries fondamentales » du modèle standard ;
- ▶ trois champs « avalés » par ces bosons qui se manifestent par leur masse.



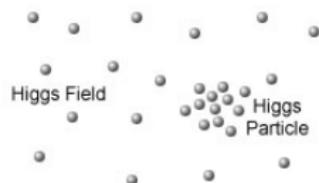
Et le boson de Higgs...

- ▶ **quatrième champ** : omniprésent et son existence **explique la masse** de toutes les **particules de matière élémentaires**...
- ▶ prédiction du modèle : si ce champ existe, alors il doit être possible de lui fournir de l'énergie pour le faire « vibrer » et produire une particule dite « le **boson de Higgs** » ;
- ▶ le modèle ne dit rien sur la masse de ce boson et donc sur l'énergie à fournir : **découverte au LHC en 2012**
→ Nobel en 2013 !

Higgs Mechanism



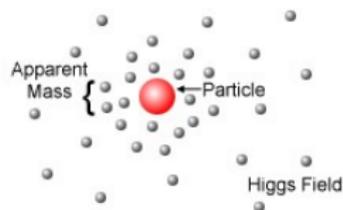
Higgs Particles



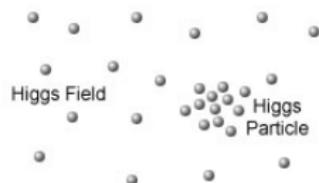
Et le boson de Higgs...

- ▶ **quatrième champ** : omniprésent et son existence **explique la masse** de toutes les **particules de matière élémentaires**...
- ▶ **prédiction du modèle** : si ce champ existe, alors il doit être possible de lui fournir de l'énergie pour le faire « vibrer » et produire une particule dite « le **boson de Higgs** » ;
- ▶ le modèle ne dit rien sur la masse de ce boson et donc sur l'énergie à fournir : **découverte au LHC en 2012**
→ Nobel en 2013 !

Higgs Mechanism



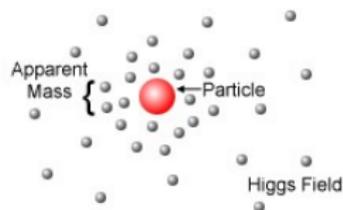
Higgs Particles



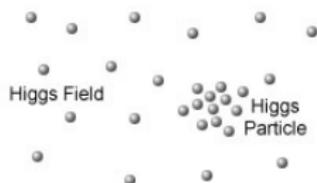
Et le boson de Higgs...

- ▶ **quatrième champ** : omniprésent et son existence **explique la masse** de toutes les **particules de matière élémentaires**...
- ▶ **prédiction du modèle** : si ce champ existe, alors il doit être possible de lui fournir de l'énergie pour le faire « vibrer » et produire une particule dite « le **boson de Higgs** » ;
- ▶ le modèle ne dit rien sur la masse de ce boson et donc sur l'énergie à fournir : **découverte au LHC en 2012**
→ Nobel en 2013 !

Higgs Mechanism



Higgs Particles



Le modèle standard en équation... version condensée

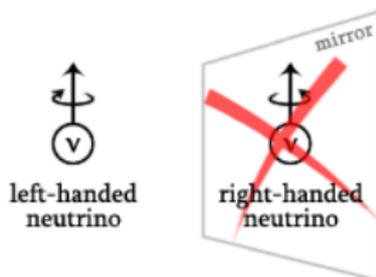
$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + h.c. \\ & + \bar{\psi}_i\gamma_{ij}\psi_j\Phi + h.c. \\ & + |D_\mu\Phi|^2 - V(\Phi)\end{aligned}$$

Le modèle standard en équation... version moins condensée

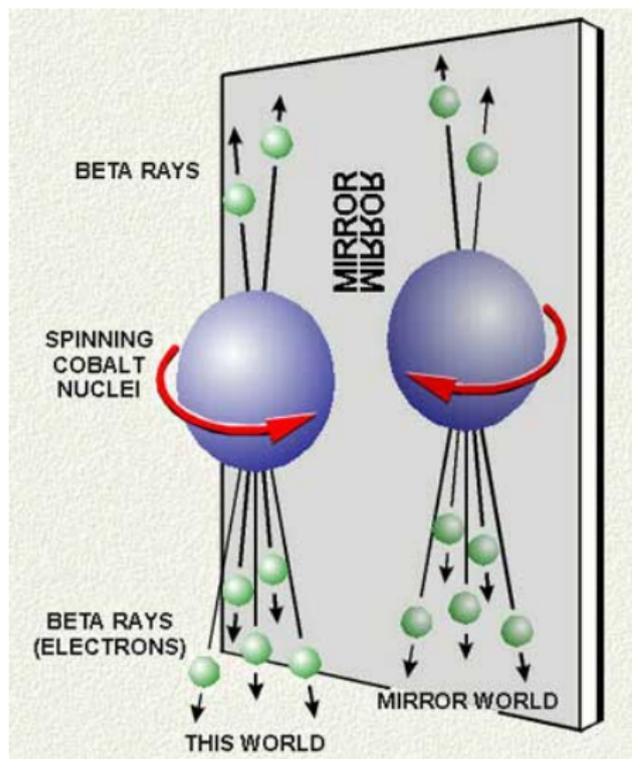
Standard Model Lagrangian Density

$$\begin{aligned}
 & -\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^T \gamma^\mu q_j^T) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - ig_c w [\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^+)] - igs_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gMW_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & igs_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & igs_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_d) d_j^\lambda + igs_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) - \frac{2}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda)] + \frac{ig}{c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma \nu^\lambda) (1 +
 \end{aligned}$$

V Surprises et questions ouvertes du modèle standard



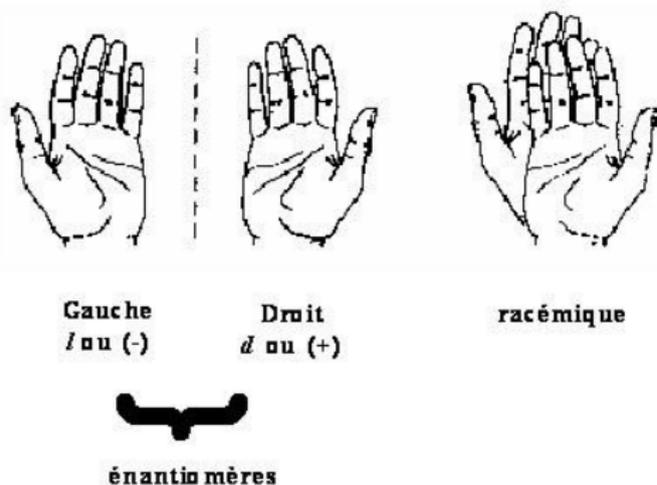
Violation de la parité (Madame Wu, 1957)



- l'interaction faible (et elle seule !) **viole la parité** : l'image dans un **miroir** d'un processus physique réel faisant intervenir l'interaction faible n'est pas un processus existant dans la nature !

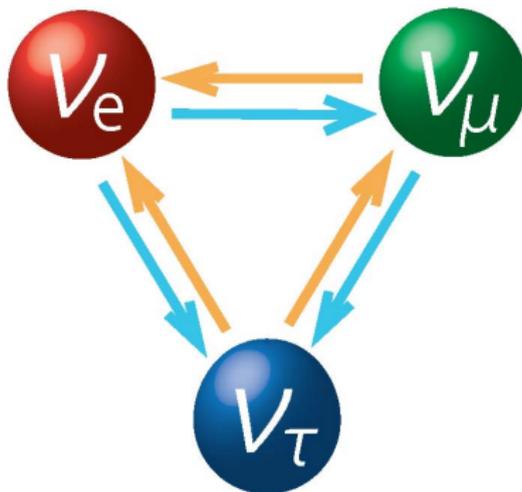
Chiralité des particules

- ▶ les particules « fondamentales » possèdent une « chiralité » ;
- ▶ une **particule massive** « observable » (ex. l'électron) est en fait un « mélange racémique » des deux chiralités (provoqué par le champ de Higgs) ;
- ▶ **seule une chiralité de l'électron** (et de toute particule) est sensible à l'interaction faible ;
- ▶ le **neutrino** n'existe que sous **une seule chiralité** !



Oscillations des neutrinos

- ▶ **années 1960, Davis & Bahcal** : le nombre de **neutrinos électroniques** reçus du Soleil est trop faible ;
- ▶ **1968, Pontecorvo** : si les neutrinos sont **massifs**, ils peuvent changer de saveur périodiquement (« **osciller** ») ;
- ▶ **2001, SN0, Sudbury** : seuls **35 % des neutrinos solaires** sont de type **électronique** → oscillation !



Conséquences de l'oscillations des neutrinos

- ▶ les neutrinos sont **massifs** (mais de **masses très faibles et inconnues** !);
- ▶ un neutrino de **saveur donnée** n'a **pas une masse donnée** et inversement
→ « **mélanges quantiques** » et nouvelle illustration des **limites de la notion de particule** (vrai aussi avec les quarks...)
→ il faut penser en termes de « **champs quantiques** »;
- ▶ le neutrino est peut-être sa **propre anti-particule**...

Conséquences de l'oscillations des neutrinos

- ▶ les neutrinos sont **massifs** (mais de **masses très faibles et inconnues** !);
- ▶ un neutrino de **saveur donnée** n'a **pas une masse donnée** et inversement
 → « **mélanges quantiques** » et nouvelle illustration des **limites de la notion de particule** (vrai aussi avec les quarks...)
 → il faut penser en termes de « champs quantiques » ;
- ▶ le neutrino est peut-être sa **propre anti-particule**...



Conséquences de l'oscillations des neutrinos

- ▶ les neutrinos sont **massifs** (mais de **masses très faibles et inconnues** !);
- ▶ un neutrino de **saveur donnée** n'a **pas une masse donnée** et inversement
 → « **mélanges quantiques** » et nouvelle illustration des **limites de la notion de particule** (vrai aussi avec les quarks...)
 → il faut penser en termes de « champs quantiques » ;
- ▶ le neutrino est peut-être sa **propre anti-particule**...



Questions ouvertes

- ▶ pourquoi **3 générations** de particules ?
- ▶ d'où vient la **violation de la parité** ?
- ▶ où est passée l'**antimatière** ? (lien avec la **cosmologie primordiale**)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → **composants plus fondamentaux** ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ **théorie plus fondamentale** expliquant les valeurs des masses et charges ? (**grande unification** ?)
- ▶ pourquoi **gravitation si faible** à l'échelle des particules ? (**dimensions supplémentaires** ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (**supersymétrie** ?)
- ▶ description **quantique de la gravitation** ?
- ▶ etc.

Questions ouvertes

- ▶ pourquoi 3 générations de particules ?
- ▶ d'où vient la violation de la parité ?
- ▶ où est passée l'antimatière ? (lien avec la cosmologie primordiale)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → composants plus fondamentaux ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ théorie plus fondamentale expliquant les valeurs des masses et charges ? (grande unification ?)
- ▶ pourquoi gravitation si faible à l'échelle des particules ? (dimensions supplémentaires ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (supersymétrie ?)
- ▶ description quantique de la gravitation ?
- ▶ etc.

Questions ouvertes

- ▶ pourquoi **3 générations** de particules ?
- ▶ d'où vient la **violation de la parité** ?
- ▶ où est passée l'**antimatière** ? (lien avec la **cosmologie primordiale**)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → **composants plus fondamentaux** ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ **théorie plus fondamentale** expliquant les valeurs des masses et charges ? (grande unification ?)
- ▶ pourquoi **gravitation si faible** à l'échelle des particules ? (**dimensions supplémentaires** ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (**supersymétrie** ?)
- ▶ description quantique de la gravitation ?
- ▶ etc.

Questions ouvertes

- ▶ pourquoi 3 générations de particules ?
- ▶ d'où vient la violation de la parité ?
- ▶ où est passée l'antimatière ? (lien avec la cosmologie primordiale)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → composants plus fondamentaux ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ théorie plus fondamentale expliquant les valeurs des masses et charges ? (grande unification ?)
- ▶ pourquoi gravitation si faible à l'échelle des particules ? (dimensions supplémentaires ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (supersymétrie ?)
- ▶ description quantique de la gravitation ?
- ▶ etc.

Questions ouvertes

- ▶ pourquoi 3 générations de particules ?
- ▶ d'où vient la violation de la parité ?
- ▶ où est passée l'antimatière ? (lien avec la cosmologie primordiale)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → composants plus fondamentaux ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ théorie plus fondamentale expliquant les valeurs des masses et charges ? (grande unification ?)
- ▶ pourquoi gravitation si faible à l'échelle des particules ? (dimensions supplémentaires ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (supersymétrie ?)
- ▶ description quantique de la gravitation ?
- ▶ etc.

Questions ouvertes

- ▶ pourquoi 3 générations de particules ?
- ▶ d'où vient la violation de la parité ?
- ▶ où est passée l'antimatière ? (lien avec la cosmologie primordiale)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → composants plus fondamentaux ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ théorie plus fondamentale expliquant les valeurs des masses et charges ? (grande unification ?)
- ▶ pourquoi gravitation si faible à l'échelle des particules ? (dimensions supplémentaires ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (supersymétrie ?)
- ▶ description quantique de la gravitation ?
- ▶ etc.

Questions ouvertes

- ▶ pourquoi 3 générations de particules ?
- ▶ d'où vient la violation de la parité ?
- ▶ où est passée l'antimatière ? (lien avec la cosmologie primordiale)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → composants plus fondamentaux ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ théorie plus fondamentale expliquant les valeurs des masses et charges ? (grande unification ?)
- ▶ pourquoi gravitation si faible à l'échelle des particules ? (dimensions supplémentaires ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (supersymétrie ?)
- ▶ description quantique de la gravitation ?
- ▶ etc.

Questions ouvertes

- ▶ pourquoi 3 générations de particules ?
- ▶ d'où vient la violation de la parité ?
- ▶ où est passée l'antimatière ? (lien avec la cosmologie primordiale)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → composants plus fondamentaux ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ théorie plus fondamentale expliquant les valeurs des masses et charges ? (grande unification ?)
- ▶ pourquoi gravitation si faible à l'échelle des particules ? (dimensions supplémentaires ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (supersymétrie ?)
- ▶ description quantique de la gravitation ?
- ▶ etc.

Questions ouvertes

- ▶ pourquoi 3 générations de particules ?
- ▶ d'où vient la violation de la parité ?
- ▶ où est passée l'antimatière ? (lien avec la cosmologie primordiale)
- ▶ relation entre charges électriques des leptons et des quarks → composants plus fondamentaux ? (leptoquarks, supercordes, etc.)
- ▶ théorie plus fondamentale expliquant les valeurs des masses et charges ? (grande unification ?)
- ▶ pourquoi gravitation si faible à l'échelle des particules ? (dimensions supplémentaires ?)
- ▶ matière noire = nouvelles particules ? (supersymétrie ?)
- ▶ description quantique de la gravitation ?
- ▶ etc.

Résumé et conclusion

Évolution des connaissances en physique fondamentale

- ▶ les **atomes** existent mais ils ne sont **pas insécables**
- ▶ la **nature** est bien plus **subtile** qu'elle ne le semble au premier abord (aspect **probabiliste intrinsèque**, **champs quantiques**, **temps relatif**, etc.)
- ▶ intuition quotidienne pratique mais sans « vérité primordiale »
- ▶ **physique moderne va encore plus loin** :
 - notion de particule obsolète
 - remise en cause de « l'existence même » du temps et de l'espace

Pourquoi s'intéresser à la physique des particules ?

- ▶ **comprendre la nature**, notre place dans l'Univers, à **coût raisonnable** (LHC \sim 2 euros par an par habitant des pays participants)
- ▶ profiter de ses **retombées technologiques** : laser et microélectronique issus de la physique quantique, antimatière utilisée au quotidien dans les hôpitaux, techniques d'imagerie implémentées en médecine (chambre à fils de **Charpak**, Nobel 1992), *www* né au CERN, etc.

Quelques références

Livres :

- [Cohen-Tannoudji & Spiro](#), *Particules élémentaires et cosmologie*
- [Damour](#), *Si Einstein m'était conté*
- [Feynman](#), *Lumière et matière, une étrange histoire*
- [Greene](#), *L'Univers élégant*
- [Mouchet](#), *L'étrange subtilité quantique - Quintessence de poussières*
- [Scarani](#), *Initiation à la physique quantique : La matière et ses phénomènes*
- [Stannard & Gamow](#), *Le Nouveau Monde de M. Tompkins*
- [Vannucci](#), *Le vrai roman des particules élémentaires*

Sites web :

- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier509-1.php> : dossier sur la relativité restreinte
- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier510-1.php> : dossier sur la relativité générale
- à chercher (youtube, dailymotion) « ce qu'Einstein ne savait pas encore » : documentaire sur la théorie des cordes (3 parties)