



# Physique des particules

2024 African School of Physics  
High School Teachers

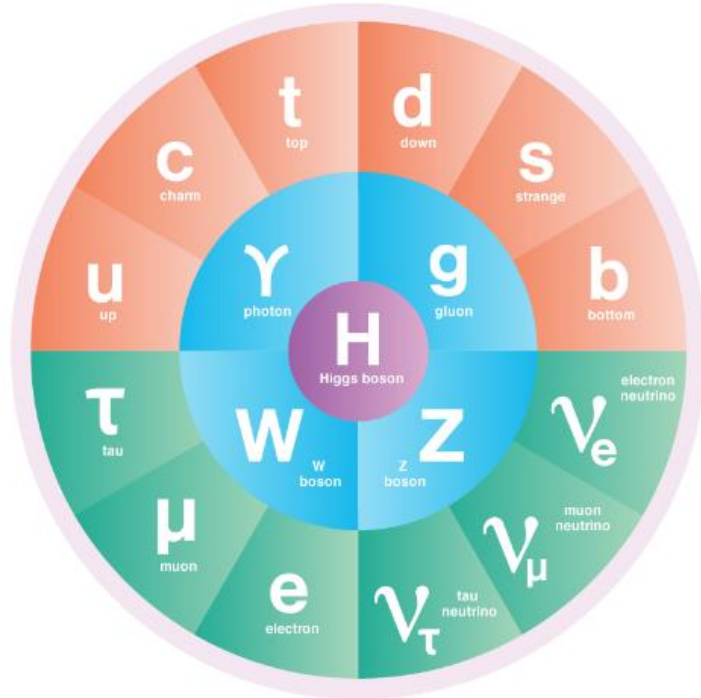


Janna Vischer, University of Erlangen  
Kenneth Cecire, University of Notre Dame





# Plus fundamental...

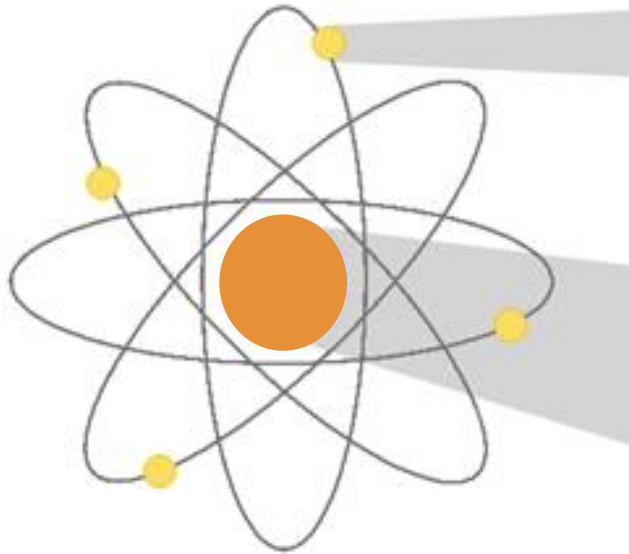


● QUARKS   
 ● LEPTONS   
 ● BOSONS   
 ● HIGGS BOSON

	mass →	charge →	spin →																								
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	<b>u</b>	up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	<b>c</b>	charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	<b>t</b>	top	0	0	1	<b>g</b>	gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	0	0	<b>H</b>	Higgs boson	
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	<b>d</b>	down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	<b>s</b>	strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	<b>b</b>	bottom	0	0	1	<b>γ</b>	photon							
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	<b>e</b>	electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	<b>μ</b>	muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	<b>τ</b>	tau	0	0	1	<b>Z</b>	Z boson	$91.2 \text{ GeV}/c^2$						
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	<b>ν<sub>e</sub></b>	electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	<b>ν<sub>μ</sub></b>	muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	<b>ν<sub>τ</sub></b>	tau neutrino				<b>W</b>	W boson	$80.4 \text{ GeV}/c^2$						
LEPTONS																											

GAUGE BOSONS


# De quoi est fait le monde?



Atom  
(Noyau de l'atome et  
nuage électronique)


C'est tout !?

**ELEKTRON**




$m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$   
 $q = -1$

**UP-QUARKS**



$m = 2 \text{ MeV}$   
 $q = +\frac{2}{3}$

**DOWN-QUARKS**

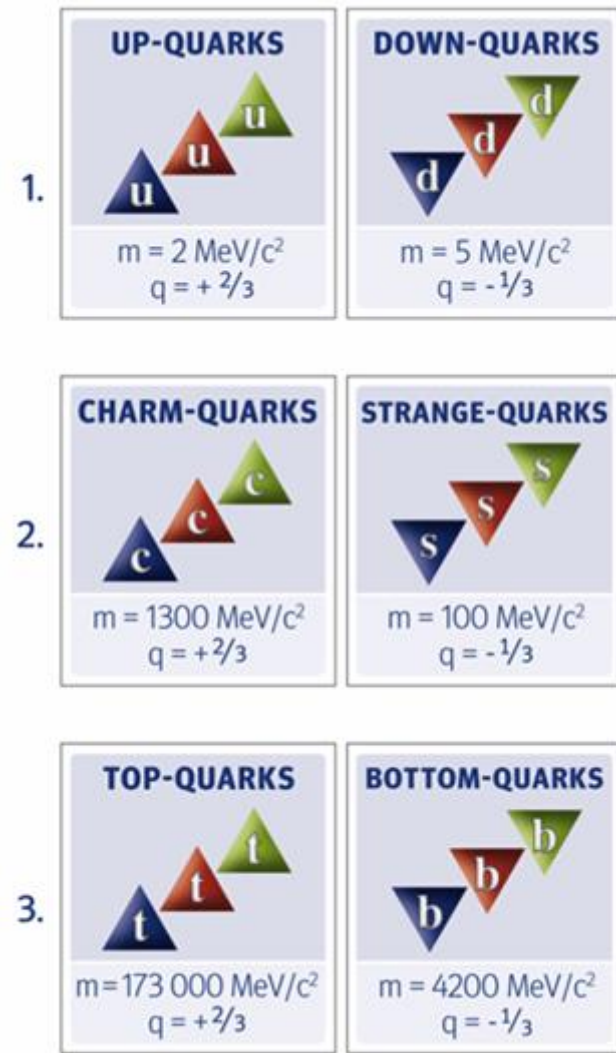


$m = 5 \text{ MeV}/c^2$   
 $q = -\frac{1}{3}$

**NON!**

# Quarks

- Charge électrique :  $+2/3$  ou  $-1/3$
- Les quarks n'existent pas individuellement!
- Les quarks portent une charge forte
- Ils ont une charge faible de  $+1/2$  ou  $-1/2$
- Ils forment des **hadrons** qui ont au total une charge **électrique entière** et une **charge forte "blanche"**.



# Hadrons

Charge électric de Proton:

$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$

$$u + u + d$$

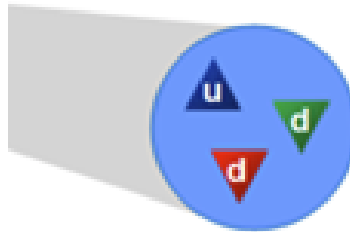
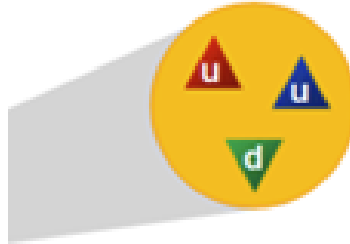
Charge électric de Neutron:

$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

$$u + d + d$$

blue + red + green = neutral

**Proton**  
(2 Up-Quarks +  
1 Down-Quark)



**Neutron**  
(1 Up-Quark +  
2 Down-Quarks)

<p>1.</p> <p><b>UP-QUARKS</b></p> <p><math>m = 2 \text{ MeV}/c^2</math> <math>q = +\frac{2}{3}</math></p>	<p><b>DOWN-QUARKS</b></p> <p><math>m = 5 \text{ MeV}/c^2</math> <math>q = -\frac{1}{3}</math></p>
<p>2.</p> <p><b>CHARM-QUARKS</b></p> <p><math>m = 1300 \text{ MeV}/c^2</math> <math>q = +\frac{2}{3}</math></p>	<p><b>STRANGE-QUARKS</b></p> <p><math>m = 100 \text{ MeV}/c^2</math> <math>q = -\frac{1}{3}</math></p>
<p>3.</p> <p><b>TOP-QUARKS</b></p> <p><math>m = 173\,000 \text{ MeV}/c^2</math> <math>q = +\frac{2}{3}</math></p>	<p><b>BOTTOM-QUARKS</b></p> <p><math>m = 4200 \text{ MeV}/c^2</math> <math>q = -\frac{1}{3}</math></p>



# Leptons


Électron, Muon et Tauon:

- Pas des charge forte
- Charge électrique entière négative
- Charge faible

Les Neutrinos :

- Pas de charge forte
- Pas des chargés électriquement
- Charge faible
- Très léger

1.

<b>ELEKTRON</b>  $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>ELEKTRON-NEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
--	---

2.

<b>MYON</b>  $m = 106 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>MYON-NEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
---	--

3.

<b>TAUON</b>  $m = 1777 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>TAU-NEUTRINO</b>  $m = < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
---	---



# Les Trois Générations

Dans notre environnement, il y a uniquement des particules de première génération

2ème et 3ème génération sont des copies plus lourdes

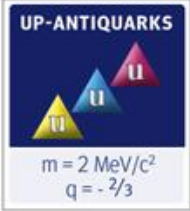



Ils sont labiles et désintègrent

	Quarks		Leptons	
1	<b>UP-QUARKS</b>  $m = 2 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	<b>DOWN-QUARKS</b>  $m = 5 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	<b>ELEKTRON</b>  $m = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>ELEKTRON-NEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
2	<b>CHARM-QUARKS</b>  $m = 1300 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	<b>STRANGE-QUARKS</b>  $m = 100 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	<b>MYON</b>  $m = 106 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>MYON-NEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
3	<b>TOP-QUARKS</b>  $m = 173\ 000 \text{ MeV}/c^2$ $q = +2/3$	<b>BOTTOM-QUARKS</b>  $m = 4200 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1/3$	<b>TAUON</b>  $m = 1777 \text{ MeV}/c^2$ $q = -1$	<b>TAU-NEUTRINO</b>  $m = < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$

# Les Antiparticules

À chaque particule de matière il y a une antiparticule de:

- Même masse
- Même durée de vie
- Des charges inverses :
  - Électrique
  - Forte
  - Faible

	Antiquarks		Antileptons		
3 Générations	1.	<b>UP-ANTIQUARKS</b>  $m = 2 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	<b>DOWN-ANTIQUARKS</b>  $m = 5 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	<b>POSITRON</b>  $m = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	<b>ELEKTRON-ANTINEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
	2.	<b>CHARM-ANTIQUARKS</b>  $m = 1300 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	<b>STRANGE-ANTIQUARKS</b>  $m = 100 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	<b>ANTI-MYON</b>  $m = 106 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	<b>MYON-ANTINEUTRINO</b>  $m < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$
	3.	<b>TOP-ANTIQUARKS</b>  $m = 173\ 000 \text{ MeV}/c^2$ $q = -2/3$	<b>BOTTOM-ANTIQUARKS</b>  $m = 4200 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1/3$	<b>ANTI-TAUON</b>  $m = 1777 \text{ MeV}/c^2$ $q = +1$	<b>TAU-ANTINEUTRINO</b>  $m = < 0,000\ 002 \text{ MeV}/c^2$ $q = 0$

# Interactions

Si des particules chargées se rencontrent, elles peuvent interagir:

- Attraction
- Répulsion
- Production de particules
- Transformation de particules

# Les Quatre Interactions Élémentaires



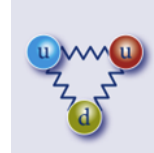
## Gravitation

- Attraction entre particules avec des masses
- Gravité terrestre
- Orbites des planètes
- Très faible: ne joue aucun rôle pour la physique des particules élémentaires
- Pas inclus dans le modèle standard



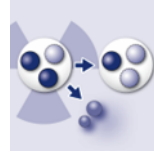
## Interaction électromagnétique

- Ondes électromagnétiques (Lumière, Radio, Micro-ondes, Rayons X)
- Cohésion des atomes et des molécules
- Chimie
- Magnétisme



## Interaction forte

- Attraction entre les quarks
- Relation entre les noyaux atomiques



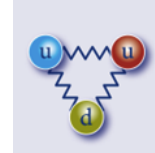
## Interaction faible

- Désintégration bêta
- Production de neutrons dans le Soleil
- Transformation de quarks et de leptons

# Les Quatre Interactions Élémentaires



Hmmm...



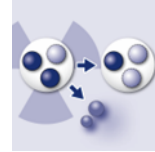
**Gluons**

- Transmettent l'interaction forte



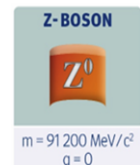
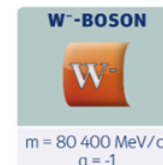
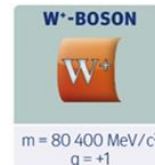
**Photon**

- Transmet l'interaction électromagnétique







**W+ Boson, W- Boson & Z Boson**

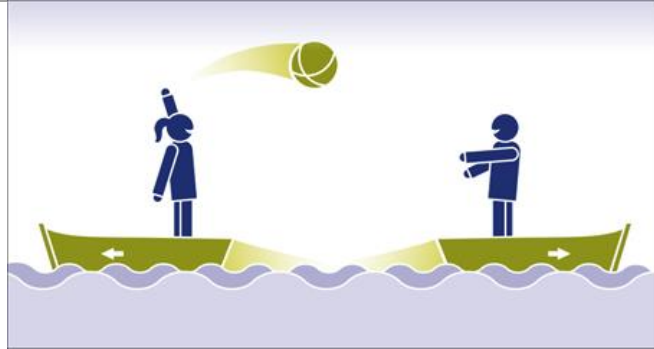
- Transmettent une interaction faible



# Les Quatre Interactions Élémentaires

A chaque type de charge correspond un type d'interaction:

	<b>Charge</b>	<b>Interaction</b>	<b>Particule</b>
	Mass (Masse)	Gravitation	Graviton? Pas de particule?
	Electric Charge (Charge électrique)	Interaction électromagnétique	Photon
	Strong Charge (Charge forte)	Interaction forte	Gluon
	Weak Charge (Charge faible)	Interaction faible	W+ Boson, W- Boson & Z Boson



# Quelle interaction participe?



- Quelqu'un téléphone avec un portable
- Un atom se transforme en un autre par désintégration bêta
- Les noyaux atomiques sont stables, bien que les protons se repoussent mutuellement
- Une boussole indique le nord
- Deux atomes forment une liaison chimique
- Un verre tombe de la table
- Deux quarks up et un quark down forment un proton
- Le soleil brille





# Higgs

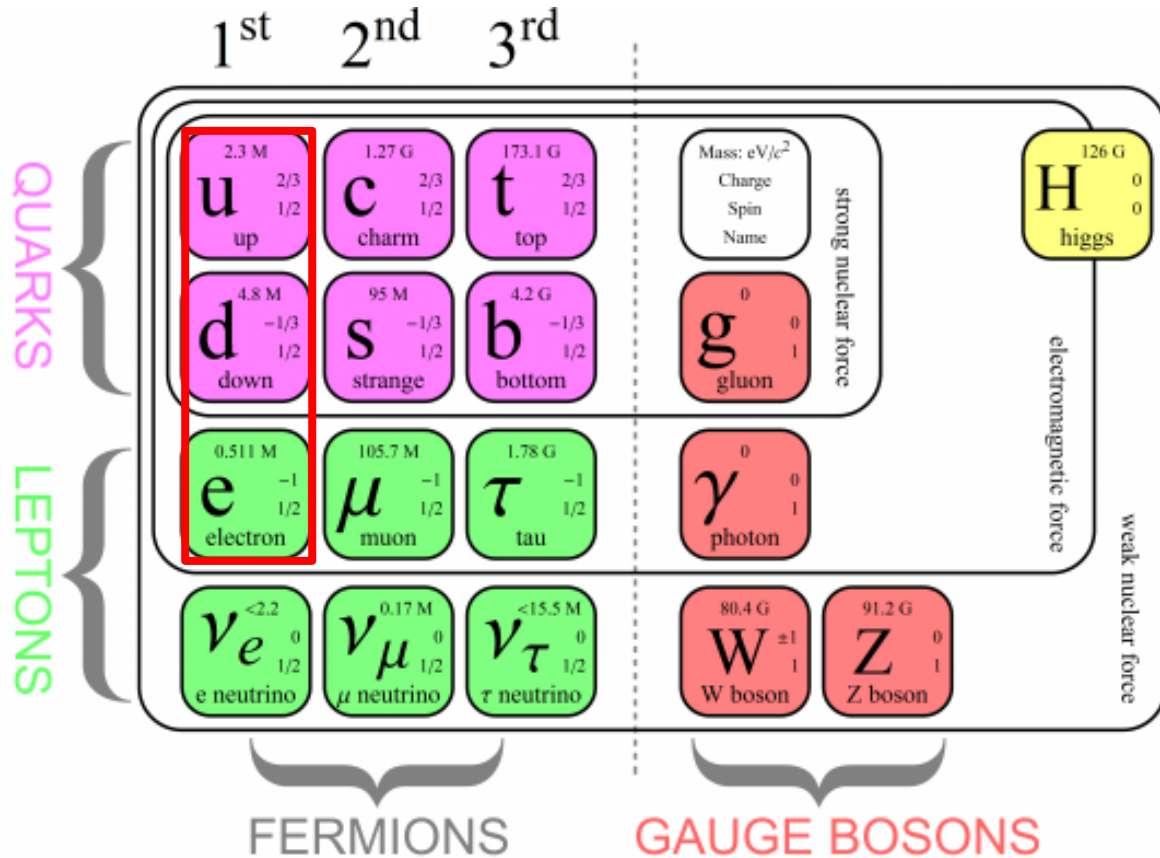
- électriquement neutre
- aucune charge forte
- charge faible de moins un demi
- est responsable des masses des particules



# Higgs



# Résumé



# Test de personnalité

Quelle particule élémentaire suis-je ?

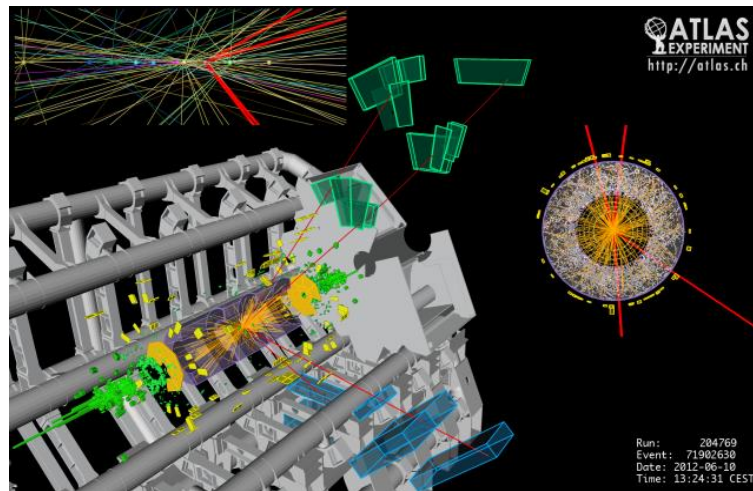
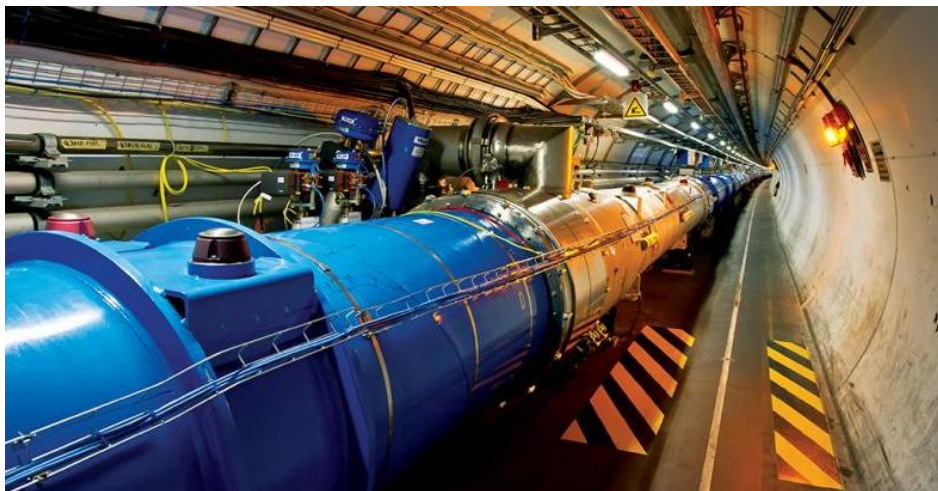


Particle Identity - S`Cool Lab CERN



# Mais...

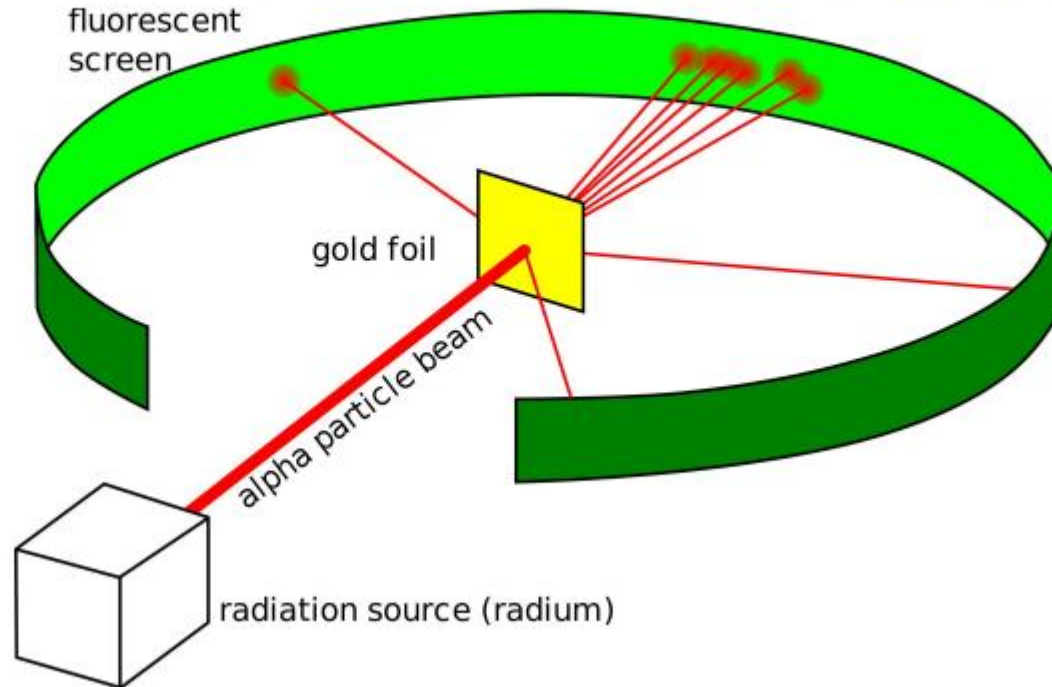
- Comment savon-nous?
- Comment mesuron-nous les particules?



# L'expérience de physique des particules la plus élémentaire

L'expérience Rutherford c'est l'expérience prototype de physique des particules.

- Le faisceau
- La cible (fixe)
- Détecteur



# Qu'est que c'est le LHC? (CERN en 3 minutes, 2019)





# Qu'est que c'est le Grand Collisionneur des Hadrons ou "Large Hadron Collider - LHC"?

**Grand** - 27 km circonférence, ~100 m souterrain

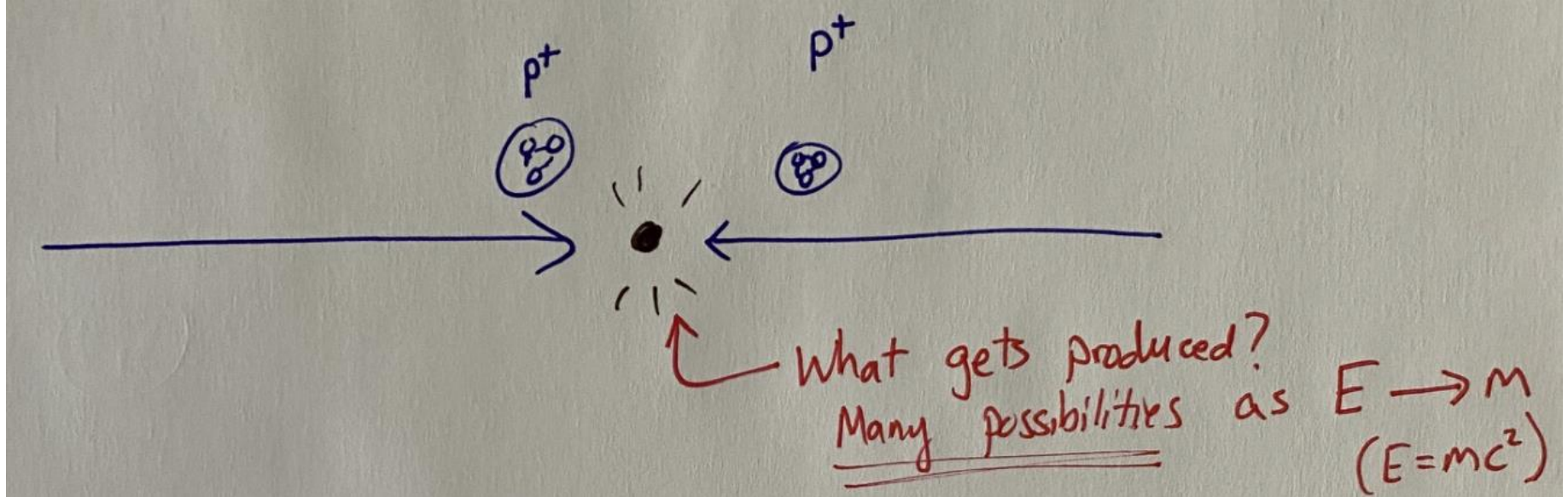
**Collisionneur** - 2 faisceaux entrent en collision en 4 points autour de l'anneau

**Hadrons** - Entre en collision des hadrons comme des protons (généralement) et des ions (parfois)

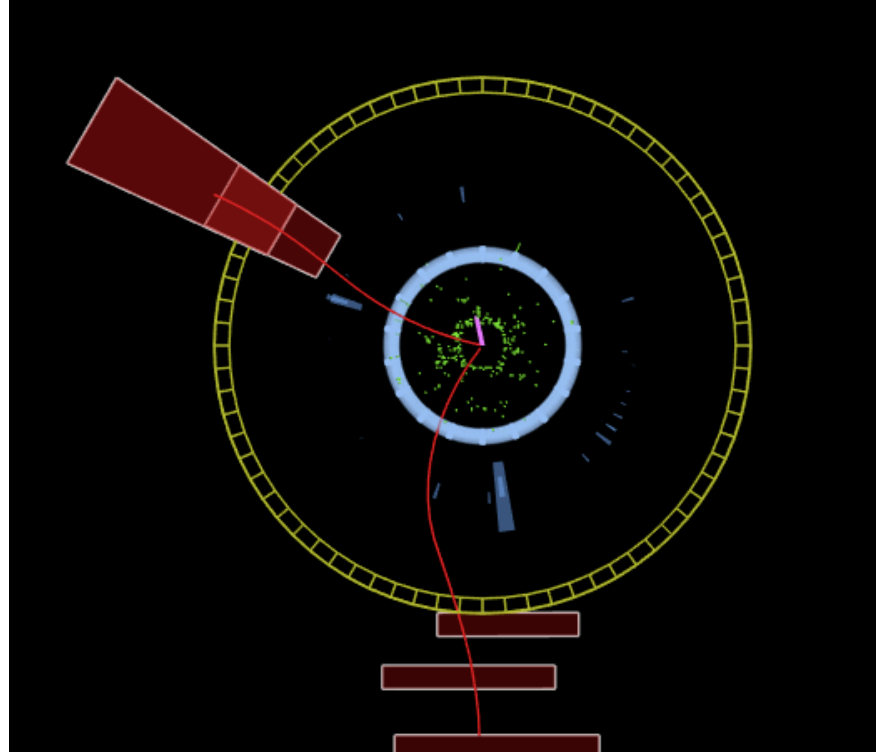
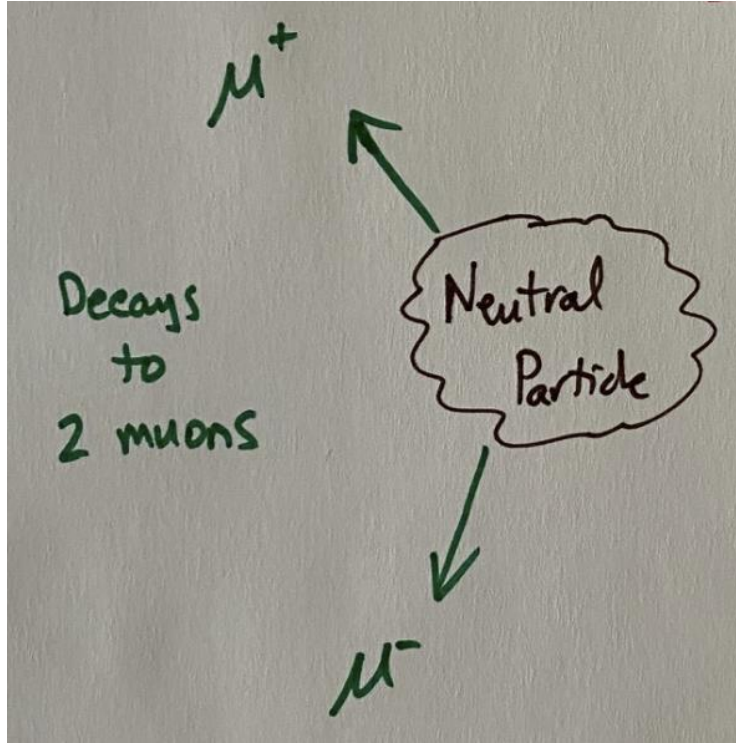


<https://www.innovationnewsnetwork.com/technology-in-relativistic-heavy-ion-collider-physics-research/6466/>

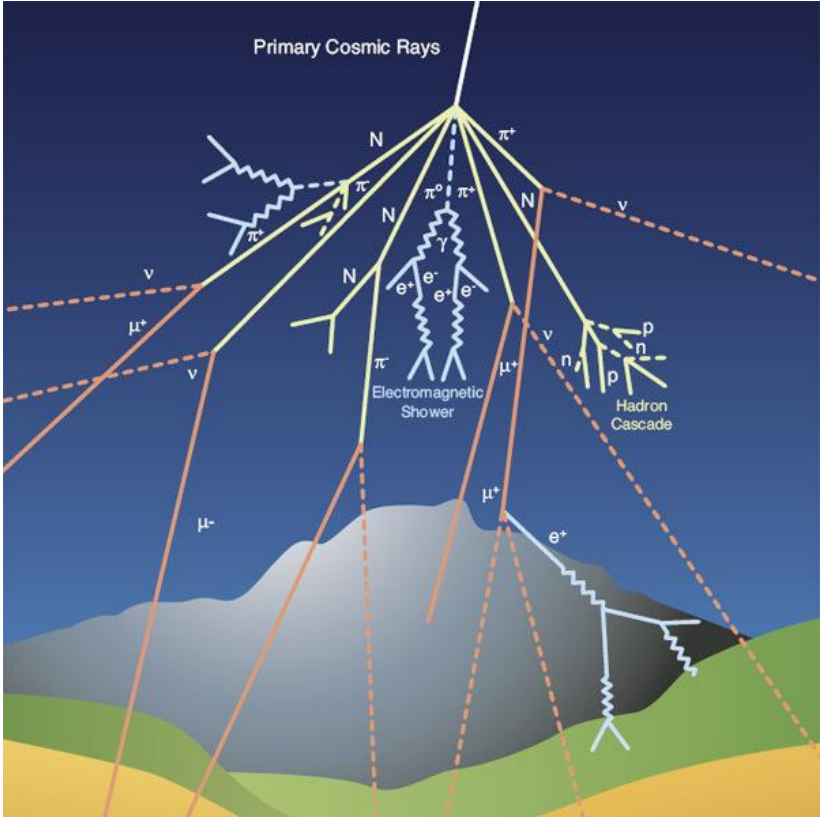
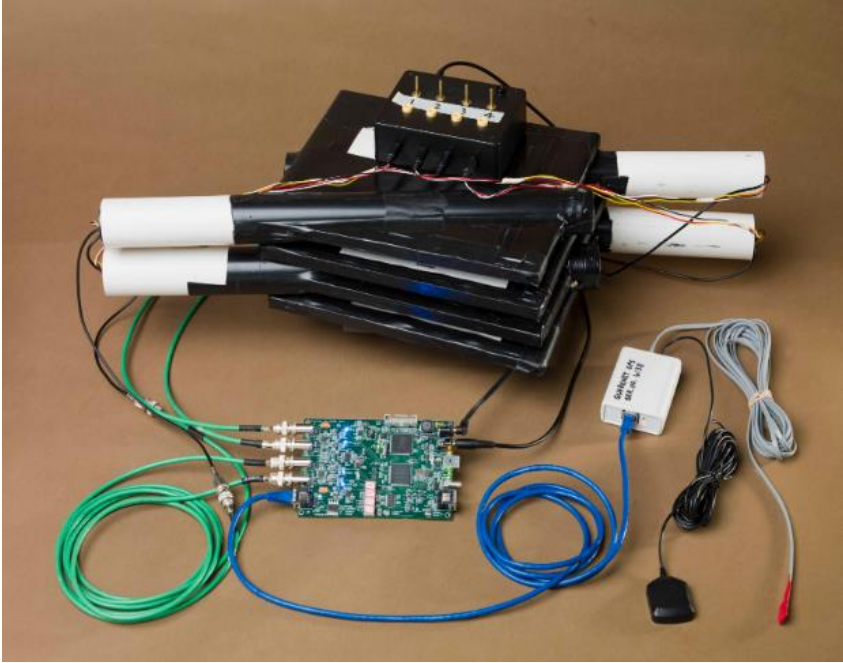
Expérience collisionneur : le faisceau est la cible !



Une possibilité: Une particule neutre (Z boson, par exemple) est produit - se désintègre en 2 muons



# En parlant de muons...



# Nous pouvons collecter des muons!

La plupart des muons traversent le détecteur.

Ils laissent un signal lors de leur passage.

Mais quelques muons ont une faible énergie. Ils s'arrêtent dans le détecteur.

