

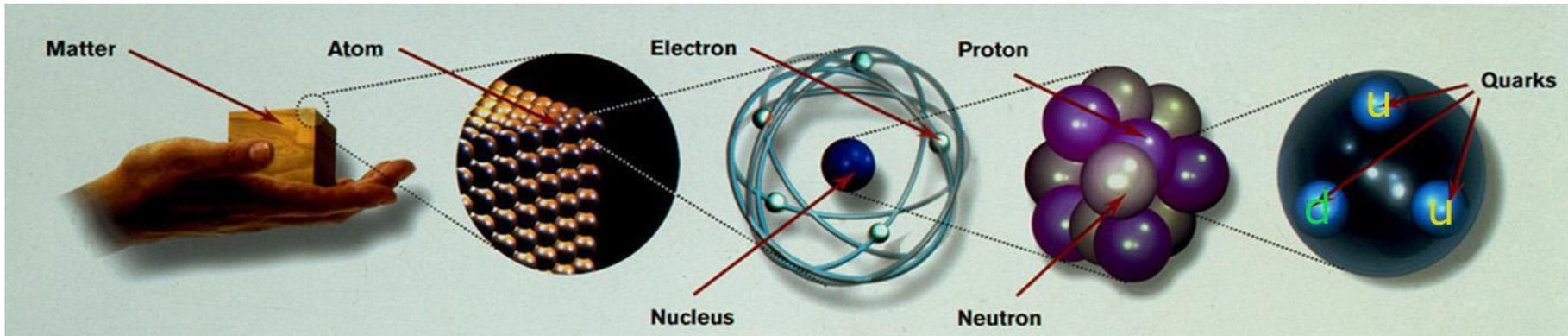
La physique de l'infiniment petit

Justine Serrano
**Centre de Physique des Particules
de Marseille**

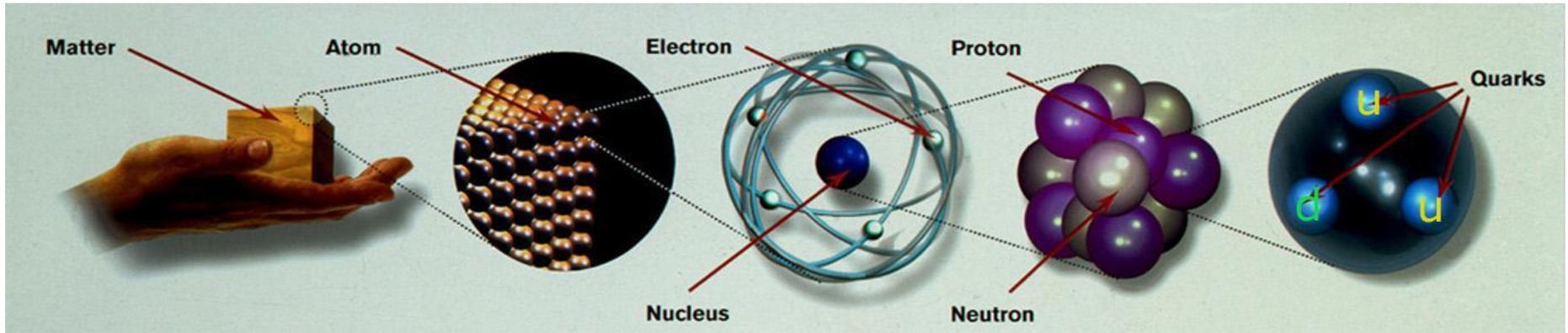
28 avril 2022



Les particules élémentaires



Les particules élémentaires

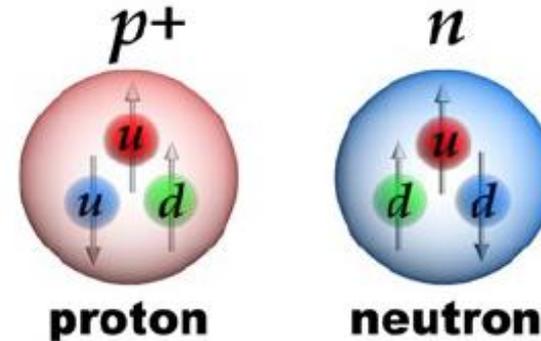


- Les quarks sont les plus petites particules que l'on connaisse à ce jour (les plus 'élémentaires')
- Leur existence a été confirmée en 1968
- Les quarks ne sont jamais seuls, ils s'assemblent en général par 2 ou par 3
- Ils ont une charge électrique fractionnaire $+2/3$ or $-1/3$

Les particules élémentaires

- Toute la matière qui nous entoure est faite de ça:

masse →	≈2.3 MeV/c ²
	charge → 2/3
spin → 1/2	1/2
QUARKS	≈4.8 MeV/c ²
	-1/3
	1/2
	0.511 MeV/c ²
	-1
	1/2
LEPTONS	<2.2 eV/c ²
	0
	1/2



Les particules élémentaires

- Mais ce n'est pas la fin de l'histoire...

	1ÈRE GÉNÉRATION	2ÈME GÉNÉRATION
masse →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$
	u up	c charm
	d down	s strange
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$
	e électron	μ muon
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique

Les particules élémentaires

- Mais ce n'est pas la fin de l'histoire...

	1ÈRE GÉNÉRATION	2ÈME GÉNÉRATION	3ÈME 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
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom Ou beau
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e électron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e neutrino électronique	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ neutrino muonique	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ neutrino tauique

Et l'histoire continue...

Matière

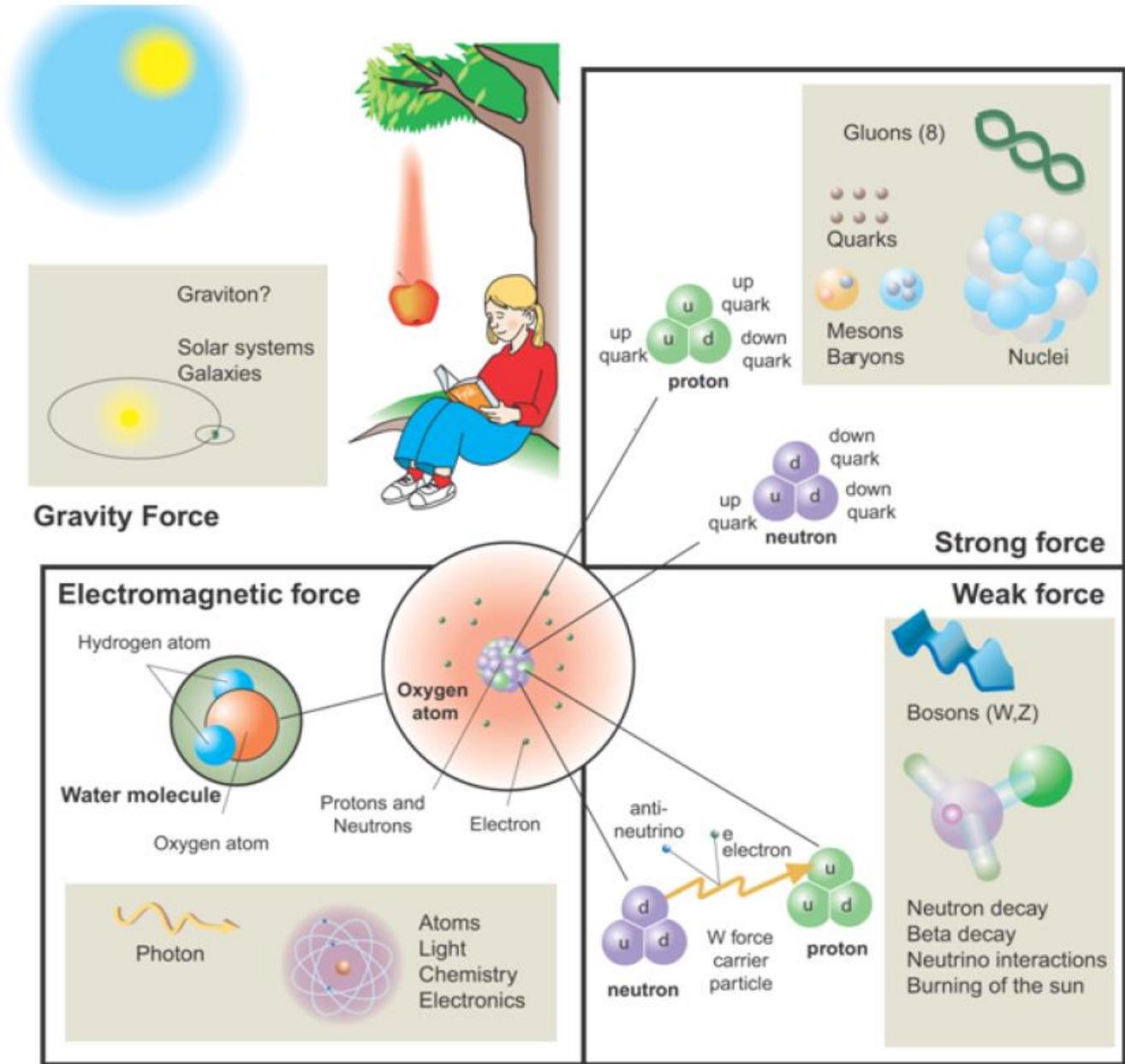
	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
QUARKS	 up	 charm	 top
	 down	 strange	 bottom
	 électron	 muon	 tau
LEPTONS	 neutrino électronique	 neutrino muonique	 neutrino tauique
	 neutrino électronique	 neutrino muonique	 neutrino tauique
	 neutrino électronique	 neutrino muonique	 neutrino tauique

Antimatière

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} 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
anti-QUARKS	 anti-up	 anti-charm	 anti-top
	 anti-down	 anti-strange	 anti-bottom
	 anti-électron	 anti-muon	 anti-tau
anti-LEPTONS	 anti-neutrino électronique	 anti-neutrino muonique	 anti-neutrino tauique
	 anti-neutrino électronique	 anti-neutrino muonique	 anti-neutrino tauique
	 anti-neutrino électronique	 anti-neutrino muonique	 anti-neutrino tauique

Les 4 interactions fondamentales

Les 4 interactions fondamentales



Le Modèle Standard

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} 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	BOSONS DE JAUGE
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 [±]	



Dernière pièce du puzzle, découverte en 2012



+ anti-particules

Le Modèle Standard

Le modèle standard a été largement testé expérimentalement et peut expliquer le comportement des particules avec une grande précision

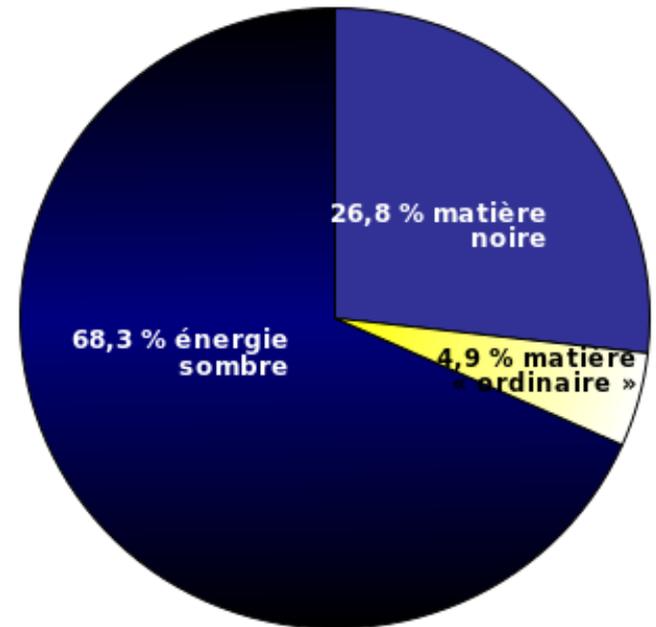
Le Modèle Standard

Le modèle standard a été largement testé expérimentalement et peut expliquer le comportement des particules avec une grande précision

Mais....

Il ne répond pas **aux grandes questions de l'Univers**:

- Qu'est ce que la matière noire et l'énergie noire ?
- Pourquoi est-on constitué de matière et pas d'antimatière ?
- Pourquoi y a-t-il 3 générations ?
- Comment unifier les interactions fondamentales ?



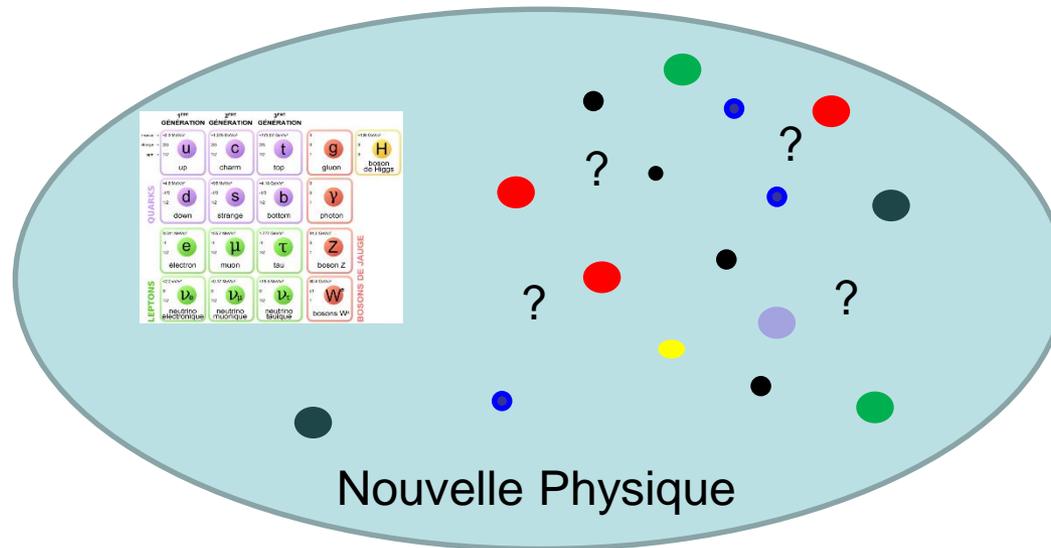
La Nouvelle Physique

- Les physiciens pensent que le Modèle Standard n'est pas la théorie ultime et qu'il existe une 'Nouvelle Physique'



La Nouvelle Physique

- Les physiciens pensent que le Modèle Standard n'est pas la théorie ultime et qu'il existe une 'Nouvelle Physique'



Comment trouver la nouvelle physique?

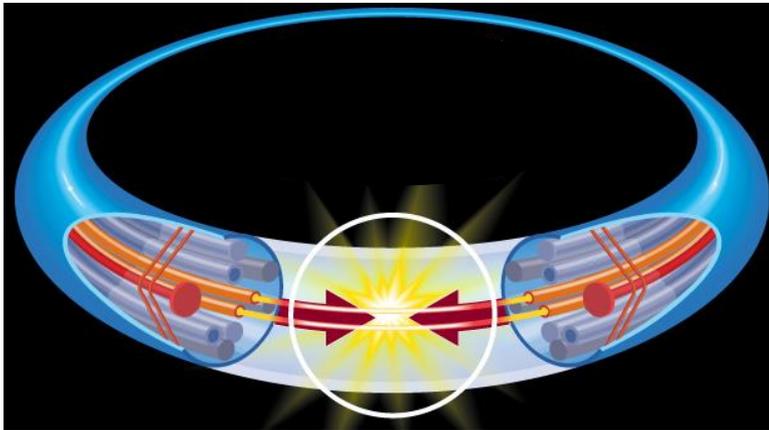
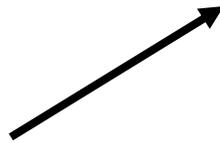
- Première méthode: la frontière en énergie

$$E=mc^2$$

Comment trouver la nouvelle physique?

- Première méthode: la frontière en énergie

$$E=mc^2$$

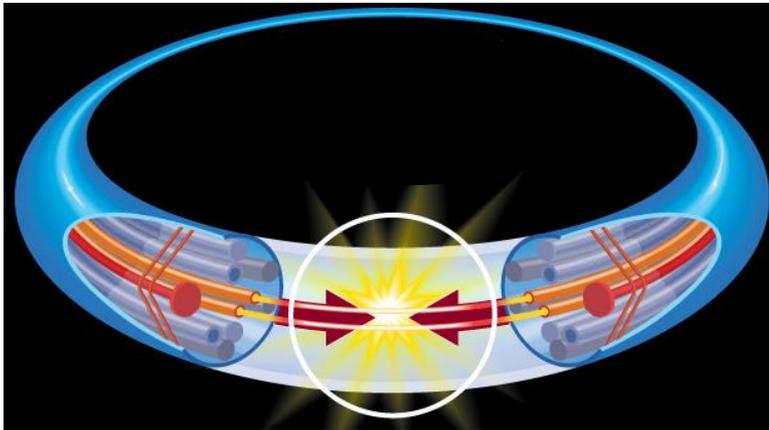


Accélérateur de particules

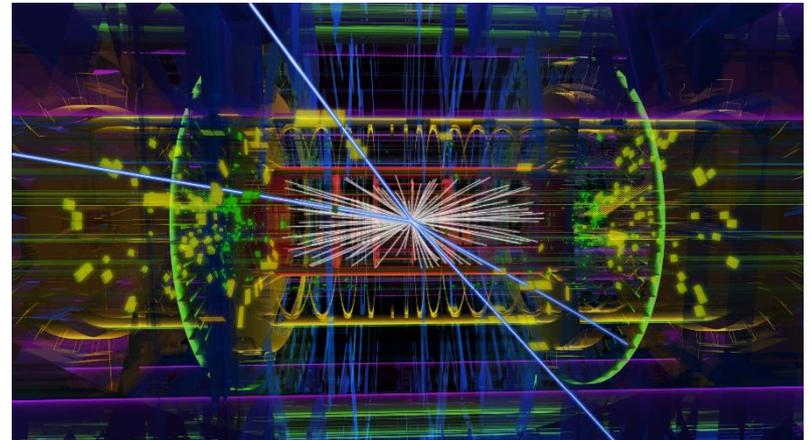
Comment trouver la nouvelle physique?

- Première méthode: la frontière en énergie

$$E=mc^2$$



Accélérateur de particules



Nouvelles particules

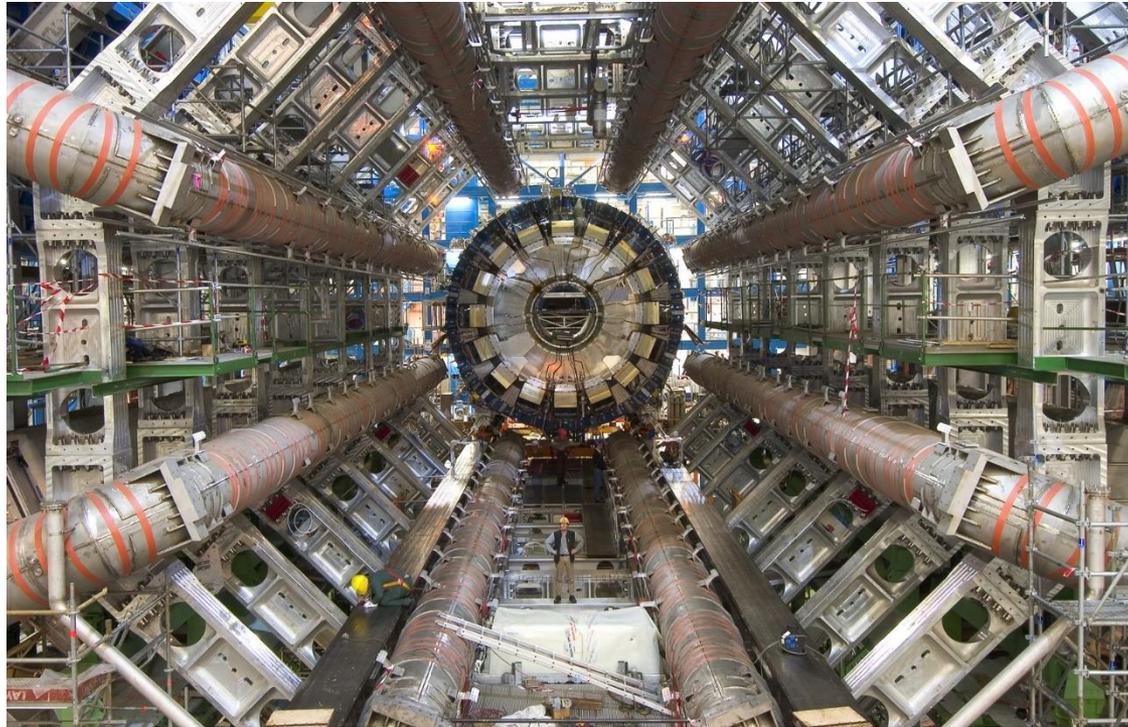
Il faut assez d'énergie pour créer ces nouvelles particules!

Comment trouver la nouvelle physique?

- Première méthode: la frontière en énergie

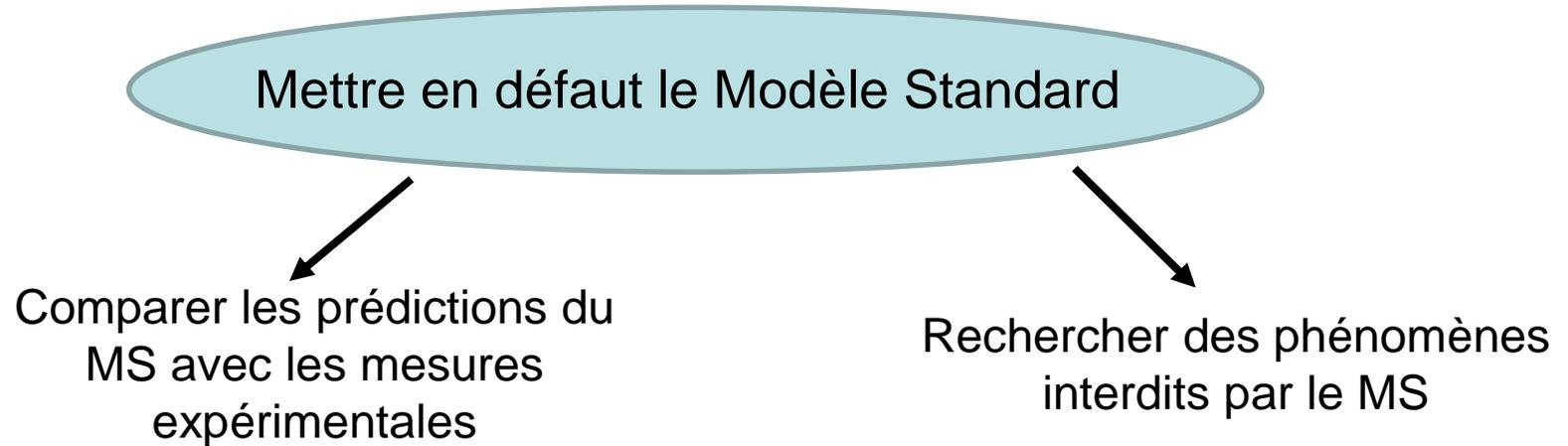
$$E=mc^2$$

C'est ce que font ATLAS et CMS au LHC (Genève)



Comment trouver la nouvelle physique?

- Deuxième méthode : la frontière en **intensité**



Comment trouver la nouvelle physique?

- Deuxième méthode : la frontière en **intensité**

Mettre en défaut le Modèle Standard

Comparer les prédictions du MS avec les mesures expérimentales

Besoin d'une grande **précision!**



Erreurs théoriques et expérimentales



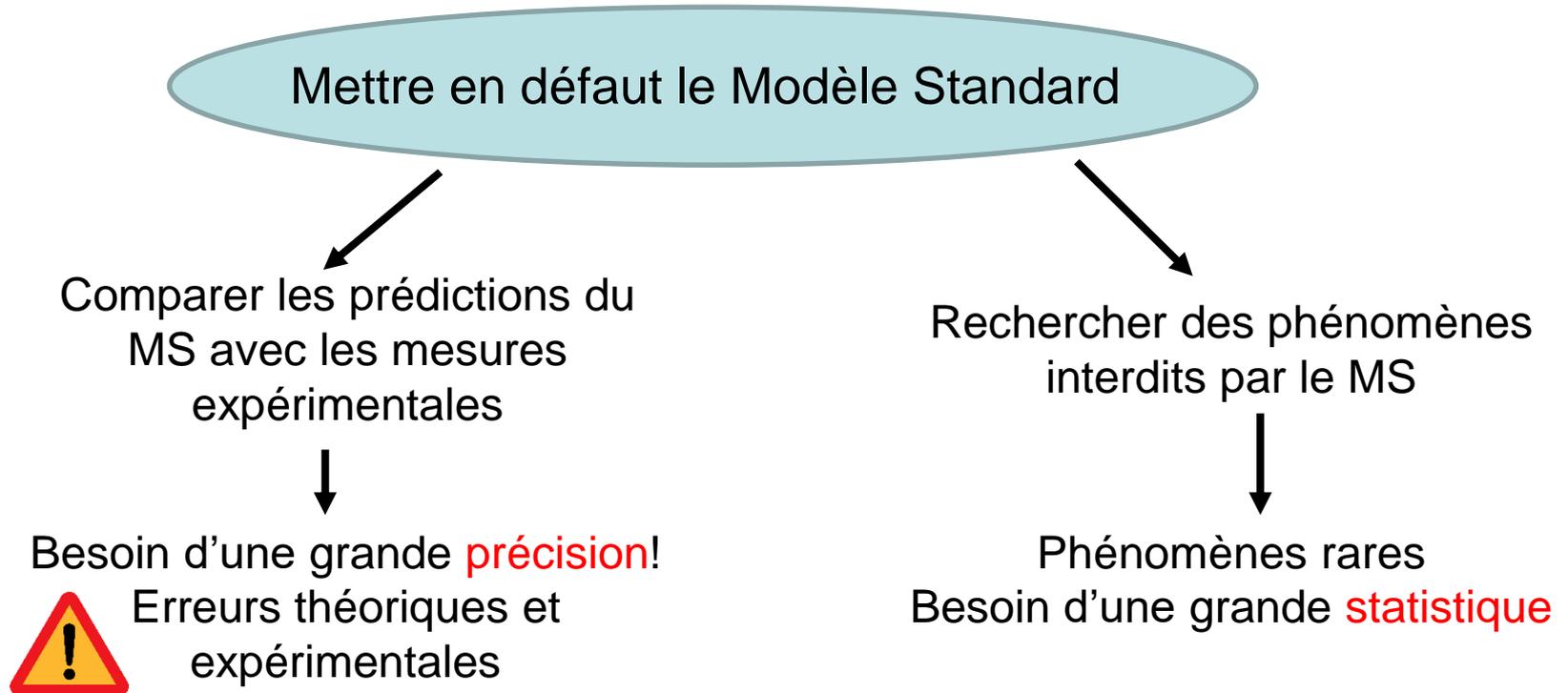
Rechercher des phénomènes interdits par le MS

Phénomènes rares
Besoin d'une grande **statistique**



Comment trouver la nouvelle physique?

- Deuxième méthode : la frontière en **intensité**



Mais pas besoin d'une grande énergie 😊

La frontière en intensité

- On veut étudier le comportement de particules connues avec une très grande précision, il faut donc en produire beaucoup!

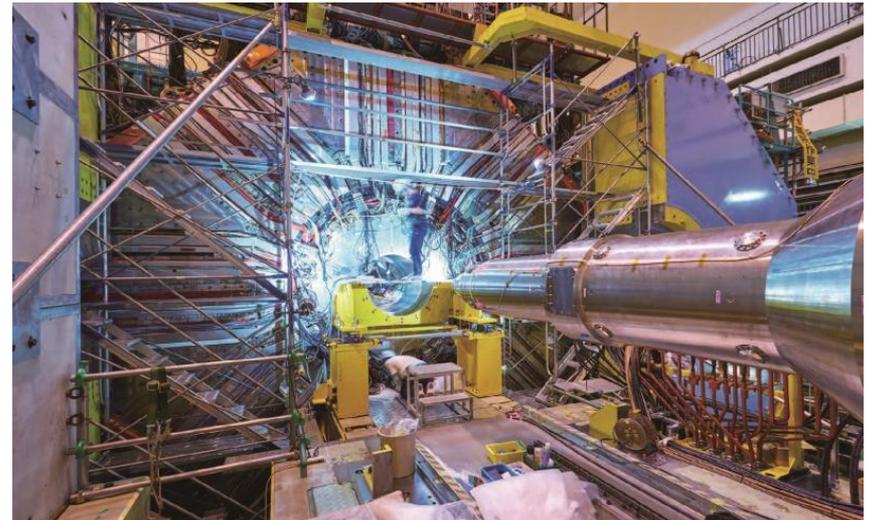


Il faut des accélérateurs de particules très **intenses**

Le LHC à Genève



SuperKEKB au Japon



La frontière en intensité

- On veut étudier le comportement de particules connues avec une très grande précision, il faut donc en produire beaucoup!



Il faut des accélérateurs de particules très **intenses**
Et des instruments très **précis** pour faire les mesures

LHCb au LHC



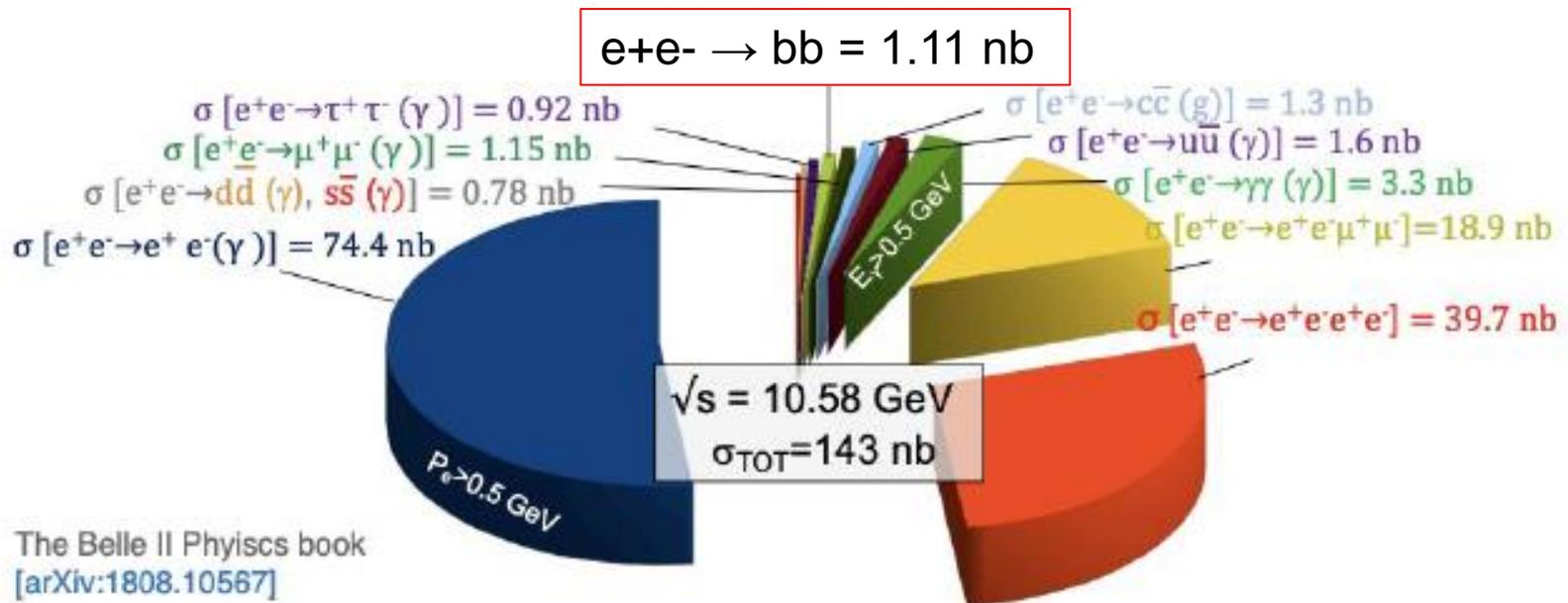
Belle II à SuperKEKB



Belle II

$e^+ \longrightarrow \longleftarrow e^-$

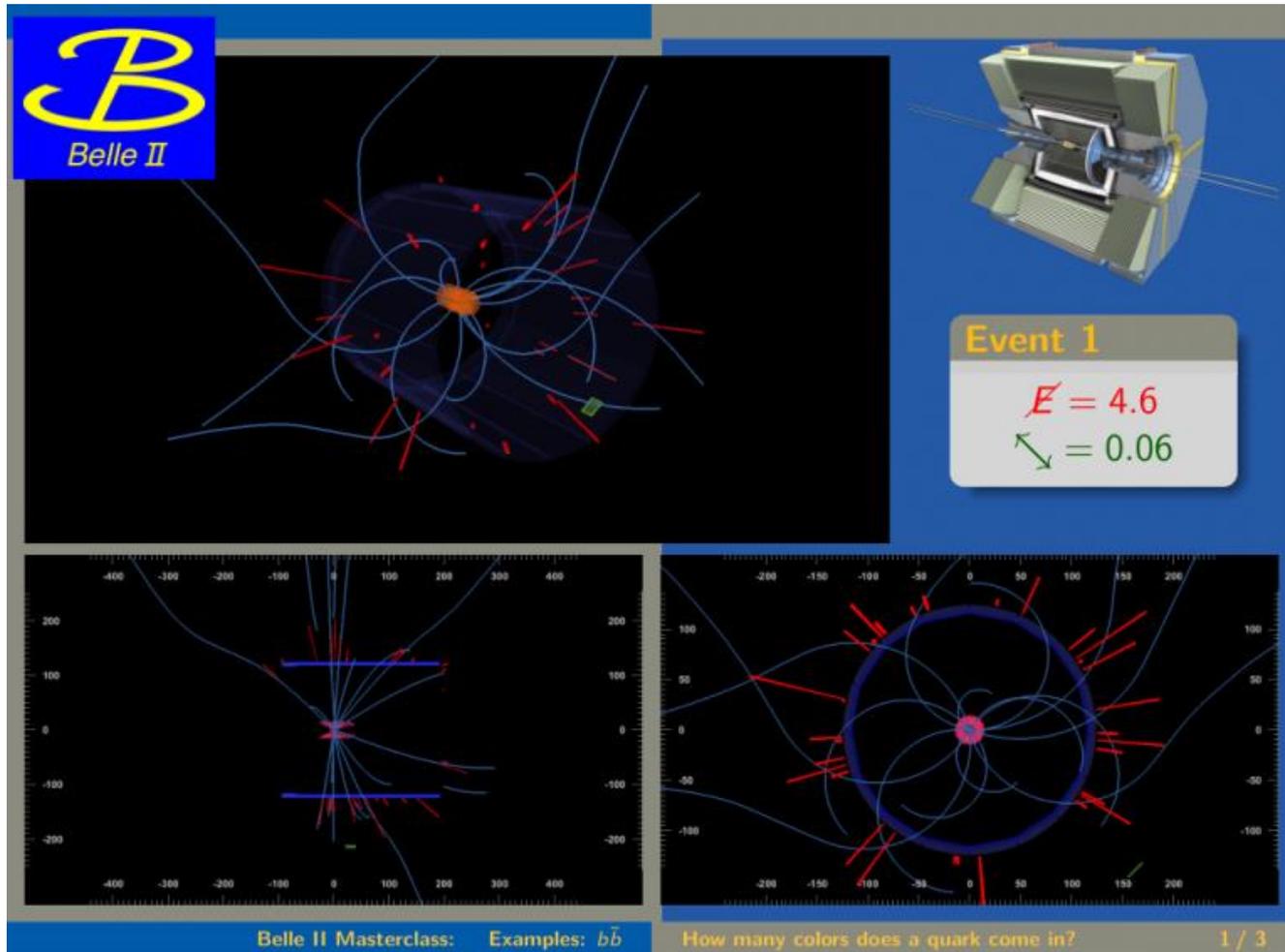
On fait toujours les memes collisions...mais il en sort des choses différentes!
Ca depend de l'énergie des particules, à Belle II : 10.58 GeV



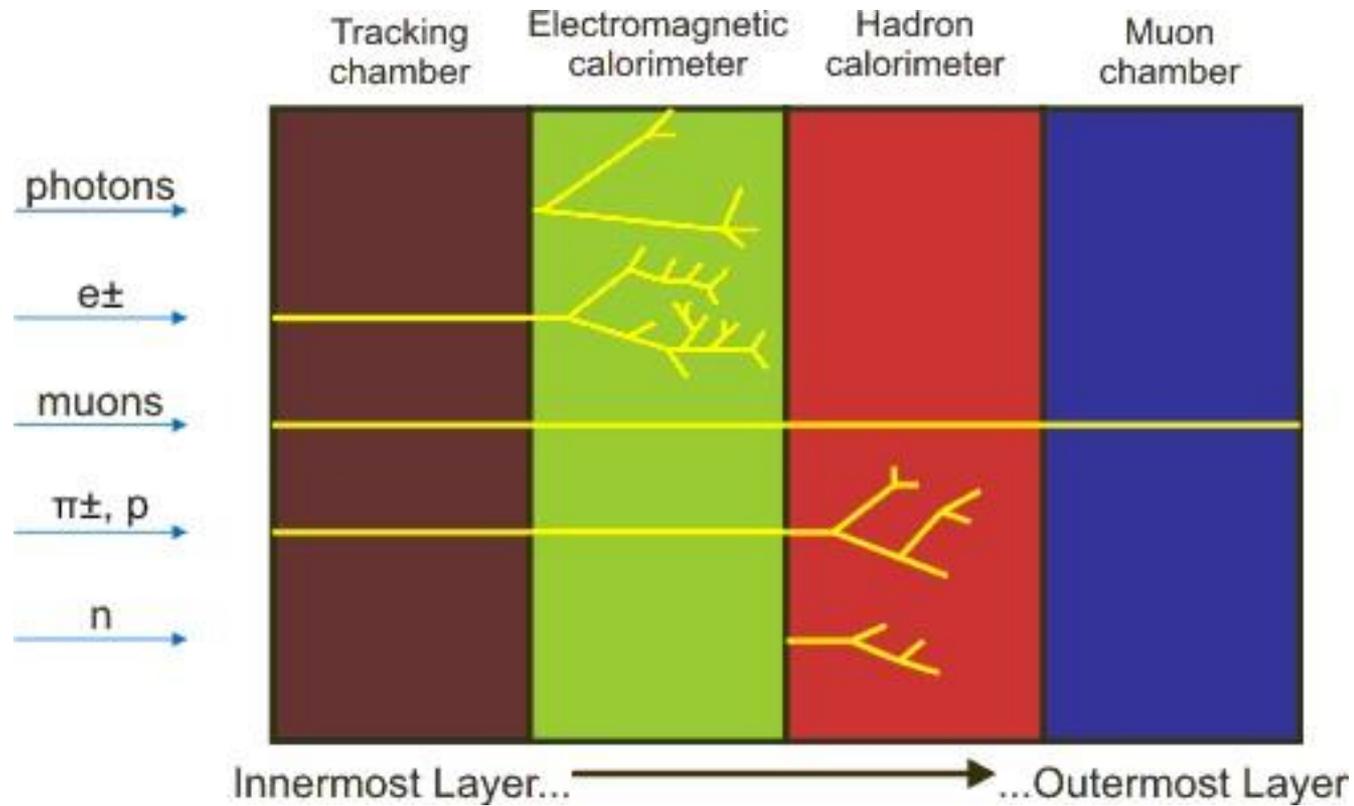
10.58 GeV: l'énergie permettant de créer le plus de quarks b possible

Belle II

$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ (quarks lourds)

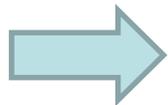


Un détecteur ordonné



Est ce qu'on a trouvé la Nouvelle Physique ?

- Il y a des mesures qui montrent des tensions avec les prédictions du Modèle Standard
- Aucune n'atteint la barre des 5σ , correspondant à une découverte!



La réponse est non!

- Mais on pourrait être en train de voir les premiers indices....



Où se cache la Nouvelle Physique ?

Un exemple de recherche:

Le Modèle Standard ne fait pas de différence entre les leptons de différentes générations. Donc les probabilités d'observer $B \rightarrow K\mu\mu$, $B \rightarrow Kee$ et $B \rightarrow K\tau\tau$ doivent être les mêmes.

$$R_K = \frac{\Gamma(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\Gamma(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}$$

Mais ce n'est pas le cas!

