

# La physique des particules et des astroparticules au LAPP

Congrès Udppc

Edwige Tournefier

Lundi 28 novembre 2019

- 9h: accueil
- 9h15-10h Introduction (Edwige Tournefier)
- 10h-11h30 : visite d'EUTOPIA et du centre de calcul
  - Développements techniques pour ATLAS (Nicolas Geffroy)
  - Physique des rayons gammas et développements techniques pour CTA (Gilles Maurin et Nicolas Geffroy)
  - Le centre de calcul MUST (Ludovic Duflot)

**1976** : création du LAPP

**Années 80** : participation du LAPP à des expériences historiques de physique des particules (CERN)

**1991** : agrandissement du LAPP

**Années 90** : nouveaux domaines de recherche et nouvelles expériences

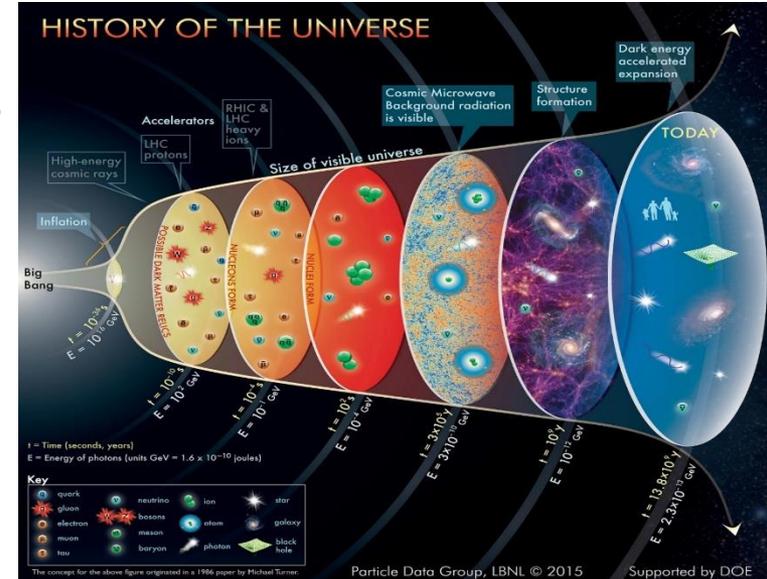
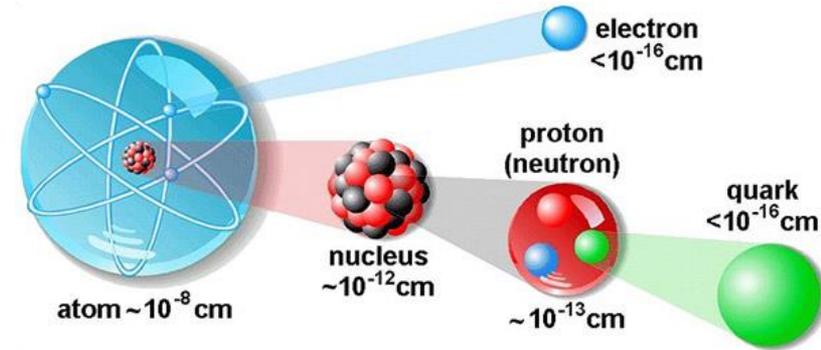


**Le LAPP associé à de grandes découvertes :**

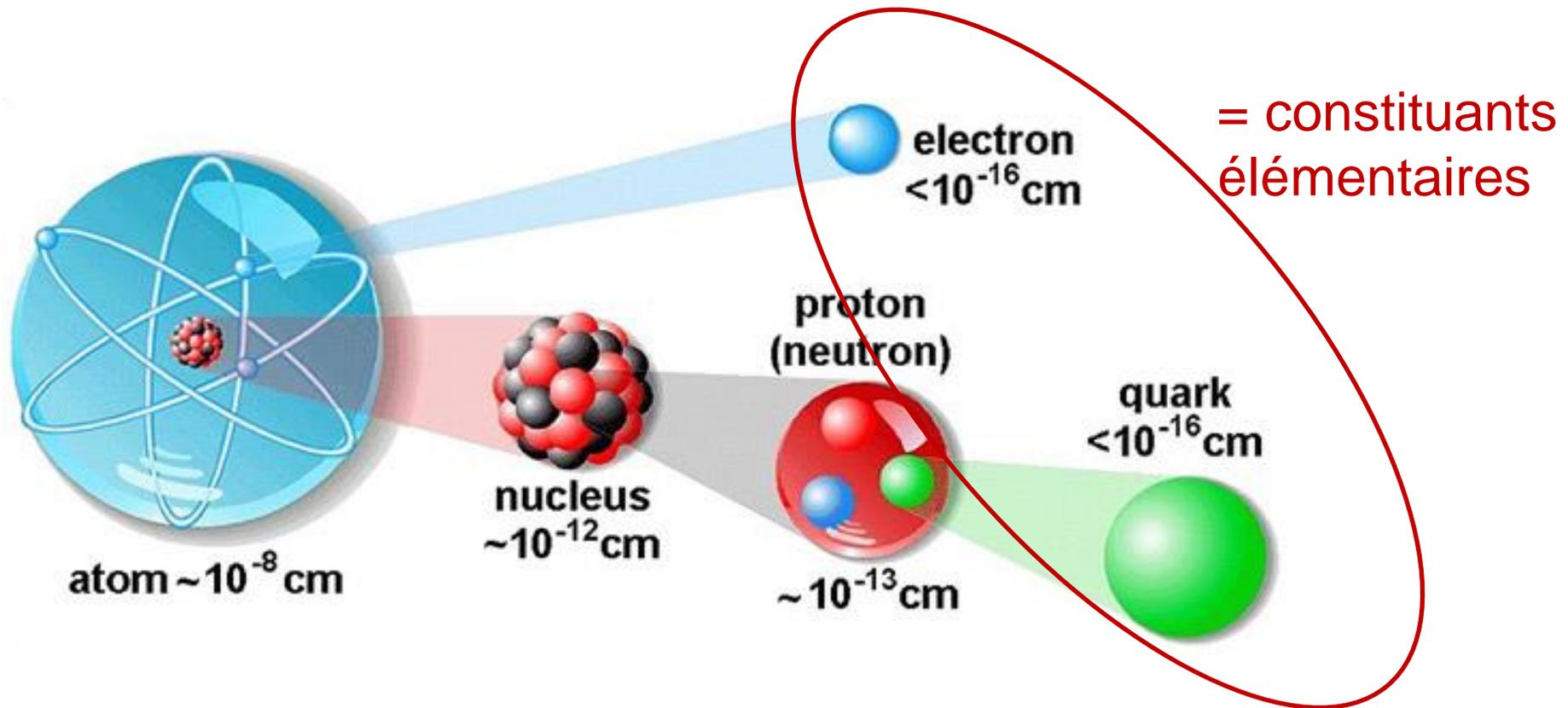
-  Découverte des bosons Z et W (1983)
-  Découverte du boson de Higgs (2012)
-  Les neutrinos oscillent et ont une masse (2015)
-  Découverte des ondes gravitationnelles (2016)

## Recherches menées au LAPP:

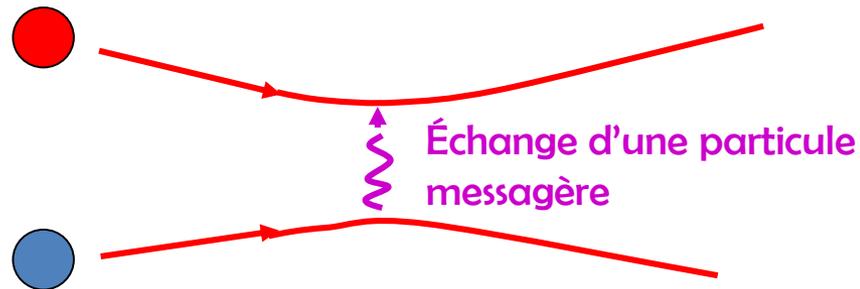
- étude des constituants élémentaires de la matière et leurs interactions  
 ⇒ la physique des particules
- compréhension de l'évolution de l'Univers et de sa composition  
 ⇒ astro-particules, cosmologie et ondes gravitationnelles



La **physique des particules** cherche à déterminer quels sont les **constituants élémentaires** de la **matière** ainsi que les **forces** qui s'exercent entre eux (interactions)



En physique des particules, l'**interaction** qui s'exerce entre 2 particules élémentaires de matière est décrite comme l'**échange** entre ces 2 particules d'une **particule messagère**.



TYPE	FORCE RELATIVE	PARTICULES ÉCHANGÉES	EXEMPLE DE DOMAINE D'APPLICATION
FORTE	$\approx 1$	gluons	noyau, nucléons
ÉLECTROMAGNÉTIQUE	$\approx 10^{-2}$	photons	cortège électronique de l'atome, lumière, chimie
FAIBLE	$\approx 10^{-6}$	bosons $Z^0, W^+, W^-$	radioactivité $\beta$ énergie solaire
GRAVITATION	$\approx 10^{-38}$	graviton ?	pesanteur systèmes planétaires

- Masse
- Spin (moment angulaire intrinsèque)
  - ⇒ fermion (spin demi-entier) ou boson (spin entier)
- Charge(s) ⇒ couplage aux champs d'interaction
- Temps de vie et modes de désintégration

Citation: J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR **D86**, 010001 (2012) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

**$\tau$**

$$J = \frac{1}{2}$$

$\tau$  discovery paper was PERL 75.  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$  cross-section threshold behavior and magnitude are consistent with pointlike spin-1/2 Dirac particle. BRANDELIK 78 ruled out pointlike spin-0 or spin-1 particle. FELDMAN 78 ruled out  $J = 3/2$ . KIRKBY 79 also ruled out  $J = \text{integer}$ ,  $J = 3/2$ .

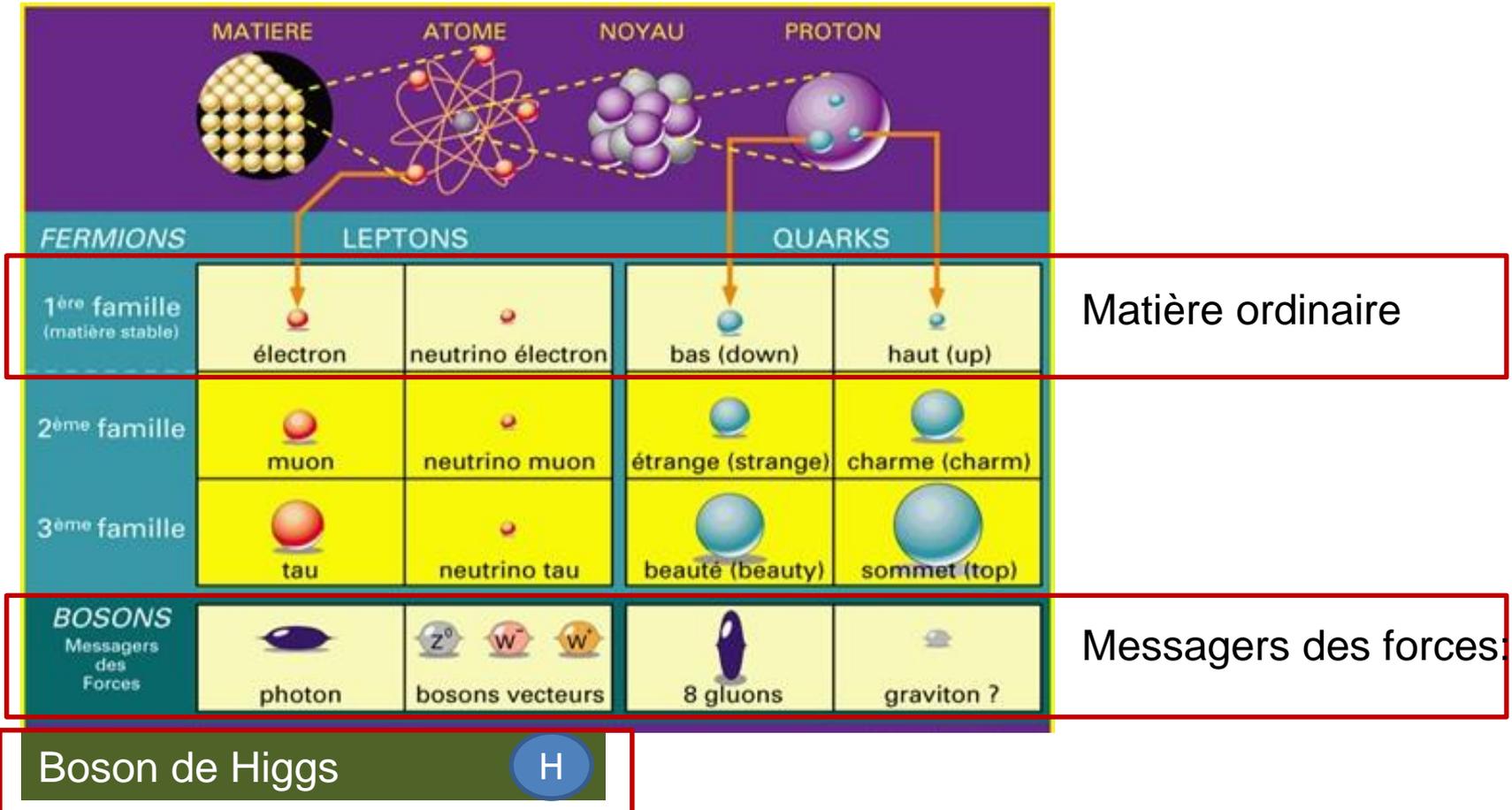
### $\tau$ MASS

VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
<b>1776.82 ± 0.16 OUR AVERAGE</b>				
1776.68 ± 0.12 ± 0.41	682k	<sup>1</sup> AUBERT	09AK BABR	423 fb <sup>-1</sup> , $E_{cm}^{ee} = 10.6$ GeV
1776.81 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.23</sub> ± 0.15	81	ANASHIN	07 KEDR	6.7 pb <sup>-1</sup> , $E_{cm}^{ee} = 3.54\text{--}3.78$ GeV
1776.61 ± 0.13 ± 0.35		<sup>1</sup> BELOUS	07 BELL	414 fb <sup>-1</sup> , $E_{cm}^{ee} = 10.6$ GeV
1775.1 ± 1.6 ± 1.0	13.3k	<sup>2</sup> ABBIENDI	00A OPAL	1990–1995 LEP runs
1778.2 ± 0.8 ± 1.2		ANASTASSOV	97 CLEO	$E_{cm}^{ee} = 10.6$ GeV
1776.96 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.21</sub> <sup>+0.25</sup> <sub>-0.17</sub>	65	<sup>3</sup> BAI	96 BES	$E_{cm}^{ee} = 3.54\text{--}3.57$ GeV
1776.3 ± 2.4 ± 1.4	11k	<sup>4</sup> ALBRECHT	92M ARG	$E_{cm}^{ee} = 9.4\text{--}10.6$ GeV
1783 <sup>+3</sup> <sub>-4</sub>	692	<sup>5</sup> BACINO	78B DLCO	$E_{cm}^{ee} = 3.1\text{--}7.4$ GeV
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. •••				
1777.8 ± 0.7 ± 1.7	35k	<sup>6</sup> BALEST	93 CLEO	Repl. by ANASTASSOV 97
1776.9 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.5</sub> ± 0.2	14	<sup>7</sup> BAI	92 BES	Repl. by BAI 96

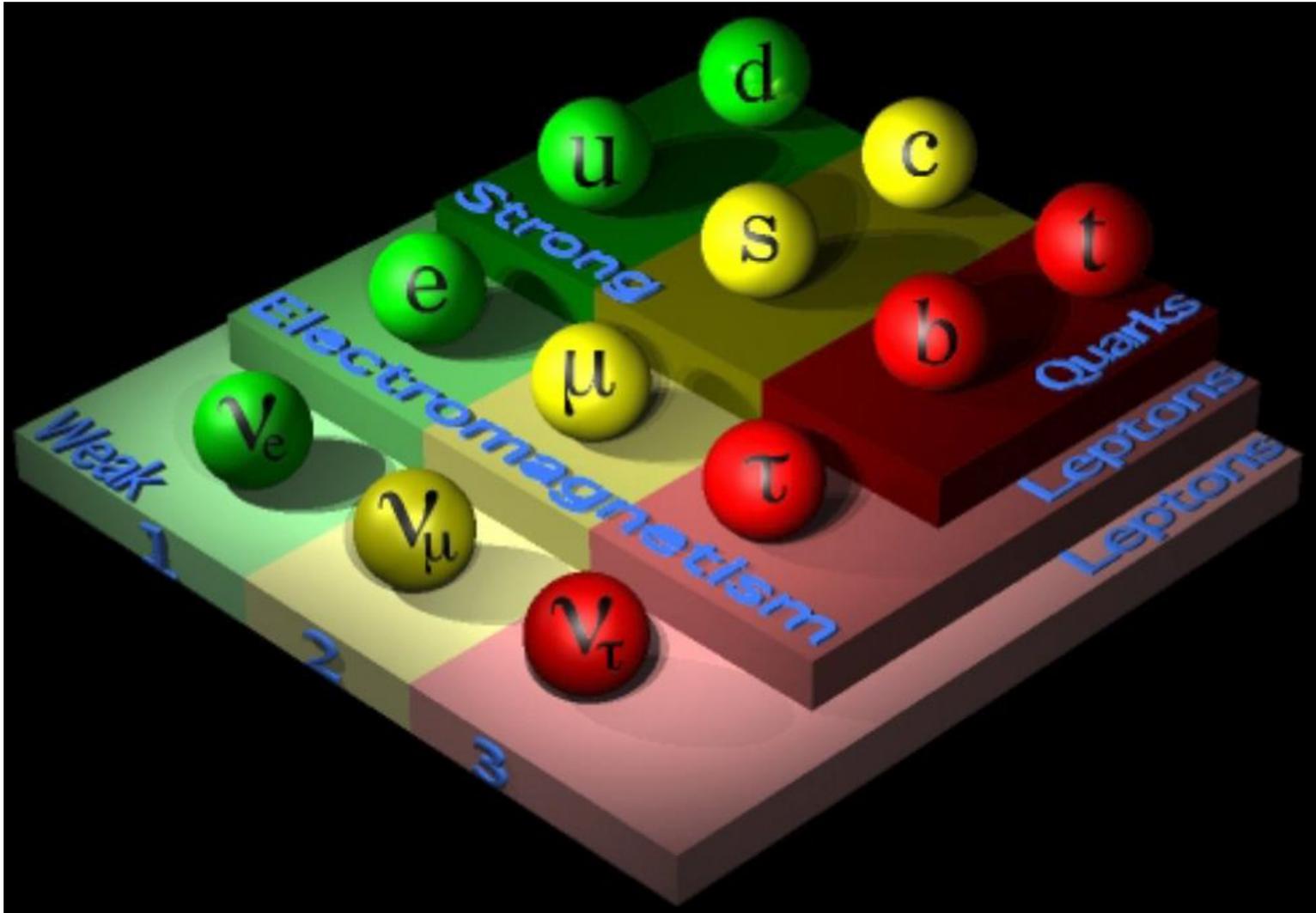
Citation: J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR **D86**, 010001 (2012) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)

### Modes with one charged particle

$\Gamma_1$	particle <sup>-</sup> ≥ 0 neutrals ≥ 0 $K^0 \nu_\tau$ ("1-prong")	(85.35 ± 0.07) %	S=1.3
$\Gamma_2$	particle <sup>-</sup> ≥ 0 neutrals ≥ 0 $K_L^0 \nu_\tau$	(84.71 ± 0.08) %	S=1.3
$\Gamma_3$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	[a] (17.41 ± 0.04) %	S=1.1
$\Gamma_4$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau \gamma$	[b] (3.6 ± 0.4) × 10 <sup>-3</sup>	
$\Gamma_5$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	[a] (17.83 ± 0.04) %	
$\Gamma_6$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau \gamma$	[b] (1.75 ± 0.18) %	
$\Gamma_7$	$h^- \geq 0 K_L^0 \nu_\tau$	(12.06 ± 0.06) %	S=1.2
$\Gamma_8$	$h^- \nu_\tau$	(11.53 ± 0.06) %	S=1.2
$\Gamma_9$	$\pi^- \nu_\tau$	[a] (10.83 ± 0.06) %	S=1.2
$\Gamma_{10}$	$K^- \nu_\tau$	[a] (7.00 ± 0.10) × 10 <sup>-3</sup>	S=1.1
$\Gamma_{11}$	$h^- \geq 1$ neutrals $\nu_\tau$	(37.10 ± 0.10) %	S=1.2
$\Gamma_{12}$	$h^- \geq 1 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	(36.57 ± 0.10) %	S=1.2
$\Gamma_{13}$	$h^- \pi^0 \nu_\tau$	(25.95 ± 0.09) %	S=1.1
$\Gamma_{14}$	$\pi^- \pi^0 \nu_\tau$	[a] (25.52 ± 0.09) %	S=1.1
$\Gamma_{15}$	$\pi^- \pi^0$ non- $\rho(770) \nu_\tau$	(3.0 ± 3.2) × 10 <sup>-3</sup>	
$\Gamma_{16}$	$K^- \pi^0 \nu_\tau$	[a] (4.29 ± 0.15) × 10 <sup>-3</sup>	
$\Gamma_{17}$	$h^- \geq 2 \pi^0 \nu_\tau$	(10.87 ± 0.11) %	S=1.2
$\Gamma_{18}$	$h^- 2 \pi^0 \nu_\tau$	(9.52 ± 0.11) %	S=1.1
$\Gamma_{19}$	$h^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	(9.36 ± 0.11) %	S=1.2
$\Gamma_{20}$	$\pi^- 2 \pi^0 \nu_\tau$ (ex. $K^0$ )	[a] (9.30 ± 0.11) %	S=1.2

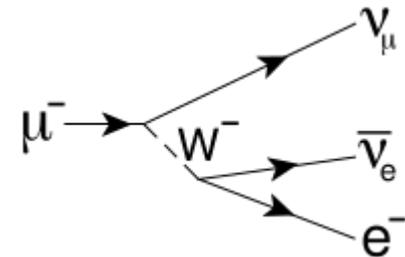


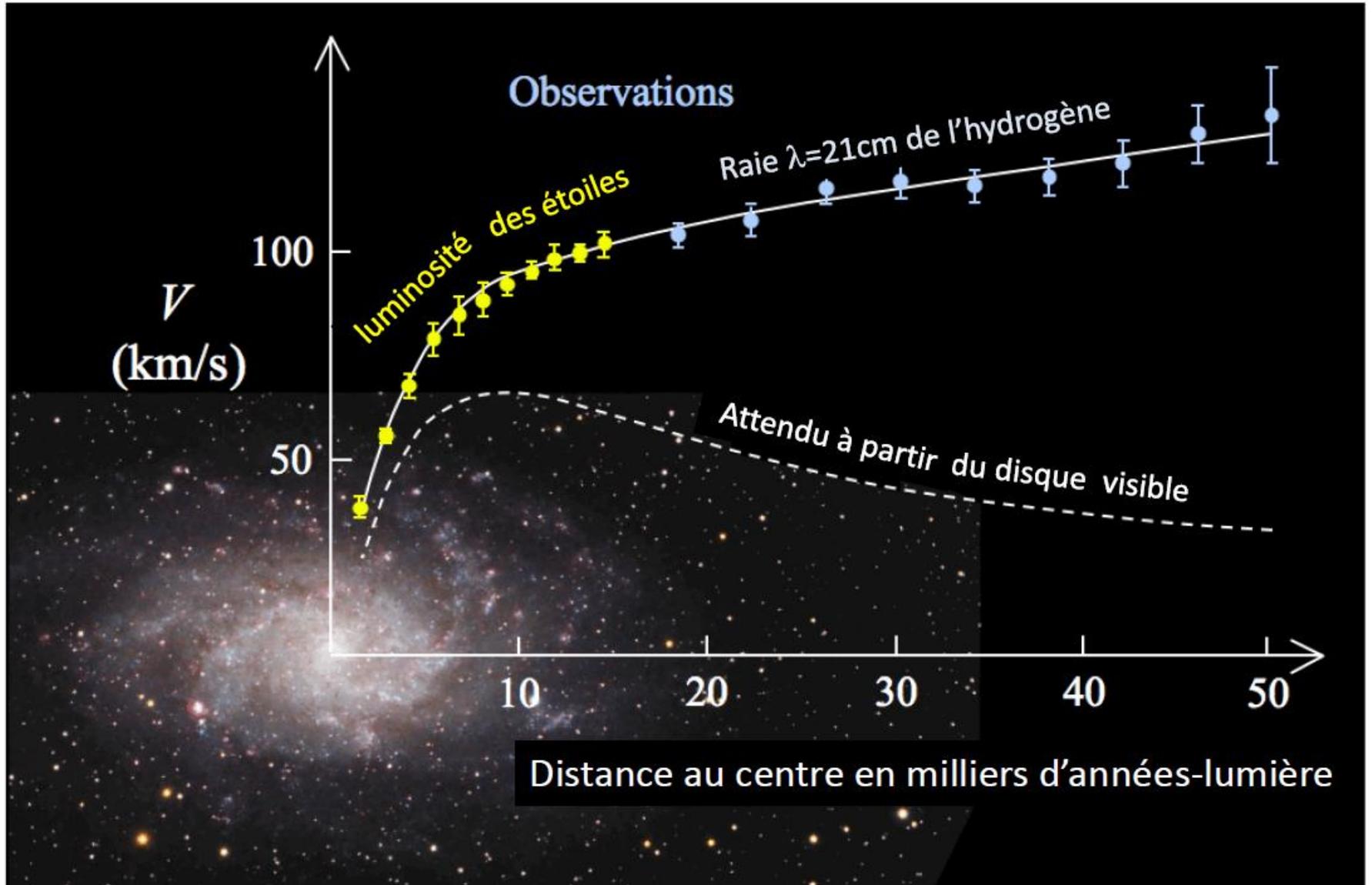
Et leurs anti-particules....

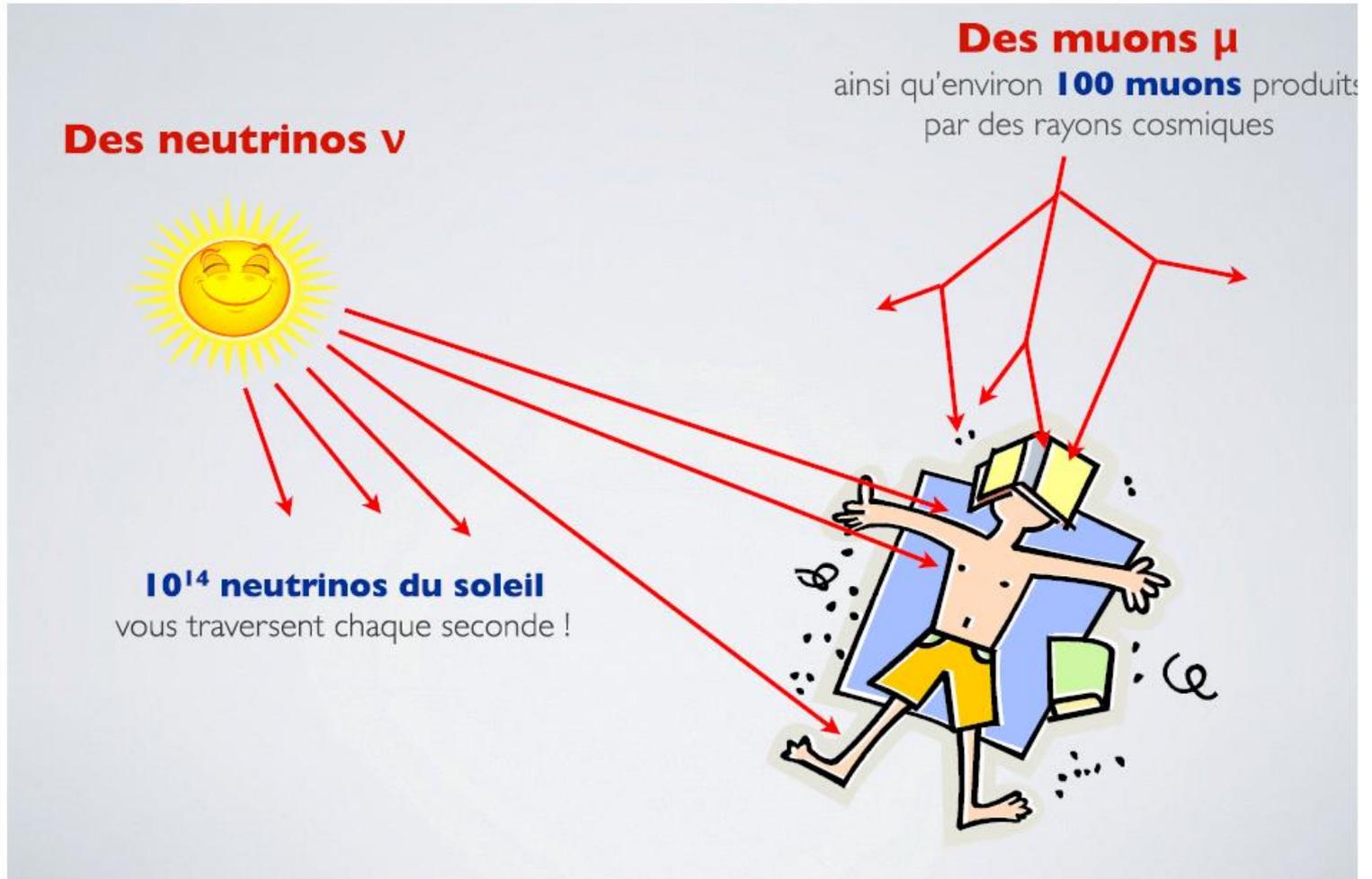


## Description relativiste quantique des particules élémentaires

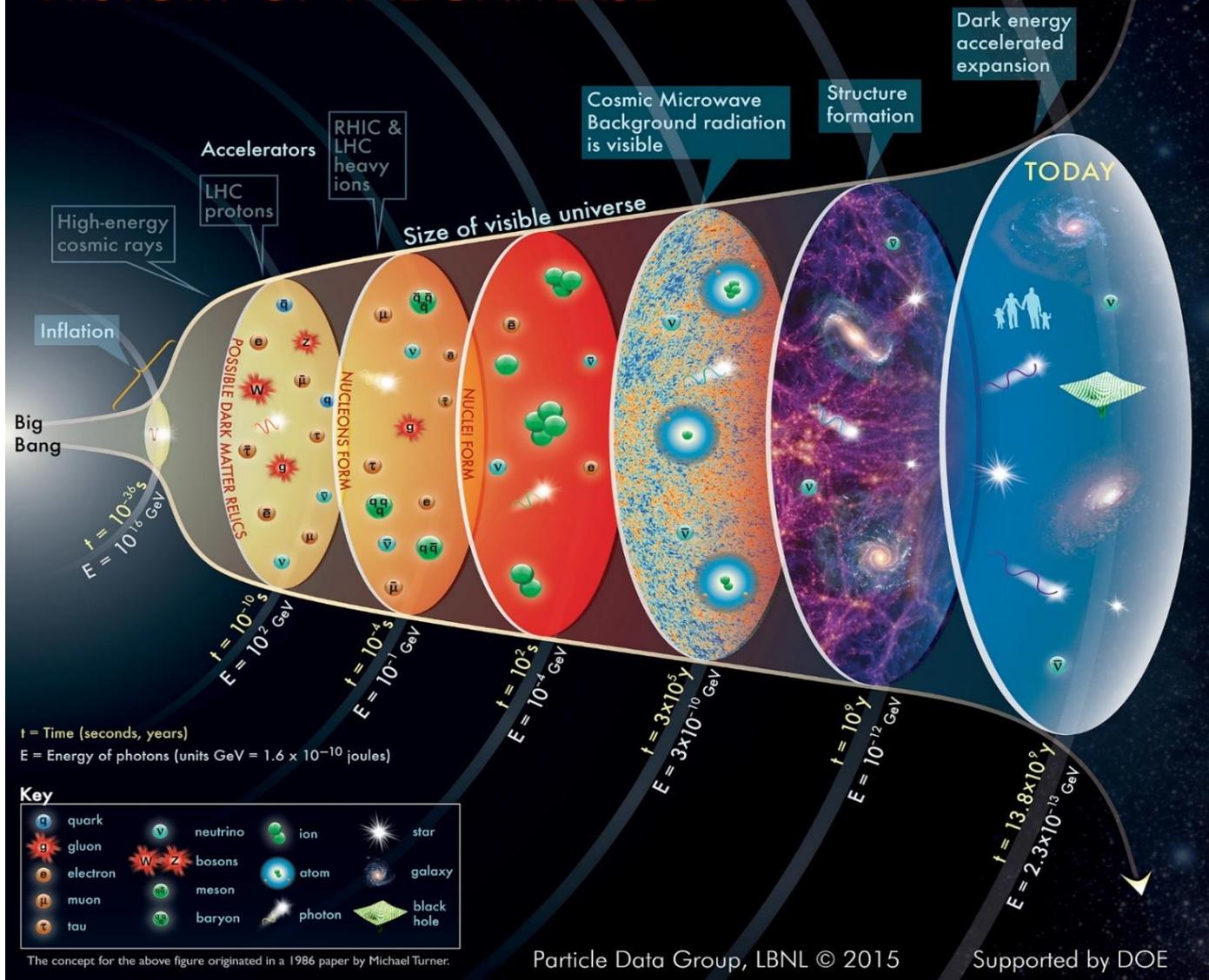
- Relativiste:
  - “ $E=mc^2$ ” : nombre de particules non conservé
  - Interaction non instantanée
- Quantique:
  - Énergie quantifiée
  - Amplitude de probabilité
- Interaction:
  - Attraction, repulsion
  - Mais aussi désintégration d'une particule en particules plus légères





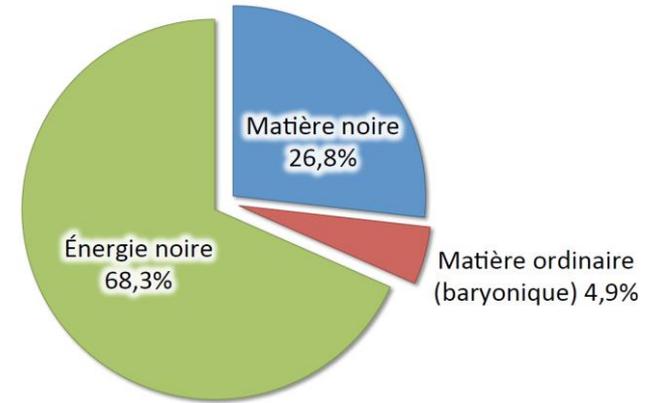


# HISTORY OF THE UNIVERSE

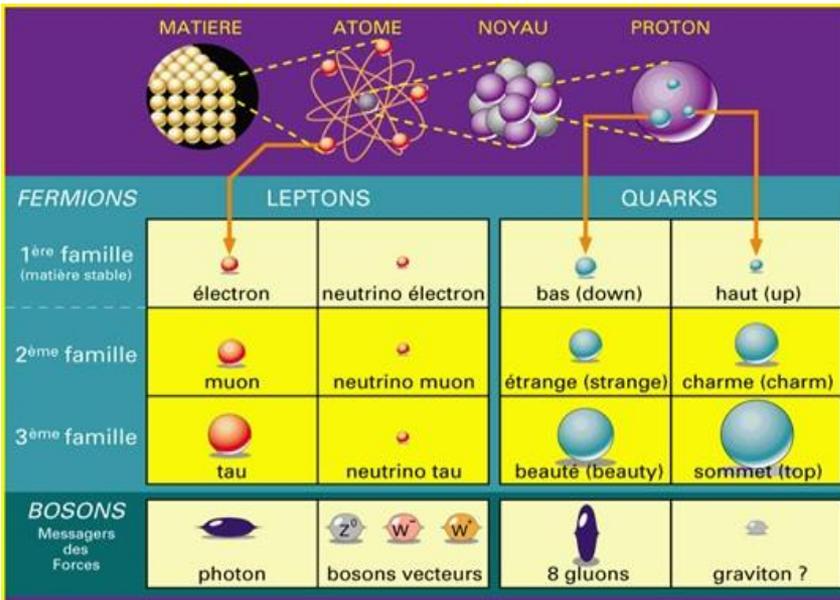


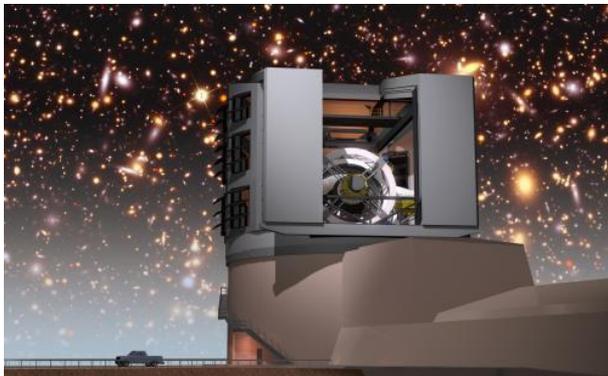
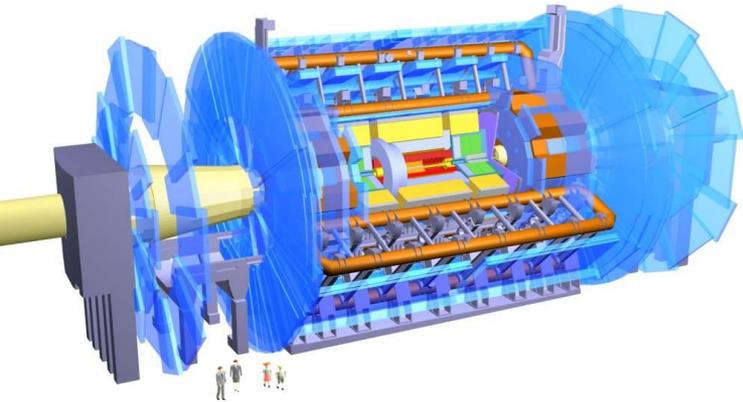
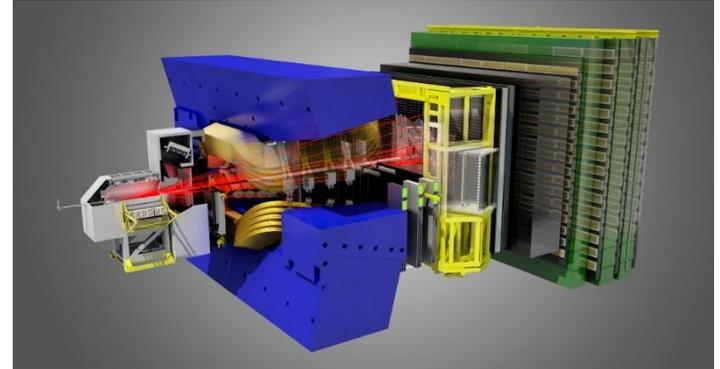
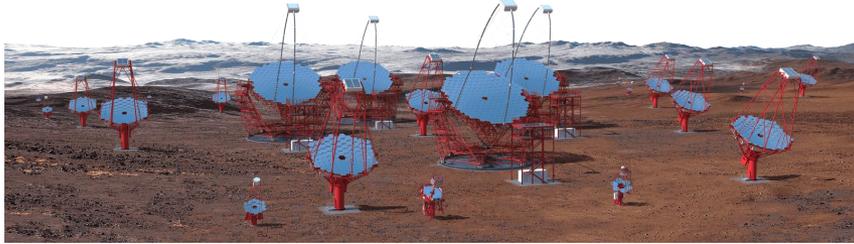
James Peeble

- De quoi est constituée la matière noire ?
- Y a-t'il une « énergie noire » ?

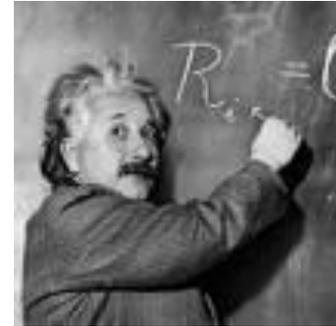


- Pourquoi n'observe-t'on pas d'antimatière dans l'Univers ?
- D'où vient la masse des particules ?  
**le boson de Higgs ! (2012)**
- Existe-t'il d'autres particules très massives ?
- ...

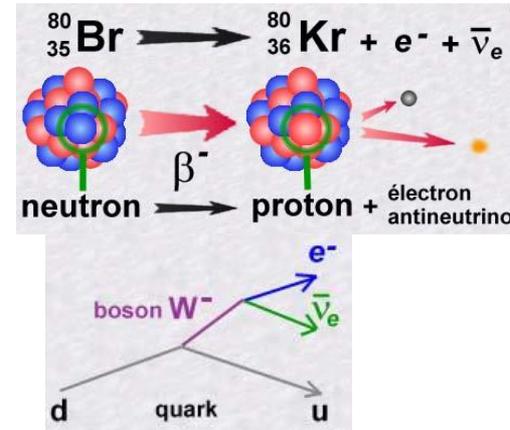
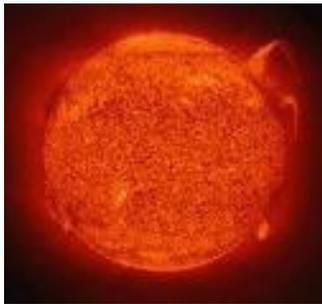




En 1905, Einstein montre l'équivalence masse-énergie par sa célèbre équation  $E = mc^2$



⇒ on peut donc créer de l'énergie à partir de la masse

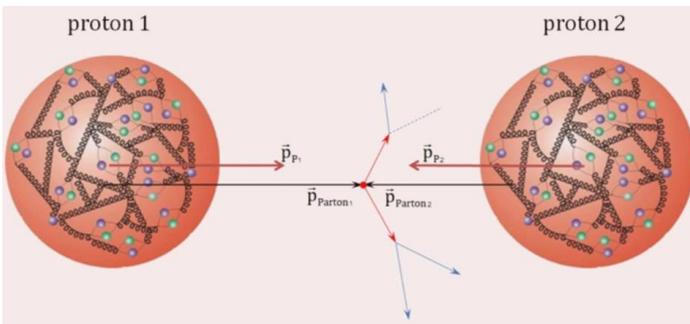
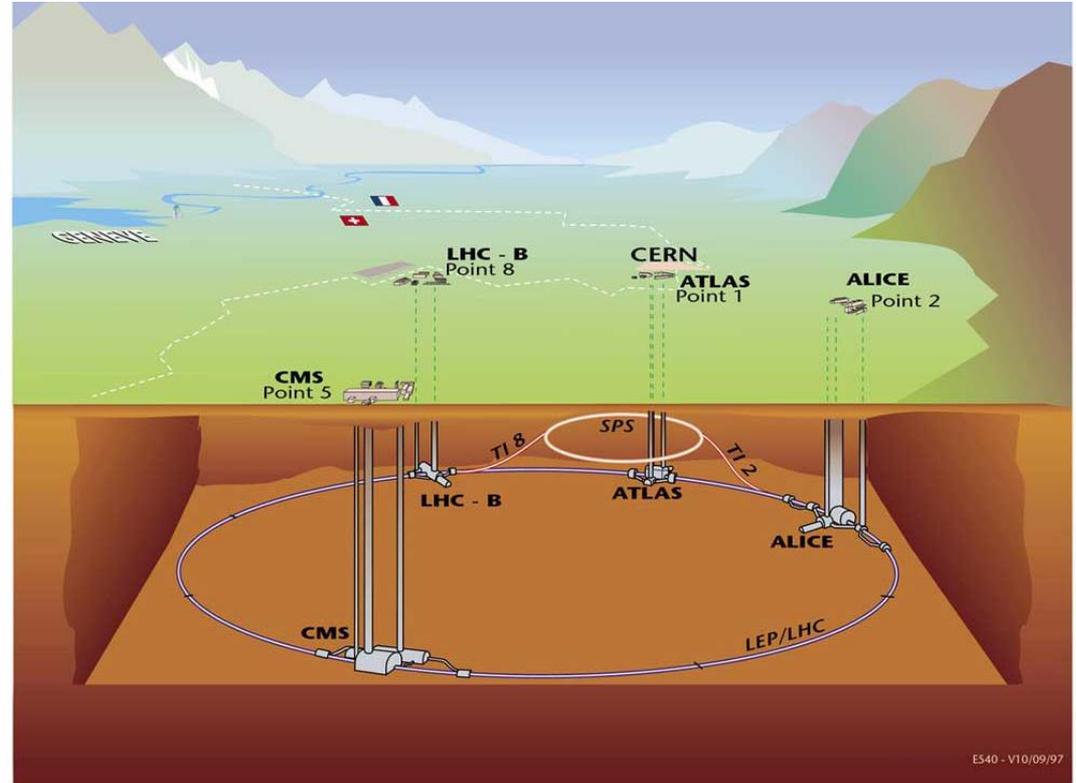


⇒ et de la masse (particules lourdes) à partir d'énergie

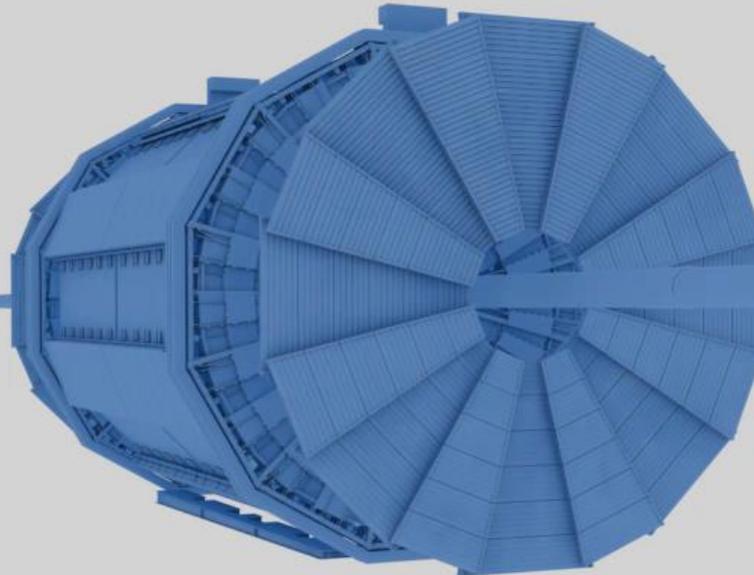
$$e^{+} + e^{-} \rightarrow Z$$

$$q + q \rightarrow H$$

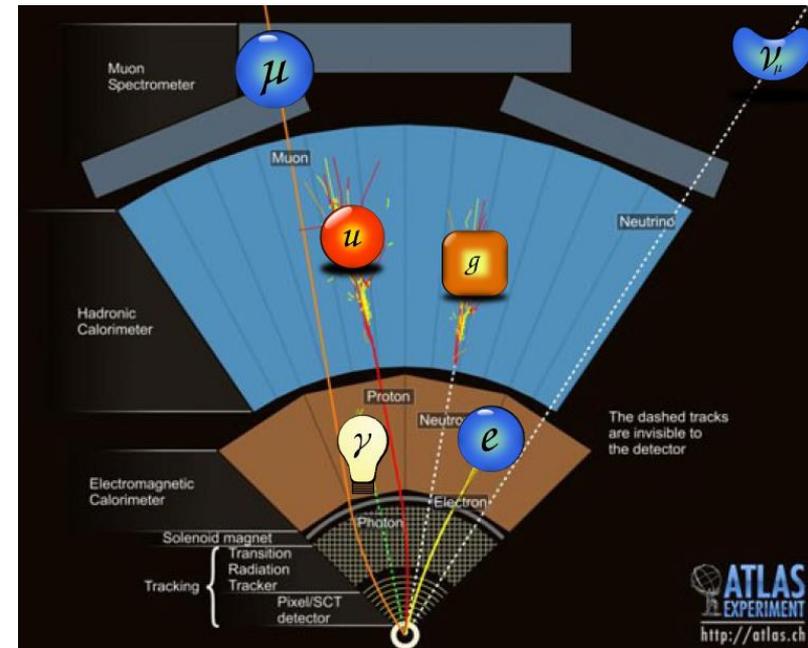
**LHC** = **L**arge **H**adron **C**ollider (hadrons: protons, noyaux de Plomb,...)



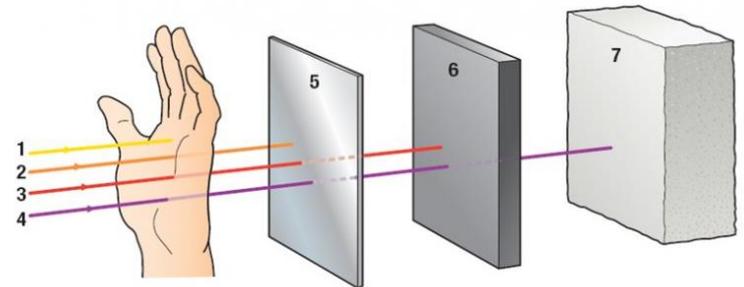
- Faisceaux de protons accélérés à 99,999999% de la vitesse de la lumière
- $3 \times 10^{14}$  protons par faisceau
- $40 \times 10^6$  croisements par seconde

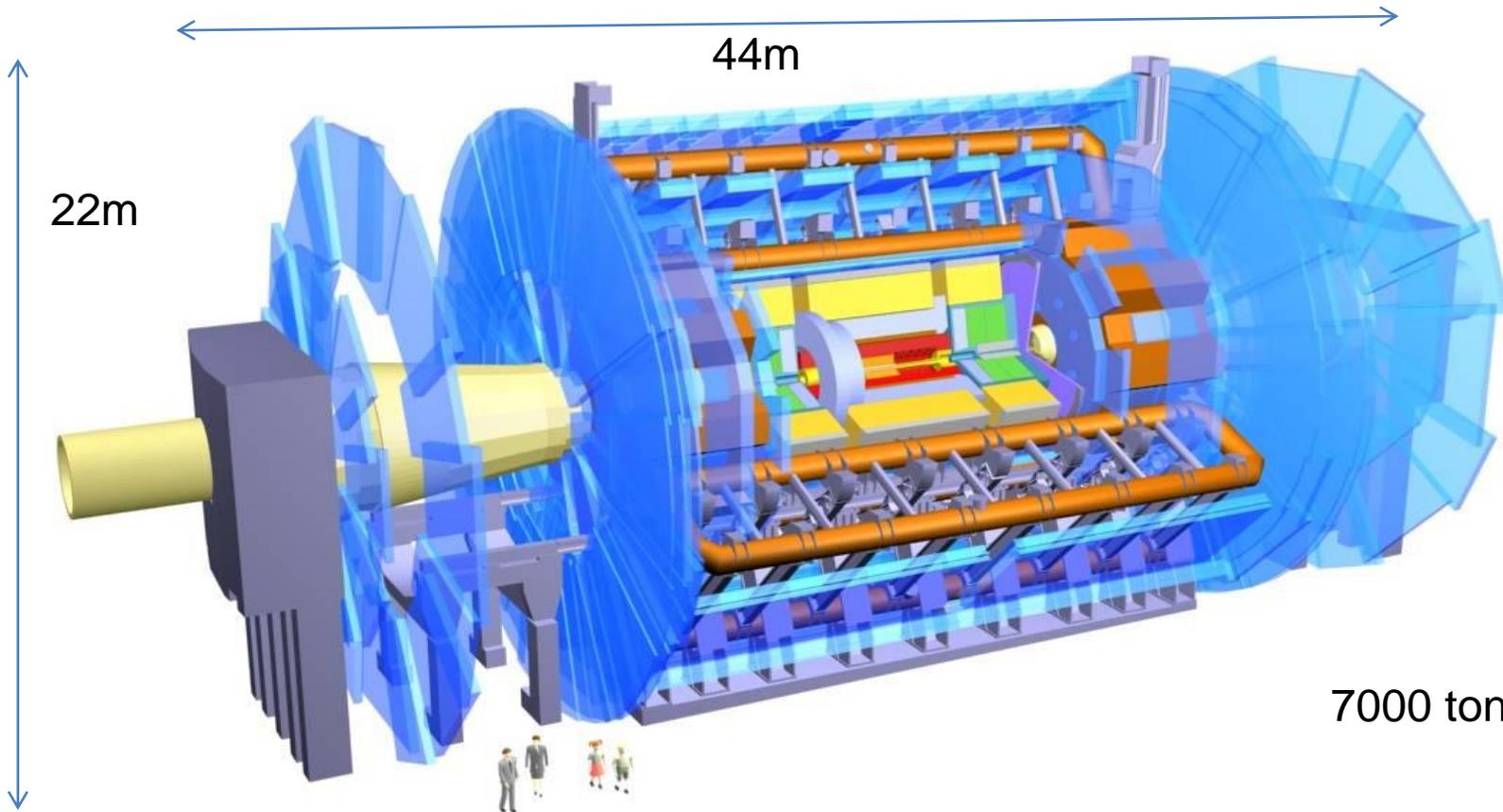


- Détecteur dédiés pour la mesure de:
  - Trajectoire
  - Charge
  - Energie
  - La façon d'interagir avec la matière
    - Certaines interagissent beaucoup avec la matière
    - D'autres très peu
- Et ainsi reconnaître la particule ( $e, p, \mu, \gamma, \dots$ ) ayant laissé la trace et connaître ses caractéristiques
  - masse
  - impulsion
  - énergie

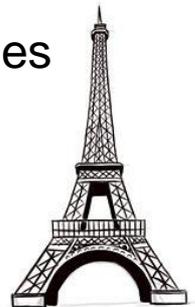


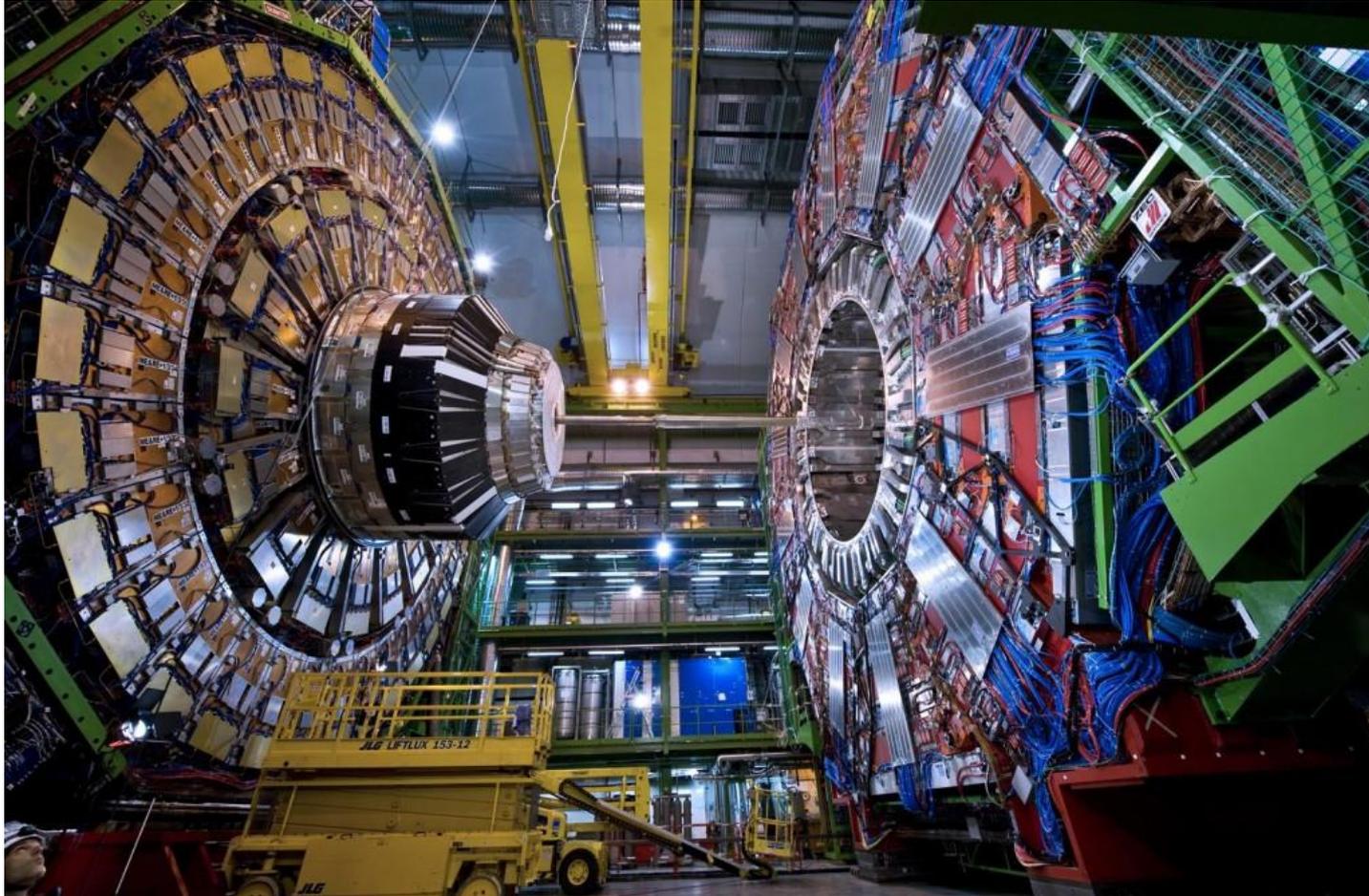
- |                    |              |
|--------------------|--------------|
| 1. Alpha           | 5. Aluminium |
| 2. Bêta            | 6. Plomb     |
| 3. Gamma, rayons X | 7. Béton     |
| 4. Neutrons        |              |



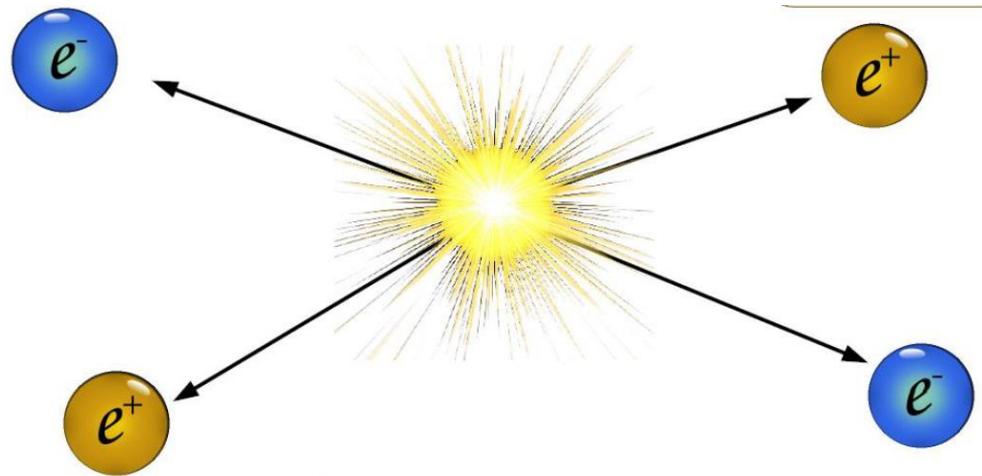


7000 tonnes

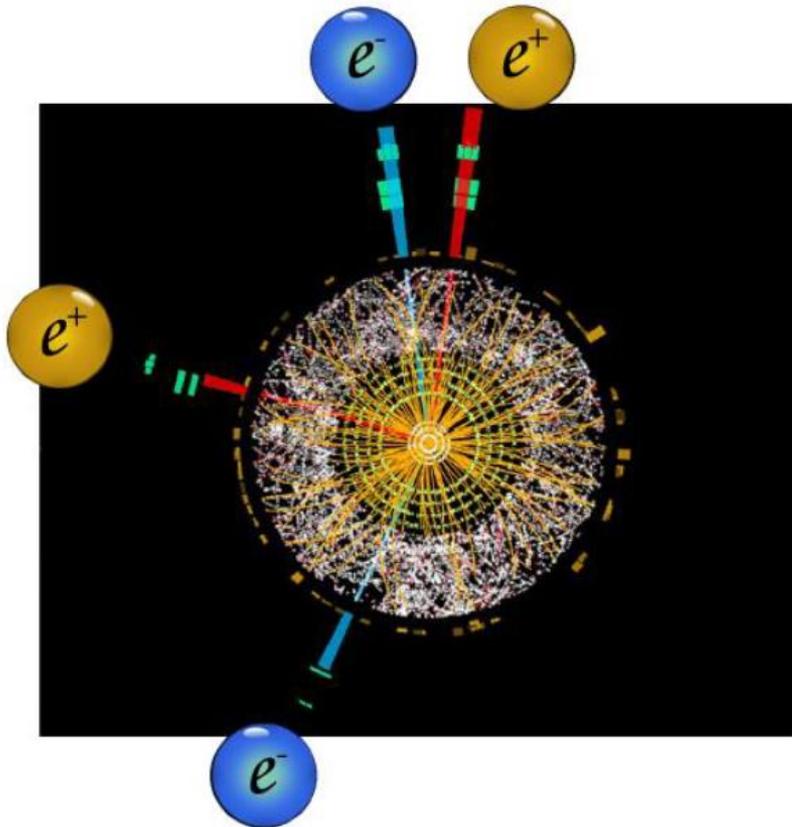




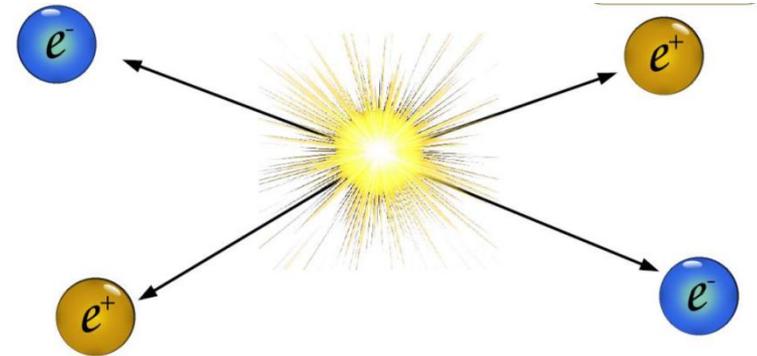
- Le boson de Higgs a une durée de vie très courte et se désintègre dès qu'il est produit en des particules qu'on connait bien



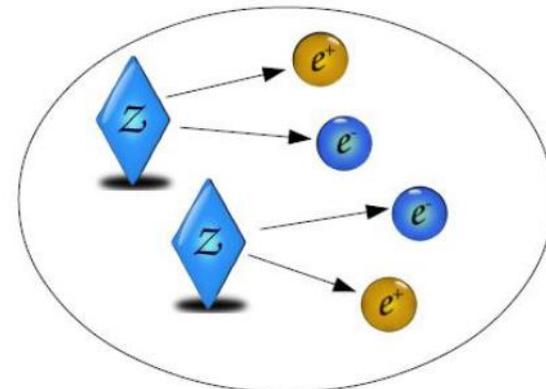
- Il faut donc détecter ses produits de désintégration



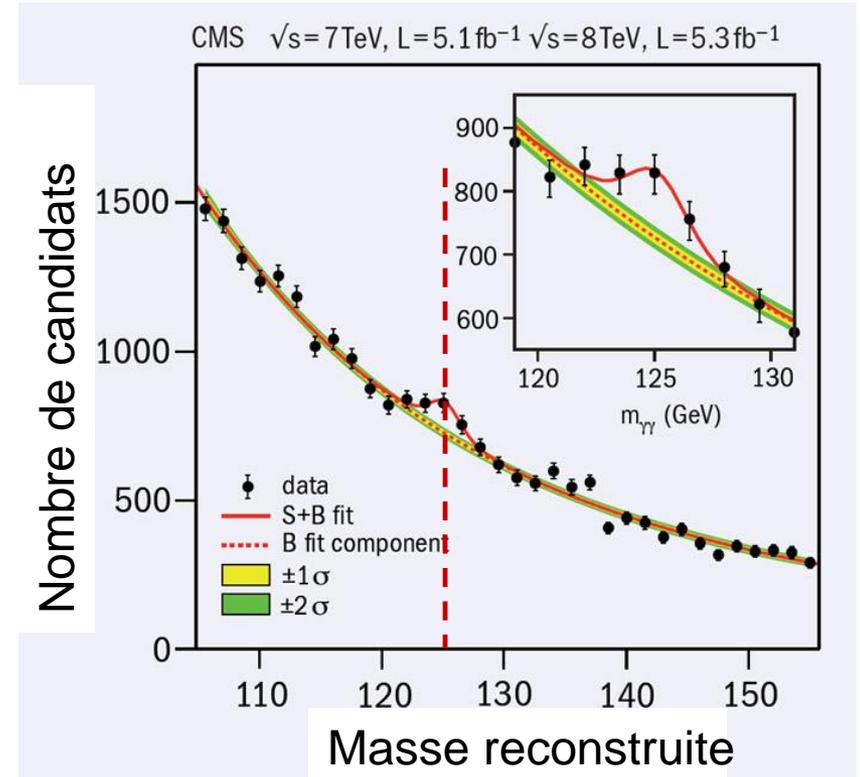
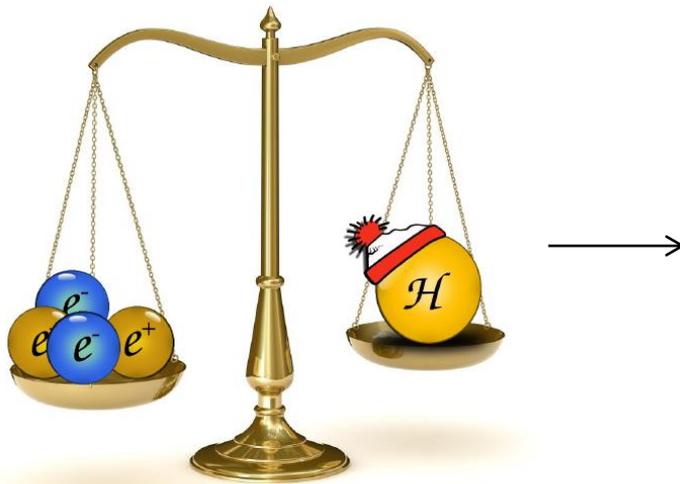
- Est-ce un boson de Higgs?



- Ou deux Z?



- Energies + impulsions  $\Rightarrow$  **masse invariante de la particule «mère»**

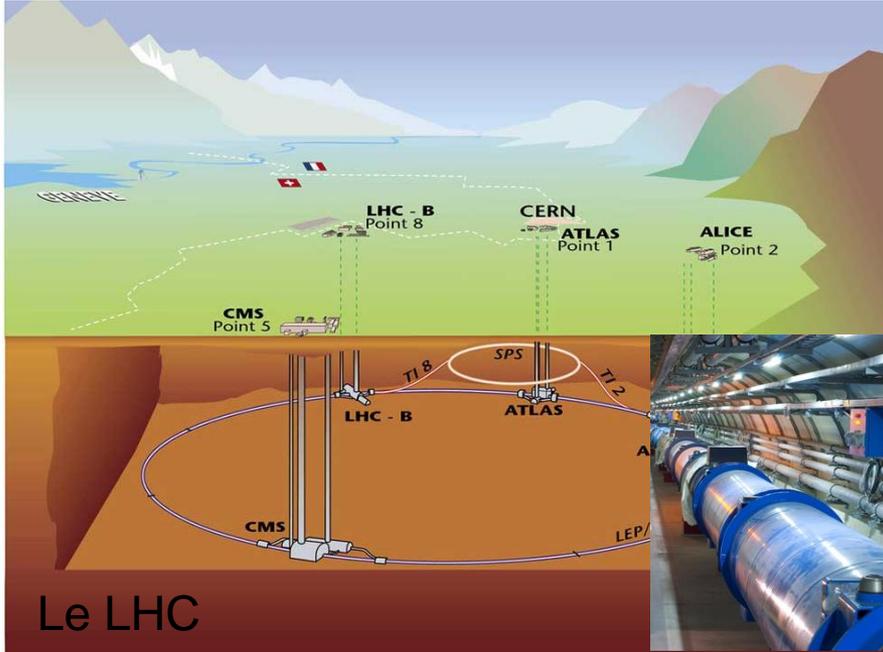


$\Rightarrow$  On a trouvé une nouvelle particule à une masse de 125 GeV

le 4 juillet 2012

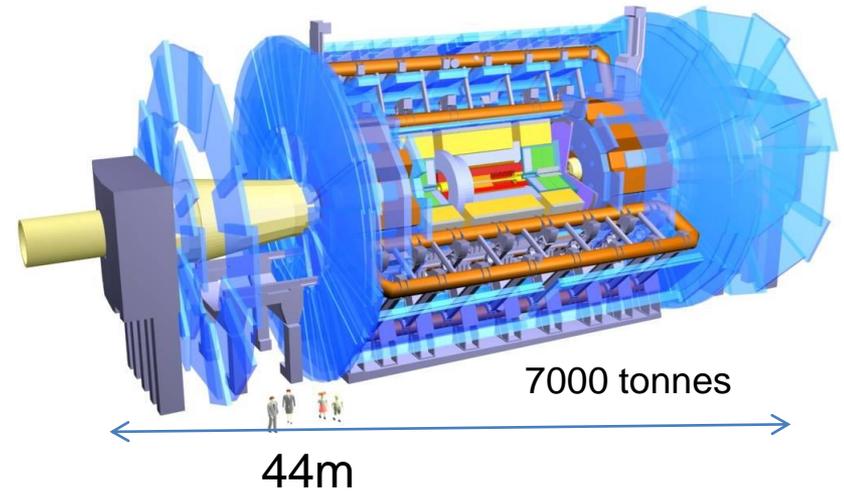


⇒ Expériences auprès d'accélérateurs (LHC du Cern)...



Le LHC

ATLAS au CERN



... ou de réacteurs (ILL,...)



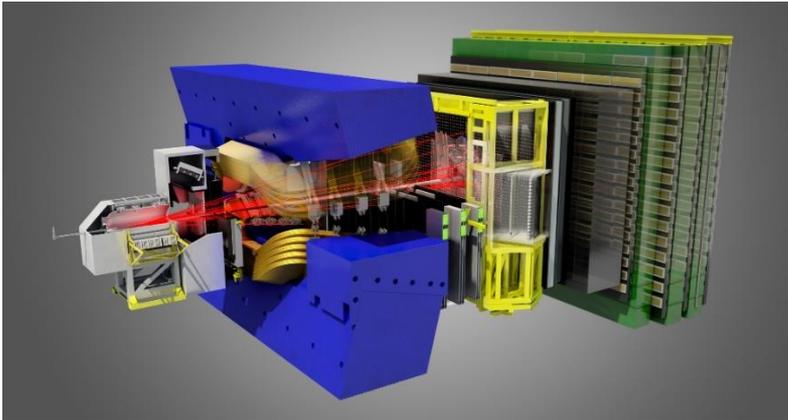
STEREO à l'ILL (Grenoble)



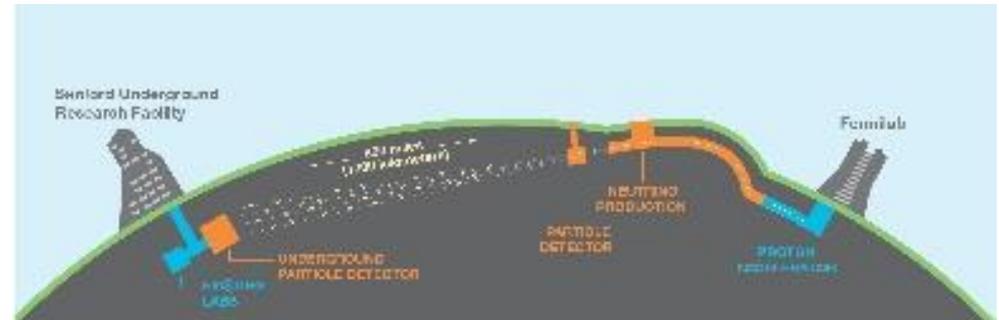
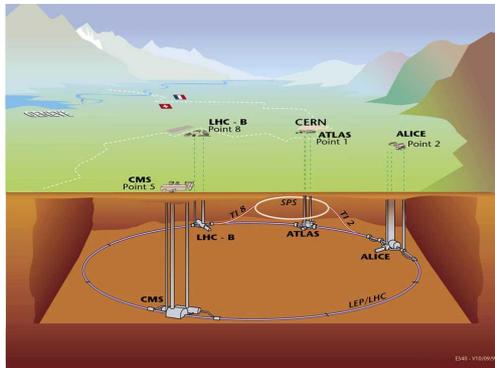
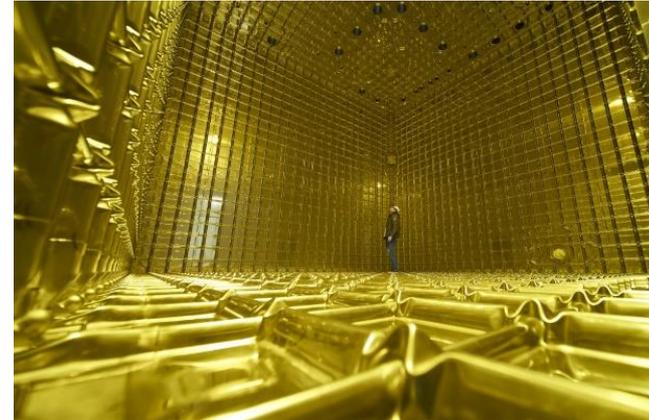
⇒ Expériences auprès d'accélérateurs de particules

mesure des propriétés des particules de matière et d'antimatière

LHCb au CERN

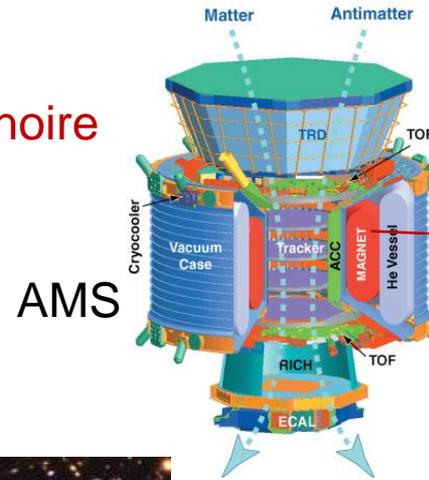


DUNE à Fermilab (USA)

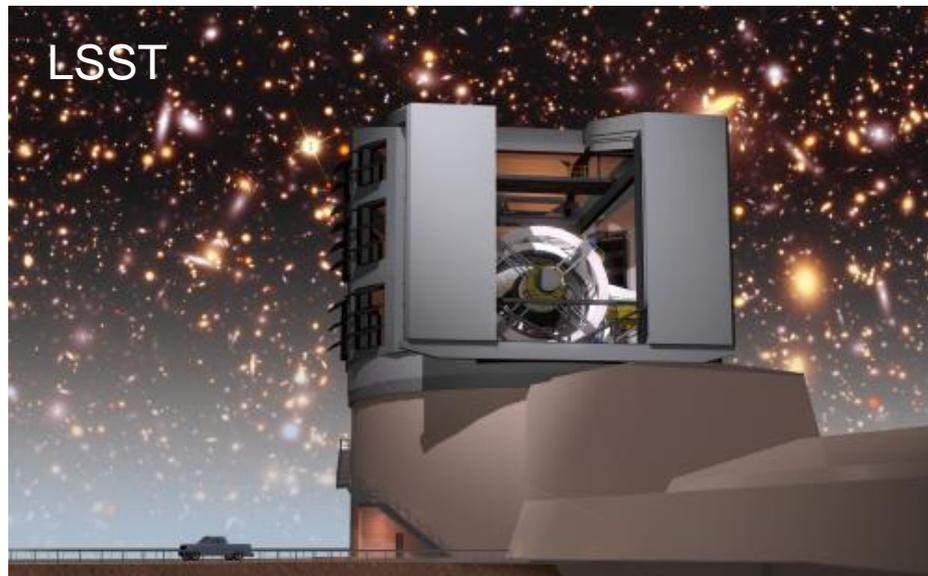


⇒ Expériences dans l'espace et télescopes sur terre... mais aussi accélérateurs

Détecter des particules de matière noire et caractériser la matière noire

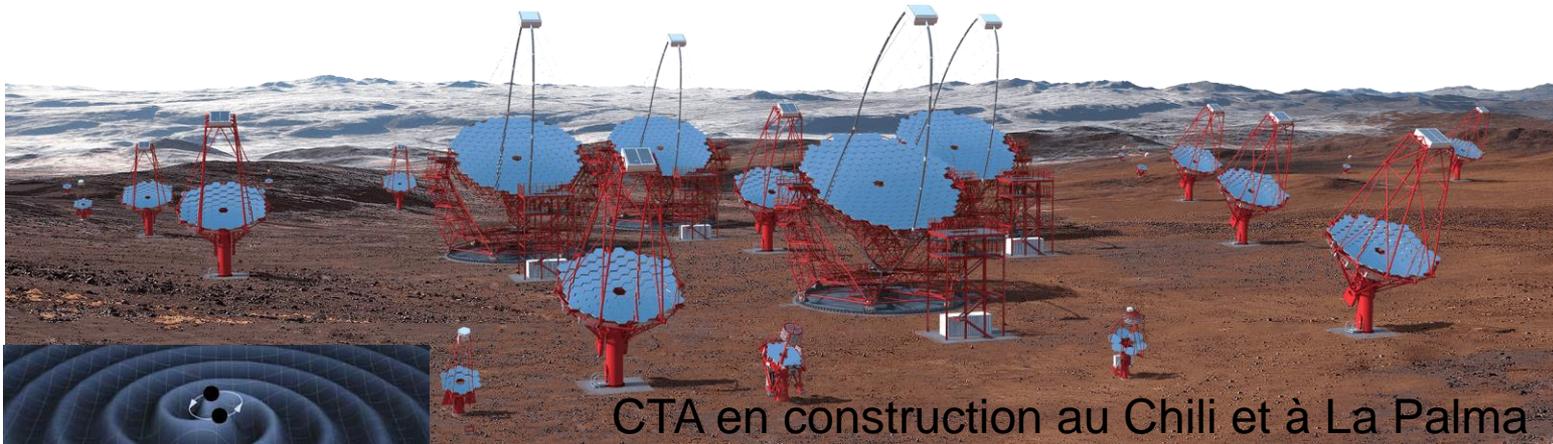


AMS sur la station spatiale internationale



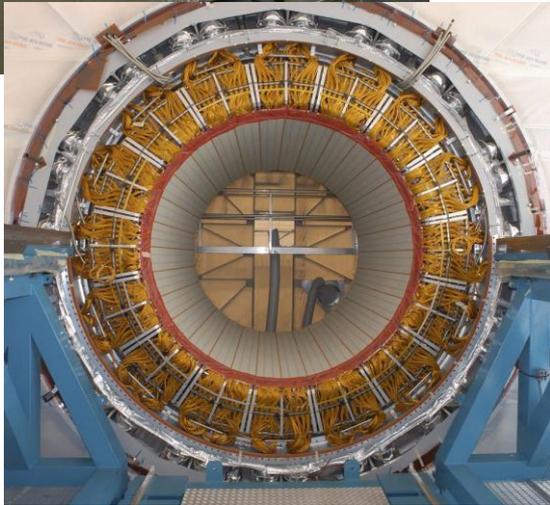
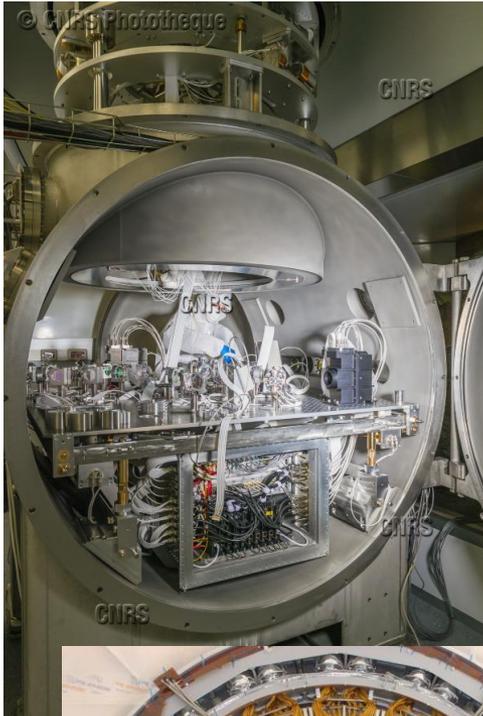
⇒ Télescopes et interféromètre laser géant

Détecter les rayons cosmiques et les ondes gravitationnelles



Découverte des ondes gravitationnelles en 2016





Les services techniques:

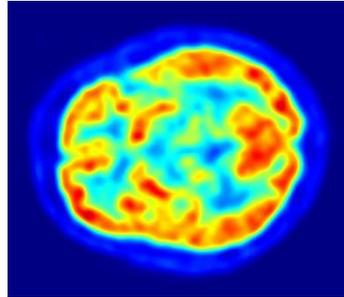
- mécanique
- électronique
- informatique

~ 80 ingénieurs et techniciens



Salle de calcul MUST

## Imagerie médicale



## Grille de calcul

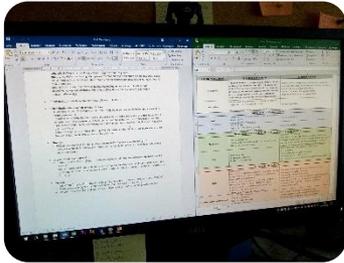


## Hadronthérapie



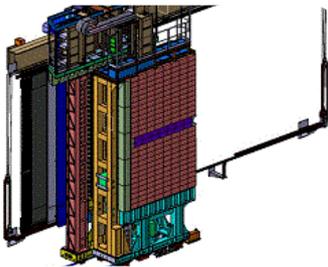
## World Wide Web





## Support administratif

- Ressources humaines
- Gestion des commandes et missions
- Assistance de direction, communication...



## Ingénierie

- Conception assistée par ordinateur
- Programmation
- Conception de circuits électroniques...



## Technique

- Fabrication de pièces
- Montage d'instruments scientifiques
- Maintenance des équipements...

- Des expérimentateurs (~35) chercheurs et enseignant-chercheurs

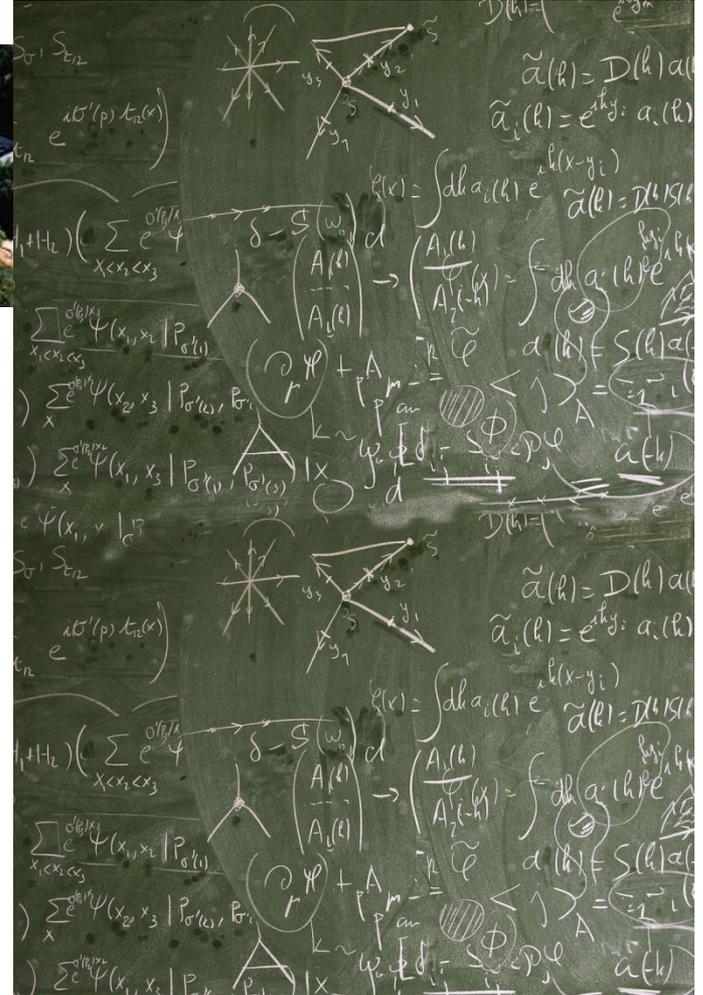
Au sein de grandes collaborations internationales, ils conçoivent, construisent et interprètent les résultats des expériences.

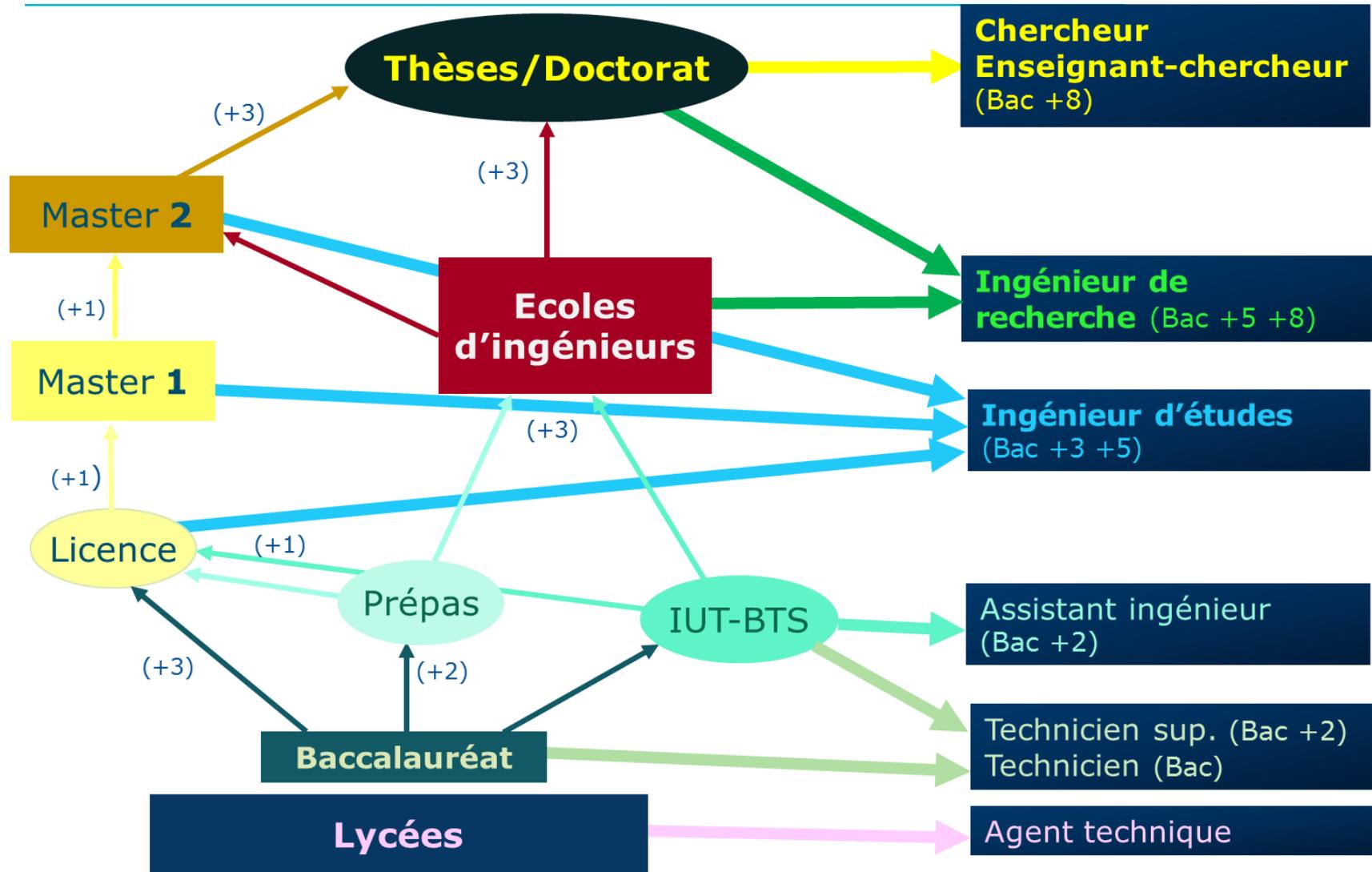
- Des étudiants (en thèse ou en stage) (~ 20)
- Des ingénieurs et techniciens (~ 70)

En informatique, électronique et mécanique : ils réalisent les détecteurs.

- Des administratifs (~ 10)

Pour effectuer les commandes, gérer, prévoir, communiquer...





Les chiffres correspondent au nombre d'années d'études  
 Les disciplines étudiées sont: physique, instrumentation, informatique, électronique, mécanique et administration.

- Observation
- Question
- Hypothèses
- Expériences

Chercher



- Publications
- Conférences
- Brevets

Découvrir



- Vulgarisation scientifique

Diffuser



- Enseignement
- Encadrement des étudiants

Former



- Stages
  - Stages d'observation de 3ème et de seconde
    - Sur 3 à 4 jours: introduction aux métiers de la recherche et visite du Cern
  - Stages recherche: L3, M1 et M2 (2 mois à 6 mois)
  - Stages techniques: IUT (2.5 mois), ingénieur (6 mois)

- Visites: de la 6ème à la L3
  - Format classique (1/2 journée):
    - Introduction à la recherche au LAPP
    - Visite d'EUTOPIA
    - Visite du centre de calcul MUST
  - Masterclass du Cern (1 journée):
    - Élèves de Terminale
    - But: se mettre dans la peau d'un chercheur (ex: recherche d'une nouvelle particule avec des données d'ATLAS)
    - Visite du LAPP, exercice de la masterclass, vidéoconférence avec les autres classes ayant participé (en anglais)
  - Fête de la science (1/2 journée):
    - Visite d'EUTOPIA + visite de MUST (lycéens)
    - Ateliers spécifiques: "mesurer les longueurs", "zététique", "jeux video"



- Mesurer les longueurs:
  - Appréhender l'infiniment grand et l'infiniment petit
  - Sensibilisation à l'utilisation d'outils adaptés à l'objet à mesurer
- Zététique:
  - Développer l'esprit critique
  - Analyse d'une vidéo
  - Identification des arguments fallacieux (argument d'autorité, sophisme, appel au complot, appel à la terreur, corrélations fallacieuse, appel à la nature/à l'ancienneté)

# Bonne Visite !

- 9h: accueil
- 9h15-10h Introduction (Edwige Tournefier)
- 10h-11h30 : visite de l'espace découvertes et du centre de calcul
  - Développements techniques pour ATLAS (Nicolas Geffroy)
  - Physique des rayons gammas et développements techniques pour CTA (Gilles Maurin et Nicolas Geffroy)
  - Le centre de calcul MUST (Ludovic Duflot)

