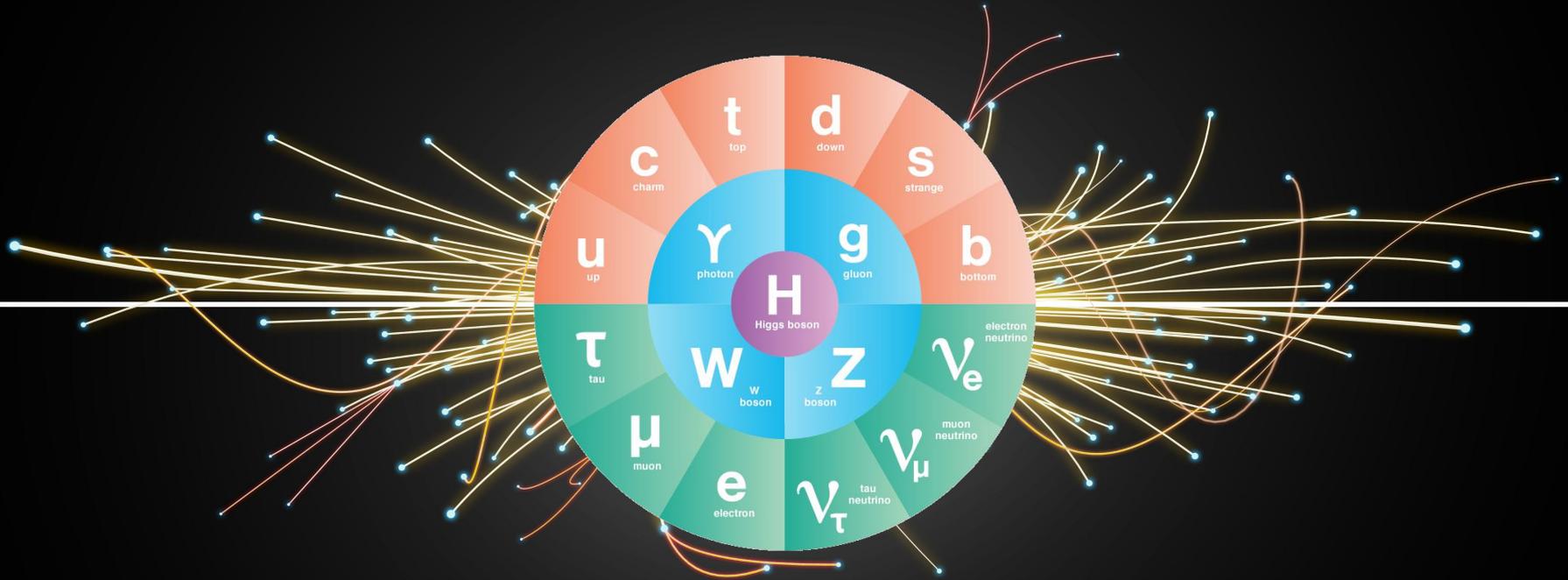
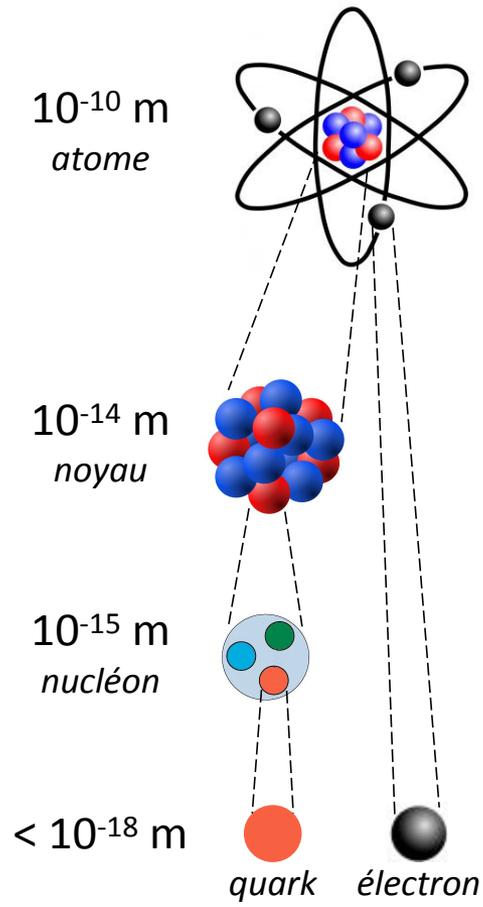
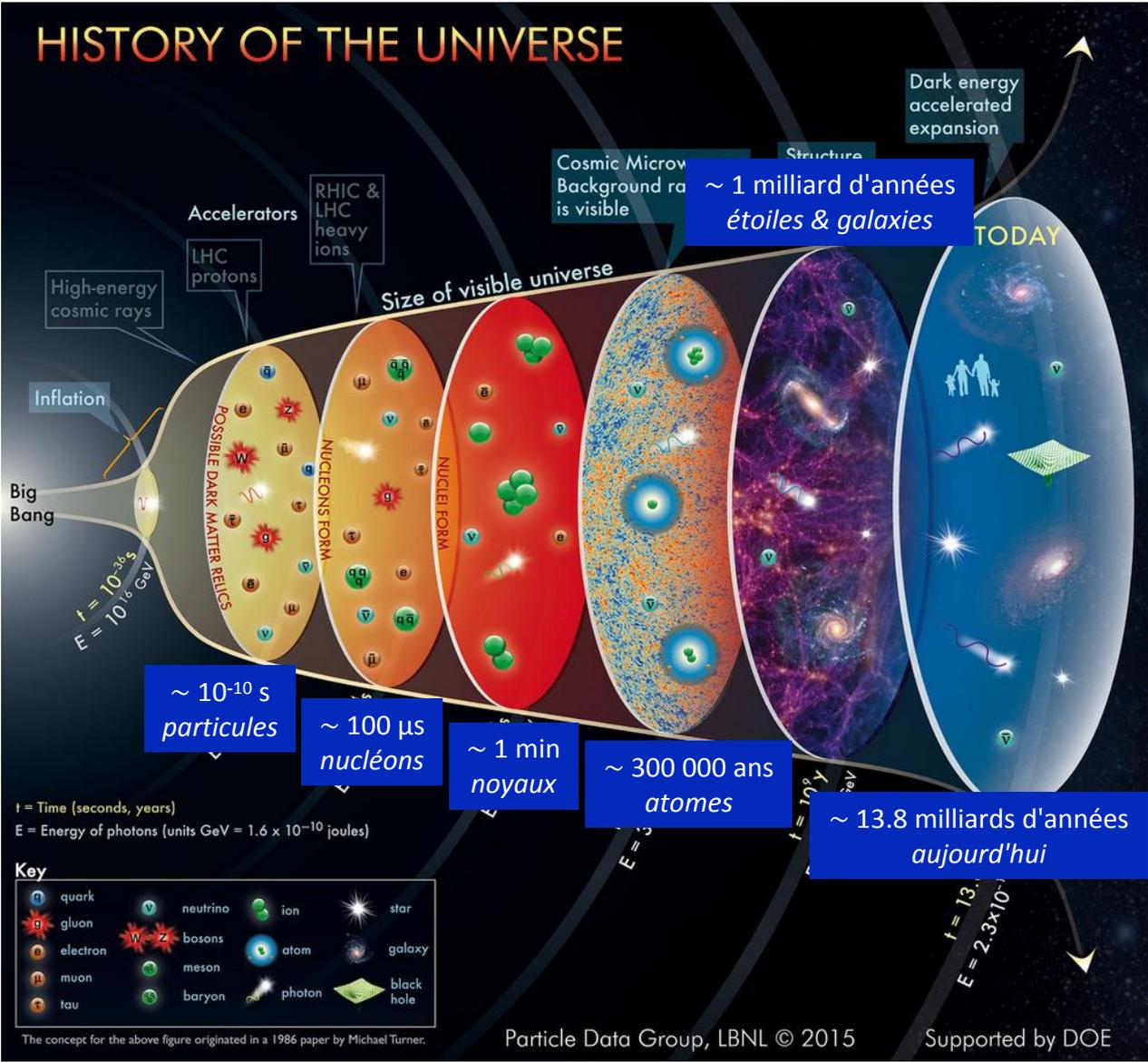


Introduction à la physique des particules

Masterclasses de Belle II, 17/03/2021 - CPPM, Marseille



Échelles de temps et d'espace



Les débuts de la physique des particules

Antiquité grecque (Mochus, Leucippe, Démocrite...)

Notion d'*atome* : l'univers est composé de particules insécables de matière ainsi que de vide.



Démocrite

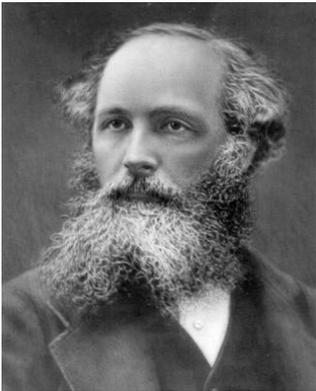
Les débuts de la physique des particules

Antiquité grecque (Mochus, Leucippe, Démocrite...)

Notion d'atome : l'univers est composé de particules insécables de matière ainsi que de vide.



Démocrite



J. C. Maxwell

1865 : naissance de l'*électromagnétisme* suite aux travaux de Maxwell qui décrivent de façon unifiée les phénomènes électriques et magnétiques.

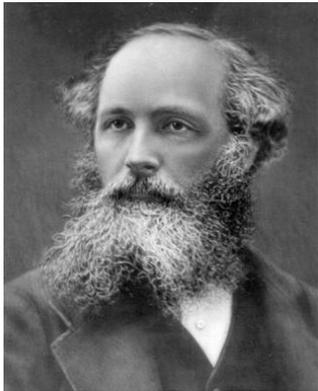
Les débuts de la physique des particules

Antiquité grecque (Mochus, Leucippe, Démocrite...)

Notion d'atome : l'univers est composé de particules insécables de matière ainsi que de vide.



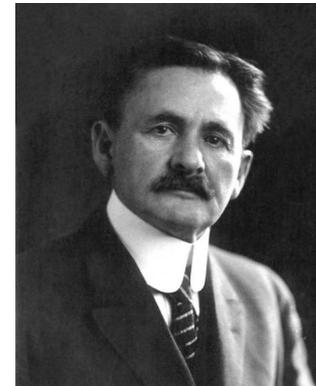
Démocrite



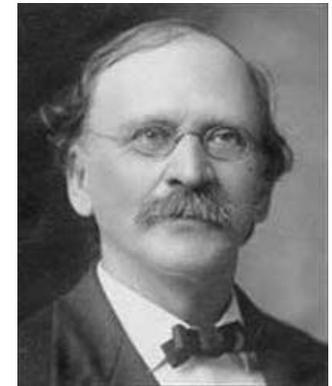
J. C. Maxwell

1865 : naissance de l'*électromagnétisme* suite aux travaux de Maxwell qui décrivent de façon unifiée les phénomènes électriques et magnétiques.

1887 : expérience de Michelson et Morley qui démontre que *la vitesse de la lumière est invariable*.



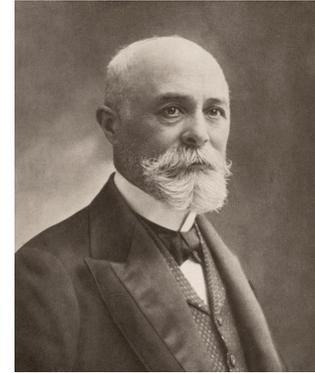
A. A. Michelson



E. W. Morley

Les débuts de la physique des particules

1896-1898 : découverte de la *radioactivité* par Becquerel, du radium et du polonium par les époux Curie.



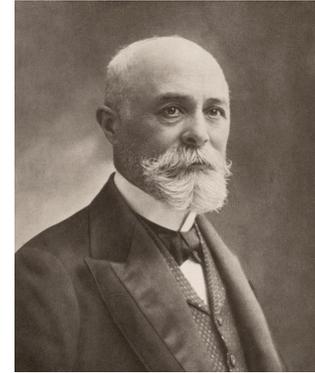
H. Becquerel



M. Curie

Les débuts de la physique des particules

1896-1898 : découverte de la *radioactivité* par Becquerel, du radium et du polonium par les époux Curie.



H. Becquerel



M. Curie



J. J. Thomson

1897 : découverte de l'*électron* par Thomson.

À l'époque, on pouvait penser que les connaissances en sciences physiques étaient complètes, en dehors de l'amélioration des précisions de mesure.

« ... *it seems probable that most of the grand underlying principles have been firmly established ... An eminent physicist remarked that the future truths of physical science are to be looked for in the sixth place of decimals.* » Michelson, 1894

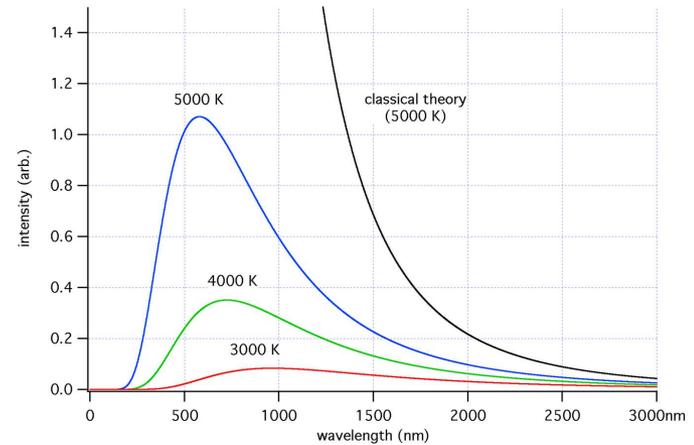
Et pourtant...

Aux origines de la physique quantique

Un certain nombre de phénomènes demeuraient encore inexpliqués :

Catastrophe ultraviolette :

Les modèles décrivant le rayonnement d'un corps noir (loi de Wien et loi de Rayleigh-Jeans) ne correspondent pas aux observations.

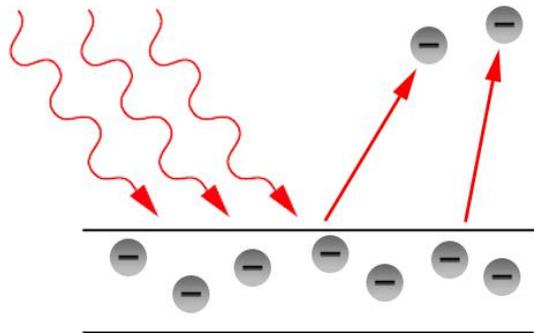
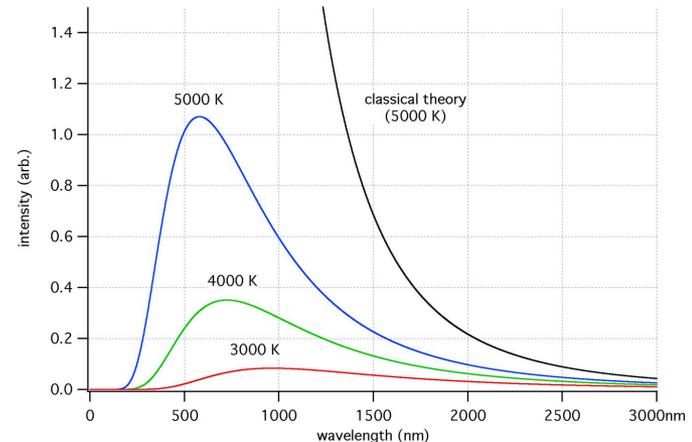


Aux origines de la physique quantique

Un certain nombre de phénomènes demeuraient encore inexpliqués :

Catastrophe ultraviolette :

Les modèles décrivant le rayonnement d'un corps noir (loi de Wien et loi de Rayleigh-Jeans) ne correspondent pas aux observations.



Effet photoélectrique :

On envoie une onde lumineuse sur un matériau pour en éjecter des électrons.

Si la lumière est une onde, on peut simplement augmenter son intensité pour causer l'effet photoélectrique.

On observe pourtant que ce n'est pas le cas, seule la fréquence (ou la longueur d'onde) joue un rôle.

La théorie des quanta

En **1900**, Max Planck fait l'hypothèse que la lumière est émise de manière discrète par un corps noir, et non pas de façon continue.



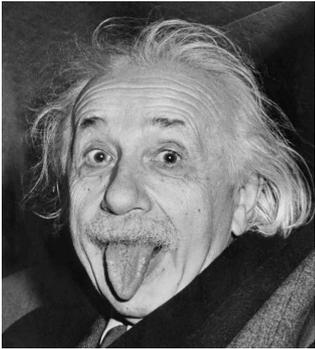
M. Planck

La théorie des quanta

En **1900**, Max Planck fait l'hypothèse que la lumière est émise de manière discrète par un corps noir, et non pas de façon continue.



M. Planck



Tout le monde le connaît

En **1905**, Albert Einstein reprend l'idée de Planck afin d'expliquer l'effet photoélectrique : la lumière est composée de petites quantités d'énergie (*quantum* d'énergie, qui deviendra plus tard le *photon*).

Et la physique quantique fut !

Physique quantique et interactions

La physique quantique permet de décrire trois interactions fondamentales :

Interaction électromagnétique

portée par le **photon** et qui agit sur les particules ayant une charge électrique

Interaction forte

portée par le **gluon** et qui agit sur les quarks

Interaction faible

portée par les particules **Z⁰, W⁺ et W⁻** et qui agit sur les leptons et les quarks

	INTERACTION FAIBLE	INTERACTION FORTE	FORCE ELECTRO-MAGNÉTIQUE
masse →	91.2 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	0
charge →	0	±1	0
spin →	1	1	1
	Z boson Z	g gluon	γ photon

Physique quantique et interactions

La physique quantique permet de décrire trois interactions fondamentales :

Interaction électromagnétique

portée par le **photon** et qui agit sur les particules ayant une charge électrique

Interaction forte

portée par le **gluon** et qui agit sur les quarks

Interaction faible

portée par les particules **Z^0 , W^+ et W^-** et qui agit sur les leptons et les quarks

Il existe une quatrième interaction fondamentale...

Interaction gravitationnelle

peut-être portée par le **graviton** et qui agit sur tout ce qui a une masse

celle-ci résiste encore à toute description quantique

Les leptons

- Le muon a été découvert en 1937, et le tau près de 40 ans plus tard.

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²
charge →	-1	-1	-1
spin →	1/2	1/2	1/2
	e électron	μ muon	τ tau
LEPTONS	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ neutrino tauique

Les leptons

- Le muon a été découvert en 1937, et le tau près de 40 ans plus tard.
- Ils sont tous les deux de charges électriques négatives, comme l'électron.

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²
charge →	-1	-1	-1
spin →	1/2	1/2	1/2
	e électron	μ muon	τ tau
LEPTONS	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ neutrino tauique

Les leptons

- Le muon a été découvert en 1937, et le tau près de 40 ans plus tard.
- Ils sont tous les deux de charges électriques négatives, comme l'électron.
- Les neutrinos sont des particules sans charge électrique et très peu massives. Il en existe un pour chaque **saveur** (électronique, muonique, tauique).

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²
charge →	-1	-1	-1
spin →	1/2	1/2	1/2
	e électron	μ muon	τ tau
LEPTONS	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ neutrino tauique

Les leptons

- Le muon a été découvert en 1937, et le tau près de 40 ans plus tard.
- Ils sont tous les deux de charges électriques négatives, comme l'électron.
- Les neutrinos sont des particules sans charge électrique et très peu massives. Il en existe un pour chaque **saveur** (électronique, muonique, tauique).
- Le muon et le tau sont beaucoup plus lourds que l'électron : ils sont instables et ont tendance à se désintégrer vers les saveurs plus légères.

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²
charge →	-1	-1	-1
spin →	1/2	1/2	1/2
	e électron	μ muon	τ tau
LEPTONS	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ neutrino tauique

Les leptons

- Le muon a été découvert en 1937, et le tau près de 40 ans plus tard.
- Ils sont tous les deux de charges électriques négatives, comme l'électron.
- Les neutrinos sont des particules sans charge électrique et très peu massives. Il en existe un pour chaque **saveur** (électronique, muonique, tauique).
- Le muon et le tau sont beaucoup plus lourds que l'électron : ils sont instables et ont tendance à se désintégrer vers les saveurs plus légères.
- Chaque lepton a aussi son antiparticule, de charge électrique opposée (même les neutrinos, bien qu'ils n'aient pas de charge !).

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²
charge →	-1	-1	-1
spin →	1/2	1/2	1/2
	e électron	μ muon	τ tau
LEPTONS	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²
	0	0	0
	1/2	1/2	1/2
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique

Les quarks

- Les premiers quarks (up, down et strange) furent découverts en 1968, le dernier (top) en 1995.

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	u up	c charm	t top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	d down	s strange	b bottom

QUARKS

Les quarks

- Les premiers quarks (up, down et strange) furent découverts en 1968, le dernier (top) en 1995.
- Chaque quark est toujours lié à un ou plusieurs autres par l'interaction forte, formant des **hadrons**.

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom

QUARKS

Les quarks

- Les premiers quarks (up, down et strange) furent découverts en 1968, le dernier (top) en 1995.
- Chaque quark est toujours lié à un ou plusieurs autres par l'interaction forte, formant des **hadrons**.
- L'interaction forte permet aussi la cohésion des protons et des neutrons dans les atomes.

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom

QUARKS

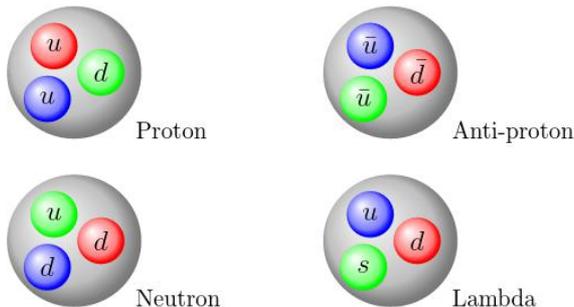
Les quarks

- Les premiers quarks (up, down et strange) furent découverts en 1968, le dernier (top) en 1995.
- Chaque quark est toujours lié à un ou plusieurs autres par l'interaction forte, formant des **hadrons**.
- L'interaction forte permet aussi la cohésion des protons et des neutrons dans les atomes.
- Au sein d'un hadron, chaque quark a une **couleur** (rouge, vert ou bleu pour les quarks ; anti-rouge, anti-vert ou anti-bleu pour les antiquarks) de sorte que le hadron soit blanc.

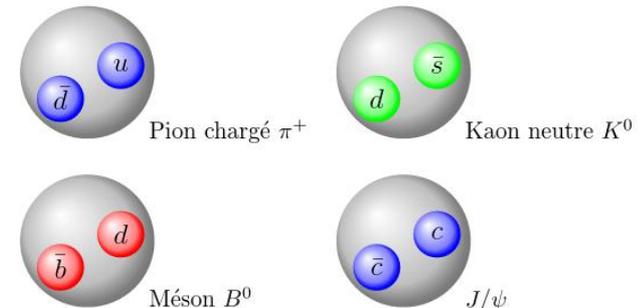
	1ÈRE GÉNÉRATION	2ÈME GÉNÉRATION	3ÈME GÉNÉRATION
masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2

QUARKS

Baryons (3 quarks)

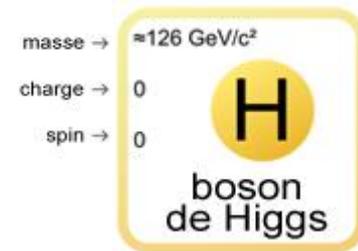


Mésons (2 quarks)



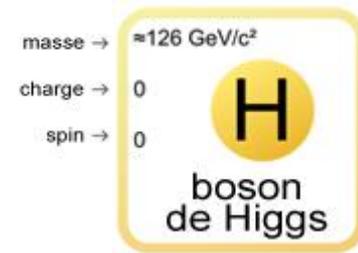
Boson de Higgs

- Le boson de Higgs est la dernière particule élémentaire à avoir été découverte, en 2012 au CERN.



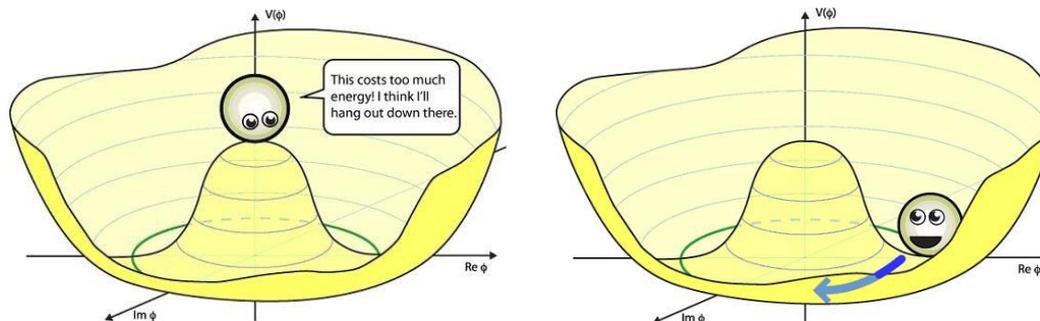
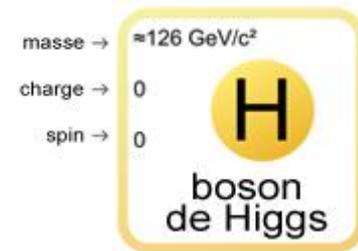
Boson de Higgs

- Le boson de Higgs est la dernière particule élémentaire à avoir été découverte, en 2012 au CERN.
- C'est une manifestation du **champ de Higgs**, qui donne leur masse aux particules élémentaires.



Boson de Higgs

- Le boson de Higgs est la dernière particule élémentaire à avoir été découverte, en 2012 au CERN.
- C'est une manifestation du **champ de Higgs**, qui donne leur masse aux particules élémentaires.
- Le champ de Higgs baigne tout l'espace et est associé à une **énergie potentielle** :
 - Si le champ a une valeur nulle, on se trouve au sommet de la colline, une position très fragile.
 - Le champ de Higgs finit par prendre une valeur non nulle, afin que l'énergie potentielle se trouve dans la vallée, une position stable.
 - Les particules interagissent avec ce champ qui, du fait de sa valeur non nulle, leur donne une masse.



Le modèle standard au complet

Les particules

	1ÈRE GÉNÉRATION	2ÈME GÉNÉRATION	3ÈME GÉNÉRATION		
masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
QUARKS	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²		
-1	-1	-1	0		
1/2	1/2	1/2	1		
	e électron	μ muon	τ tau	Z boson Z	
LEPTONS	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	W[±] bosons W [±]	
					BOSONS DE JAUGE

La formule compliquée

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\mu^a g_\mu^b g_\mu^c - \frac{1}{4}g^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\mu^c g_\mu^d g_\mu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- \\
 & - M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{i}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 Z_\nu^0 - \frac{1}{2c_w} M^2 Z_\mu^0 Z_\nu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{c_w} (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- \\
 & - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\nu^+)) - \\
 & ig_{s_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_\nu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- \\
 & - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- \\
 & - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + 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^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & g \alpha_h M (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) - \\
 & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\partial_\nu \phi^0 \phi^- - \phi^- \partial_\nu \phi^0) - W_\mu^- (\partial_\nu \phi^0 \phi^+ - \phi^+ \partial_\nu \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) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\nu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\nu \phi^- + W_\mu^- \partial_\nu \phi^+) - ig \frac{2M}{c_w} Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig_{s_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^+) + ig_{s_w} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\nu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{2s_w}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{2s_w}{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{2s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\nu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^c \gamma^\mu q_j^c) g_\mu^a - e^3 (\gamma \partial + m_e^2) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^2) \nu^\lambda - \bar{u}_j^2 (\gamma \partial + \\
 & m_u^2) u_j^2 - \bar{d}_j^2 (\gamma \partial + m_d^2) d_j^2 + ig_{s_w} A_\mu (-e^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^2 \gamma^\mu u_j^2) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^2 \gamma^\mu d_j^2)) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (e^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^2 \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^2) + \\
 & (\bar{u}_j^2 \gamma^\mu (1 - \frac{2}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^2) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda e} e^\lambda) + (\bar{u}_j^2 \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda e} d_j^2)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((e^\lambda U^{lep}{}_{\lambda \nu} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^2 C_{\lambda \nu}^t \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^2)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^c (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda e} (1 - \gamma^5) e^\lambda) + m_\nu^c (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda \nu} (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & \frac{m_\nu^2}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^c (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda \nu} (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) - m_\nu^c (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda e} (1 - \gamma^5) \nu^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda \kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda \kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_u^c (\bar{u}_j^2 C_{\lambda e} (1 - \gamma^5) d_j^2) + m_\nu^c (\bar{u}_j^2 C_{\lambda \nu} (1 + \gamma^5) d_j^2) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^c (\bar{d}_j^2 C_{\lambda \nu}^t (1 + \gamma^5) u_j^2) - m_\nu^c (\bar{d}_j^2 C_{\lambda e}^t (1 - \gamma^5) u_j^2) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{u}_j^2 u_j^2) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\nu^2}{M} H (\bar{d}_j^2 d_j^2) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^2 \gamma^5 u_j^2) - \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^2}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^2 \gamma^5 d_j^2) + \bar{C}^a \partial^2 C^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{C}^a G^b g_\mu^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- + \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig_{s_w} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- + \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^- - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

À ce jour, le modèle donnant la meilleure description des particules élémentaires !

Les problèmes non résolus

Le modèle standard ne permet pas de répondre à toutes les questions qu'on se pose :

- ***Pourquoi n'y a-t-il plus d'antimatière dans l'univers ?***

On estime que, peu après le Big Bang, il y avait autant de matière que d'antimatière. Le modèle standard n'explique pas entièrement pourquoi l'antimatière a quasiment disparu.

- ***Quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie sombre ?***

L'énergie de l'univers est composée à 95 % d'énergie sombre et de matière noire, pourtant leur existence n'est pas prédite par le modèle standard.

- ***Pourquoi les neutrinos ont-ils une masse ?***

Les neutrinos n'interagissent pas avec le champ de Higgs et devraient donc être sans masse.

- ***Comment décrire la gravitation dans le cadre du modèle standard ?***

Toutes les tentatives de donner une description quantique de la gravitation ont échoué jusqu'ici.

et beaucoup d'autres encore...

Une nouvelle physique ?

Des théories d'une nouvelle physique, ou *physique au-delà du modèle standard*, pourraient potentiellement résoudre ces problèmes, par exemple :

- ***Supersymétrie*** : masse stable du boson de Higgs, matière noire...
- ***Gravitation quantique à boucles*** : description quantique de la gravitation.
- ***Théorie des cordes*** : unification des quatre interactions.

L'objectif sur le long terme serait d'atteindre une *théorie du tout*, décrivant de façon unifiée les interactions fondamentales, mais encore très hypothétique.

Seules les expériences peuvent vérifier ou infirmer ces théories, notamment en physique des particules les expériences du CERN ou encore Belle II. À ce jour, aucune de ces théories n'est confirmée ; la recherche continue...