

## **Introduction à la Physique des Particules et au FCC**

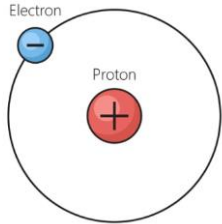
**La Physique des Particules est une partie très développée de la science fondamentale, alors quelles sont ces grandes découvertes à faire, dont parlait Peter Higgs ?**

**La théorie quantique qui explique la physique des particules, s'appelle le "Modèle Standard"**

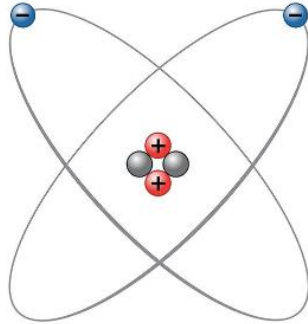
**On dit qu'il est "complet" et à ce jour, il explique tous les résultats obtenus auprès des accélérateur, alors ?**

# Les particules élémentaires, de 1897 à aujourd'hui

Atome d'Hydrogène



Atome d'Helium



proton

neutron

$\nu_e$   
electron  
neutrino

0.511 MeV  
-1  
e  
electron

$\gamma$   
photon

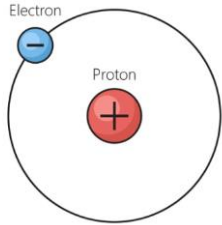
Les "hadrons"

Les "leptons"

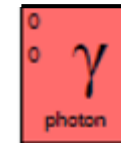
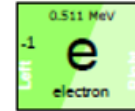
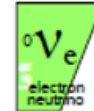
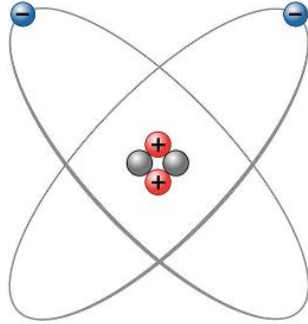
Radioactivité

# Les particules élémentaires, de 1897 à aujourd'hui

Atome d'Hydrogène



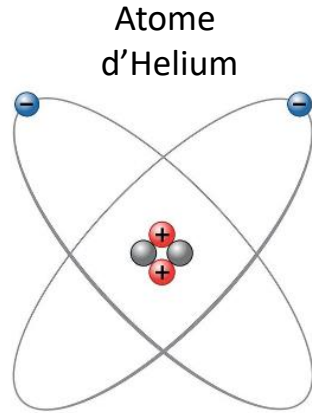
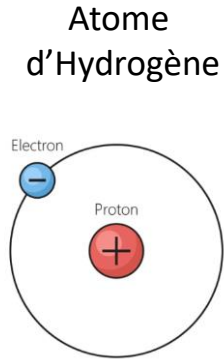
Atome d'Helium



Bien plus tard, on a compris que le proton et le neutron sont composés de particules plus élémentaires, les quarks "up" (u) et "down" (d)

Radioactivité

# Les particules élémentaires, de 1897 à aujourd'hui



proton  
uud

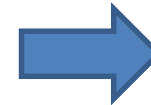
neutron  
udd

$0 \nu_e$   
electron neutrino

0.511 MeV  
-1 e  
electron

$0 \gamma$   
photon

Radioactivité



2.4 MeV  
 $\frac{2}{3}$  u  
up

4.8 MeV  
 $-\frac{1}{3}$  d  
down

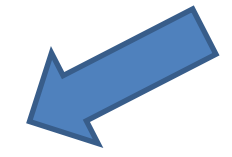
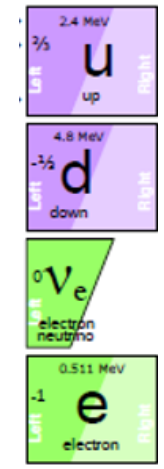
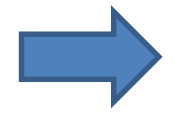
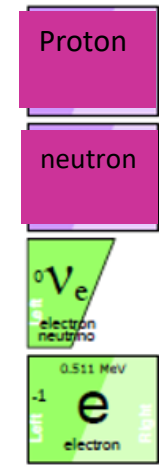
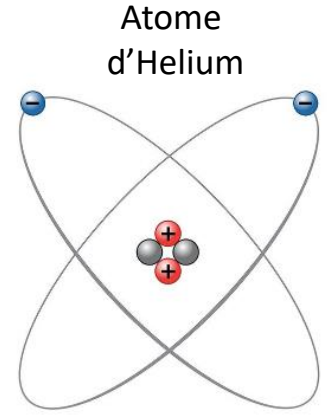
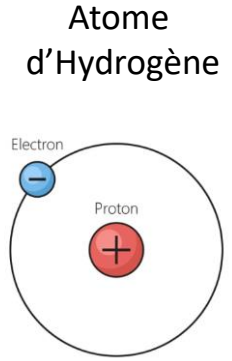
$0 \nu_e$   
electron neutrino

0.511 MeV  
-1 e  
electron

$0 \gamma$   
photon

Interaction faible  
Interaction forte

# Les particules élémentaires, de 1897 à aujourd'hui



3 familles de particules élémentaires

3 types d'interactions:

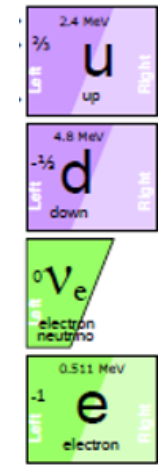
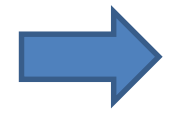
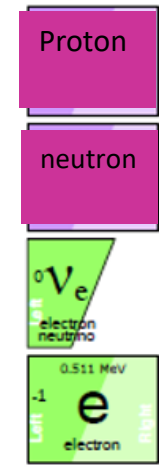
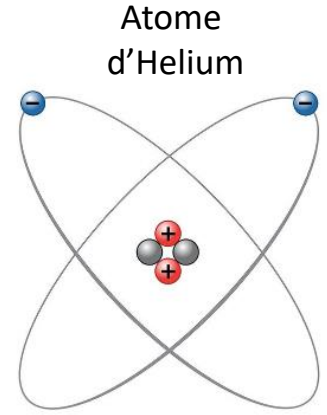
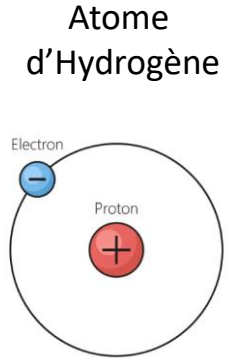
- Forte (gluon, fusion nucléaire)
- Electromagnétique ( $\gamma$  = photon)
- Faible (boson W,Z  $\rightarrow$  radioactivité)

Three Generations of Matter (Fermions) spin  $\frac{1}{2}$

	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	173.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
name	u up	c charm	t top	g gluon
Quarks	$\frac{1}{3}$ d down	$-\frac{1}{3}$ s strange	$-\frac{1}{3}$ b bottom	0 $\gamma$ photon
	$0 \nu_e$ electron neutrino	$0 \nu_\mu$ muon neutrino	$0 \nu_\tau$ tau neutrino	91.2 GeV $0$ Z weak force
	Leptons			80.4 GeV $\pm 1$ W weak force
	0.511 MeV $-1$ e electron	106.7 MeV $-1$ $\mu$ muon	1.777 GeV $-1$ $\tau$ tau	

Bosons (Forces) spin 1

# Les particules élémentaires, de 1897 à aujourd'hui



3 familles de particules élémentaires

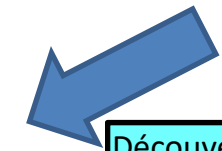
3 types d'interactions:

- Forte (gluon, fusion nucléaire)
- Electromagnétique ( $\gamma$  = photon)
- Faible (boson W,Z  $\rightarrow$  radioactivité)

Three Generations of Matter (Fermions) spin  $\frac{1}{2}$

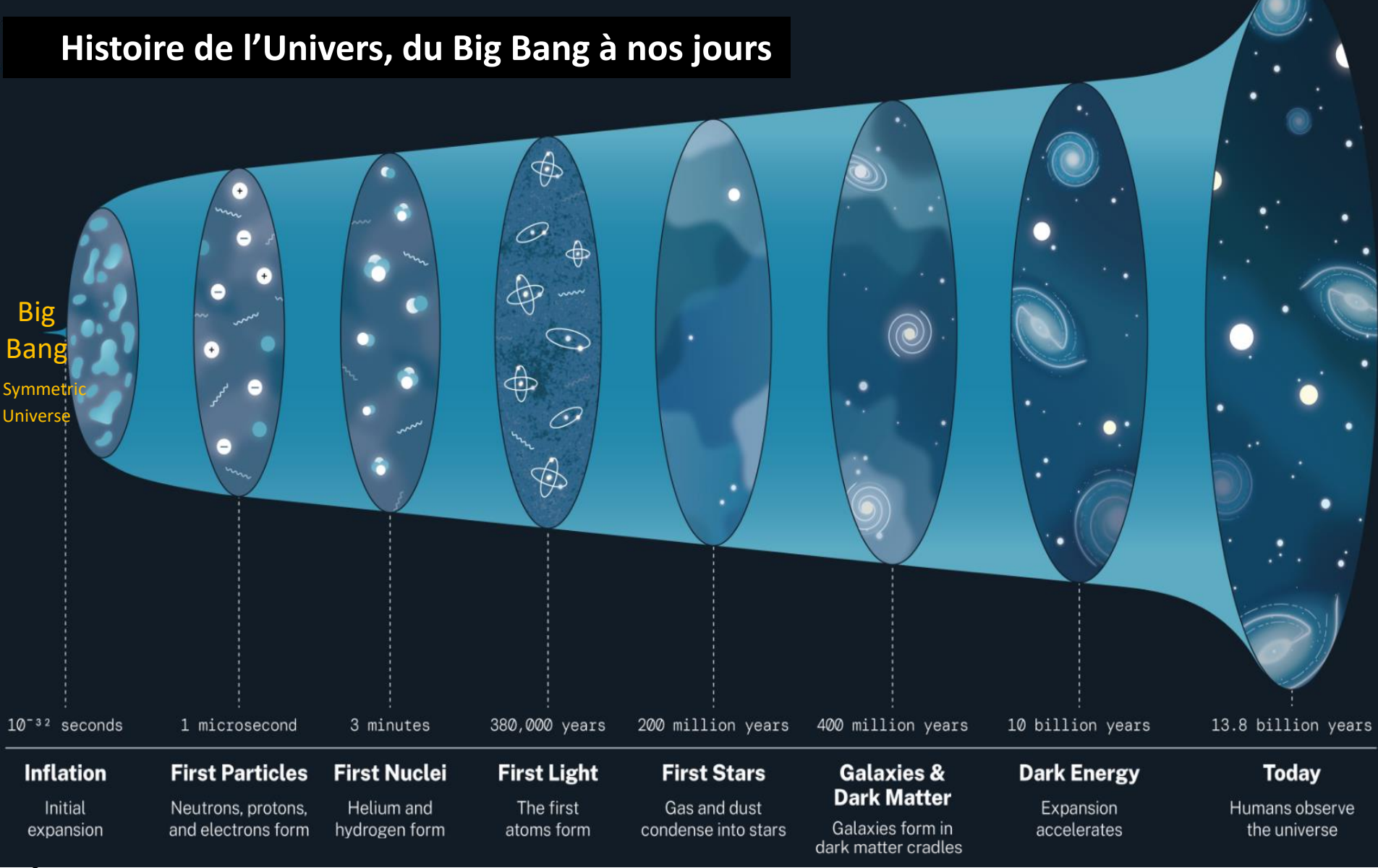
	I	II	III	
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	173.2 GeV	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon
Quarks	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	0 <b><math>\gamma</math></b> photon
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	0 <b>Z</b> weak force
	0.511 MeV <b>e</b> electron	106.7 MeV <b><math>\mu</math></b> muon	1.777 GeV <b><math>\tau</math></b> tau	80.4 GeV <b>W</b> weak force
Leptons				126 GeV <b>H</b> Higgs boson spin 0

Bosons (Forces) spin 1

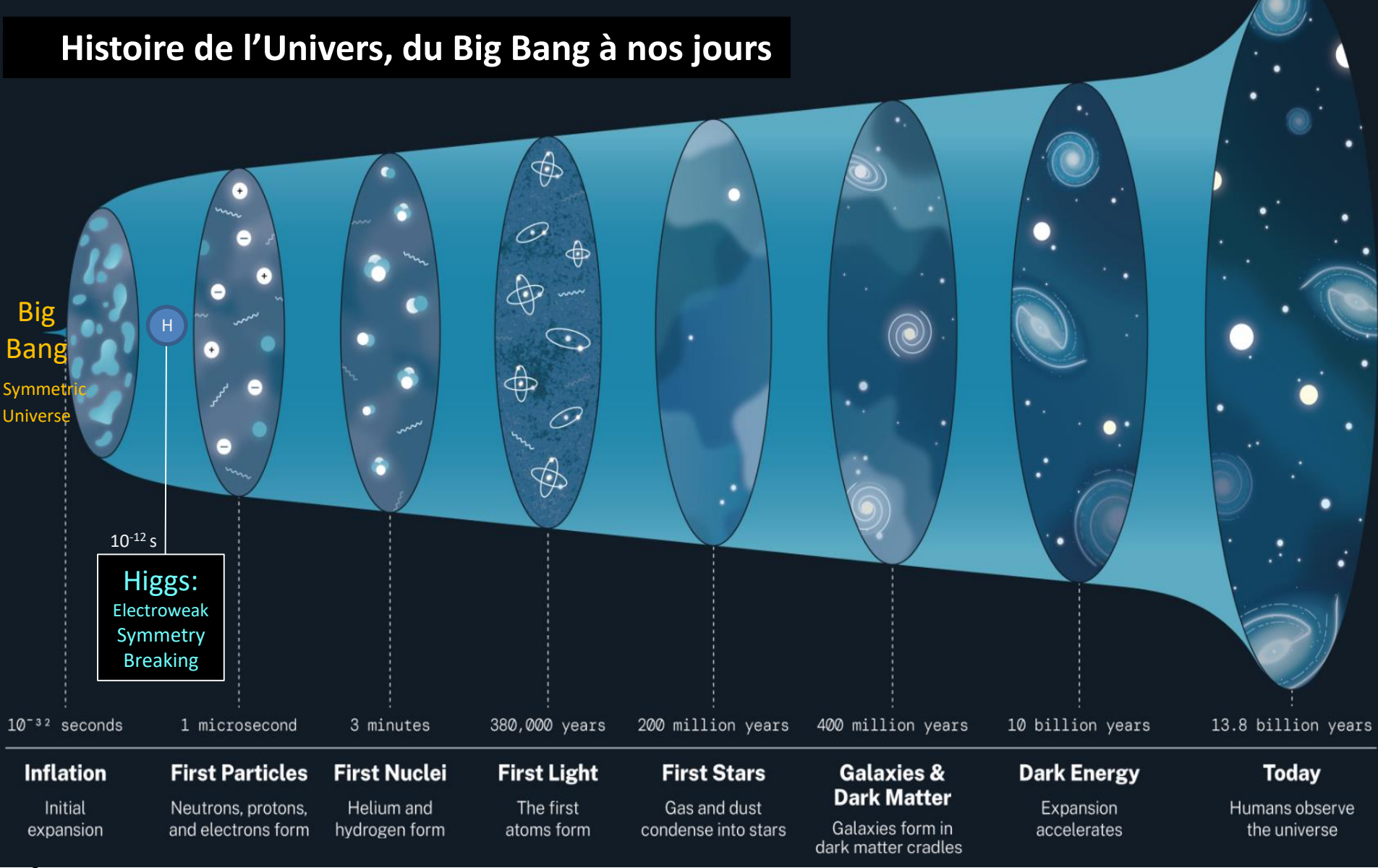


Découverte du boson de Higgs en 2012 au LHC qui complète le modèle standard, et qui explique la la masse des particules élémentaires et la séparation de la force électromagnétique de la force faible dans les tous premiers instants après le big bang

# Histoire de l'Univers, du Big Bang à nos jours



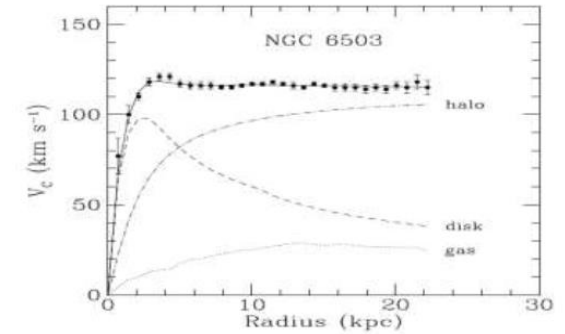
# Histoire de l'Univers, du Big Bang à nos jours





## Quelle est la nature de la matière noire?

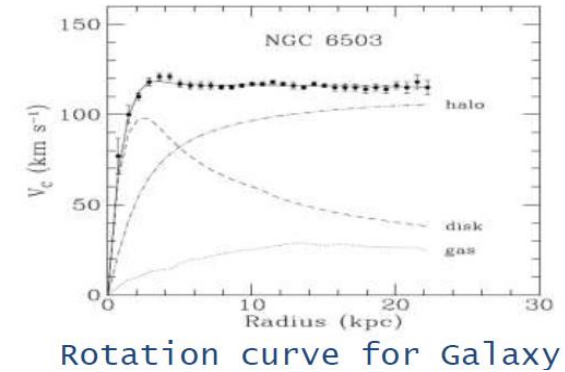
Les particules du Modèle Standard ne constituent que 5% de la masse de l'Univers. Qu'en est-il du reste ?



Rotation curve for Galaxy

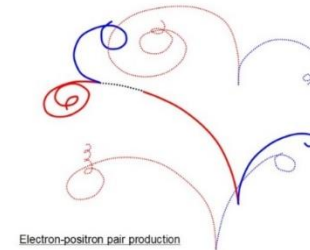
## Quelle est la nature de la matière noire?

Les particules du Modèle Standard ne constituent que 5% de la masse de l'Univers. Qu'en est-il du reste ?



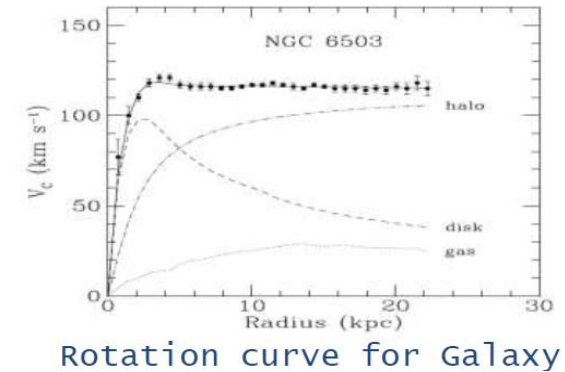
## Comment l'antimatière a disparu de l'Univers?

Lors du Big Bang, il y avait autant de matière que d'antimatière, mais aujourd'hui on ne voit plus que de la matière. Seuls les collisionneurs nous permettent de créer de l'antimatière sur terre



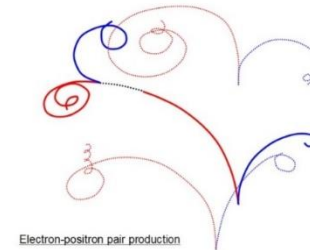
## Quelle est la nature de la matière noire?

Les particules du Modèle Standard ne constituent que 5% de la masse de l'Univers. Qu'en est-il du reste ?



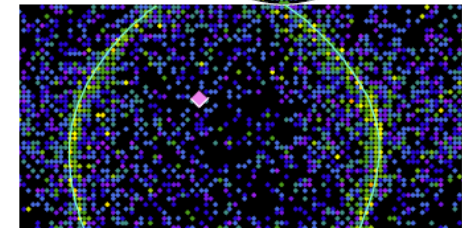
## Comment l'antimatière a disparu de l'Univers?

Lors du Big Bang, il y avait autant de matière que d'antimatière, mais aujourd'hui on ne voit plus que de la matière. Seuls les collisionneurs nous permettent de créer de l'antimatière sur terre



## Quelle est l'origine de la masse des neutrinos ?

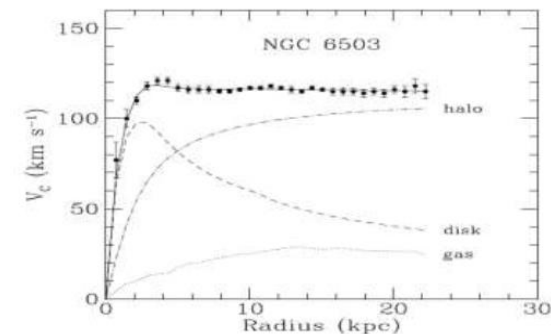
Plusieurs hypothèses sont avancées, car elle n'a sans doute pas la même origine que la masse de l'électron ou celle des quarks, qui s'obtiennent par le boson de Higgs. Le FCC nous permettra peut-être de résoudre cette énigme.



# Un nouveau collisionneur permettrait d'avancer sur de nombreuses grandes questions

## Quelle est la nature de la matière noire?

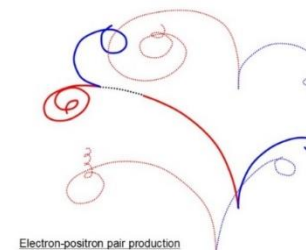
Les particules du Modèle Standard ne constituent que 5% de la masse de l'Univers. Qu'en est-il du reste ?



Rotation curve for Galaxy

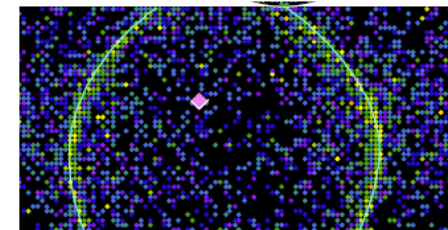
## Comment l'antimatière a disparu de l'Univers?

Lors du Big Bang, il y avait autant de matière que d'antimatière, mais aujourd'hui on ne voit plus que de la matière. Seuls les collisionneurs nous permettent de créer de l'antimatière sur terre



## Quelle est l'origine de la masse des neutrinos ?

Plusieurs hypothèses sont avancées, car elle n'a sans doute pas la même origine que la masse de l'électron ou celle des quarks, qui s'obtiennent par le boson de Higgs. Le FCC nous permettra peut-être de résoudre cette énigme.



## Et surtout, on comprendrait mieux ce qu'est le boson de Higgs

Structure mathématique unique (champ «scalaire»), rôle joué lors du Big Bang etc...

## → Recommendations de la Stratégie Européenne pour la Physique des Particules (2020):



“ Europe, together with its international partners, should investigate the technical and financial feasibility of a **future hadron collider at CERN** with a centre-of-mass energy of at least 100 TeV, with an **electron-positron Higgs and electroweak factory** as a possible first stage.”

“ Such a feasibility study ... should be completed on the timescale of the next Strategy update.” (2026)



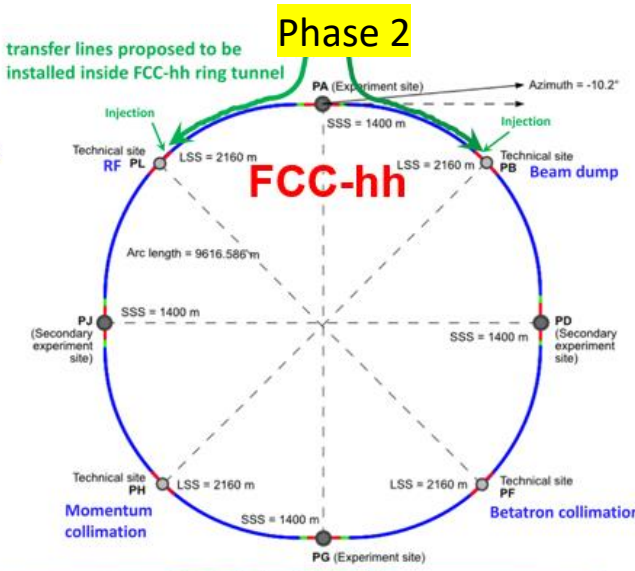
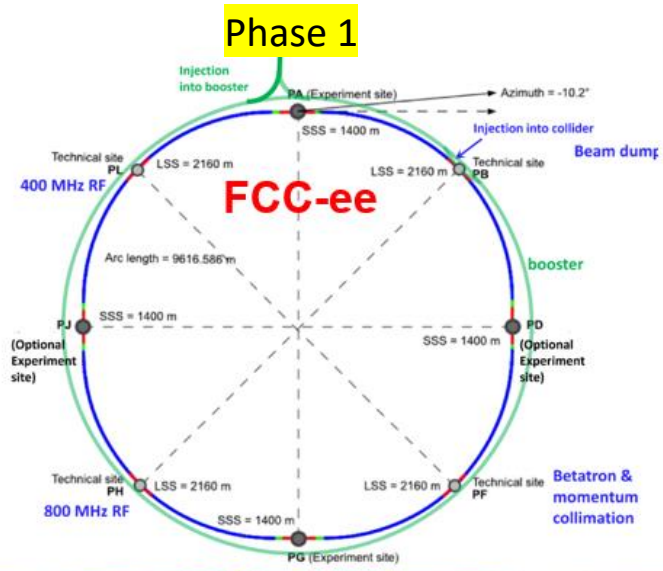
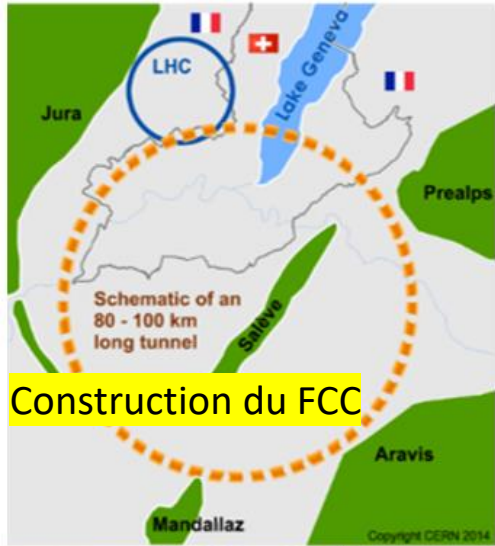
**Etude de Faisabilité du FCC, 2021-2025**

# Le programme du FCC (phase e+e-, puis hh) au CERN va au delà du programme déjà exceptionnel du LEP suivi du LHC (1976-2041)

Programme de Physique complet, optimisant l'utilisation des ressources déjà existantes au CERN

- **Construction**: pendant l'exploitation du LHC
- **Phase 1**: FCC-ee : étude extrêmement précise des bosons Z, W, Higgs et du top. Test ultime du modèle standard
- **Phase 2**: FCC-hh ( $\sim 100$  TeV, 7 fois le LHC) pour repousser la frontière en énergie et étudier l'autocouplage du Higgs

Le FCC s'intégrerait parfaitement avec l'exploitation du HL-LHC qui durera jusqu'en 2041, et permettrait une transition naturelle vers la très haute précision, puis les très hautes énergies



# Le CERN, FCC et l'Europe

- 400-page report made public by Mario Draghi on Monday 9 September 2024
  - Handed to Ursula von der Leyen (European Commission president) for subsequent action
  - Urges the EU to invest 800 billion euros annually [with specific guidance]
- CERN mentioned 19 times in the report, FCC mentioned 3 times
- Excerpts (see p.236 and p.252)

## **The CERN success story**

The Large Hadron Collider has propelled CERN to global leadership in particle physics – a mantle that has shifted from the US to Europe – and it stands as CERN's flagship facility. One of CERN's most promising current projects, with significant scientific potential, is the construction of the Future Circular Collider (FCC): a 90-km ring designed initially for an electron collider and later for a hadron collider. Chinese authorities are also considering constructing a similar accelerator in China, recognising its scientific potential and its role in advancing cutting-edge technologies. If China were to win this race and its circular collider were to start working before CERN's, Europe would risk losing its leadership in particle physics, potentially jeopardising CERN's future.

## **Invest in world-leading research and technological infrastructure**

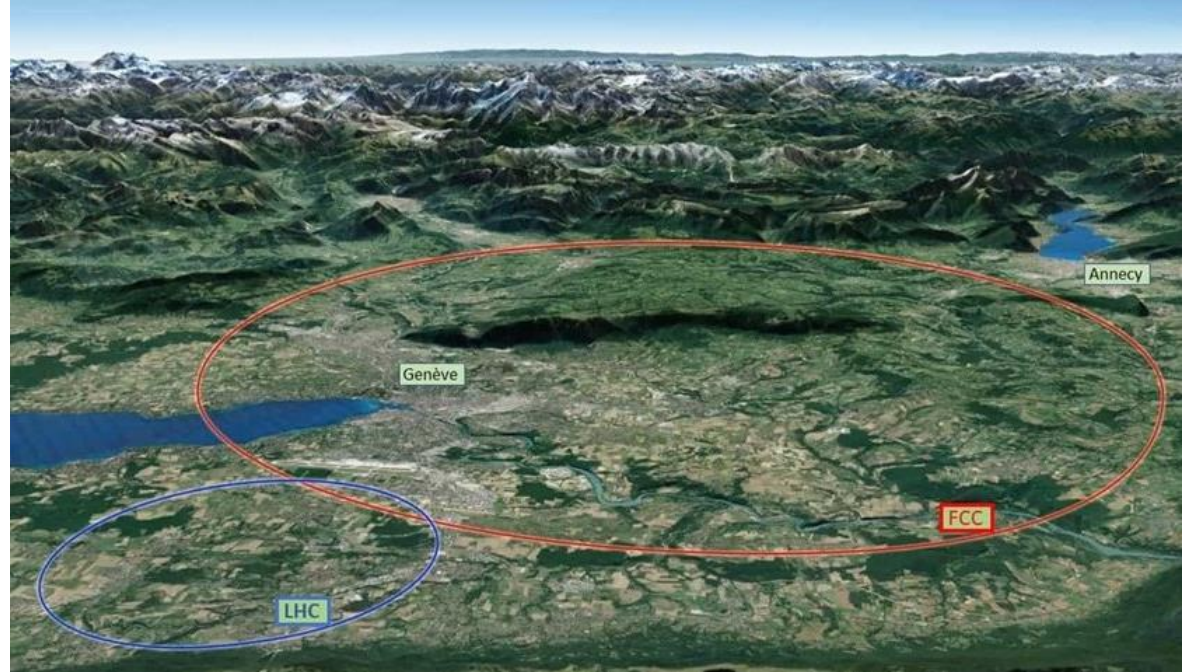
We have already discussed the remarkable returns from the creation of the European Organization for Nuclear Research (CERN) and emphasised that the future of CERN is at risk due to China's progress in emulating one of CERN's most promising current projects, the Future Circular Collider (FCC). Refinancing CERN and ensuring its continued global leadership in frontier research should be regarded as a top EU priority, given the objective of maintaining European prominence in this critical area of fundamental research, which is expected to generate significant business spillovers in the coming years.

**Questions avant de rentrer plus dans  
Les details avec Christophe et Johannes?**





# FCC: Futur Collisionneur Circulaire



18:45 → 19:00 **court-metragé sur le FCC**

19:00 → 19:15 **Contexte et Introduction au Futur Collisionneur Circulaire de particules élémentaires du CERN**

**Orateur:** Gregorio Bernardi (Physicien expérimentateur, co-responsable FCC-France) (CNRS / IN2P3)

19:15 → 19:20 **court-metragé sur le CERN**

19:20 → 19:40 **Objectifs Scientifiques du FCC : Explorer l'Inconnu**

**Orateur:** Christophe Grojean (Physicien théoricien, co-responsable FCC-Physique-Expérience-Détecteur)) (DESY / CERN)

19:45 → 20:05 **Étude de faisabilité FCC : Où en sommes-nous sur le terrain ?**

**Orateur:** Johannes Gutleber (Coordinateur du Projet FCC Innovation study) (CERN)

20:10 → 21:00 **Table Ronde avec le public : Questions - Réponses avec des physiciens de FCC**

**Orateurs:** Christophe Grojean (DESY (Hamburg) & Humboldt University (Berlin)), Gaëlle Boudoul (IP2I/AICP (CNRS/IN2P3)), Giovanni Marchiori Gregorio BERNARDI (APC Paris, CNRS/IN2P3), Johannes Gutleber (CERN), Nicolas Morange (IJCLab), Suzanne GASCON-SHOTKIN (IPN : Claude Bernard Lyon 1), Vincent BOUDRY (LLR - CNRS, École polytechnique/IPP Paris)

# Organisation de la collaboration FCC

## FCC Feasibility Study

