

ATLAS

Cycle de vie d'une expérience

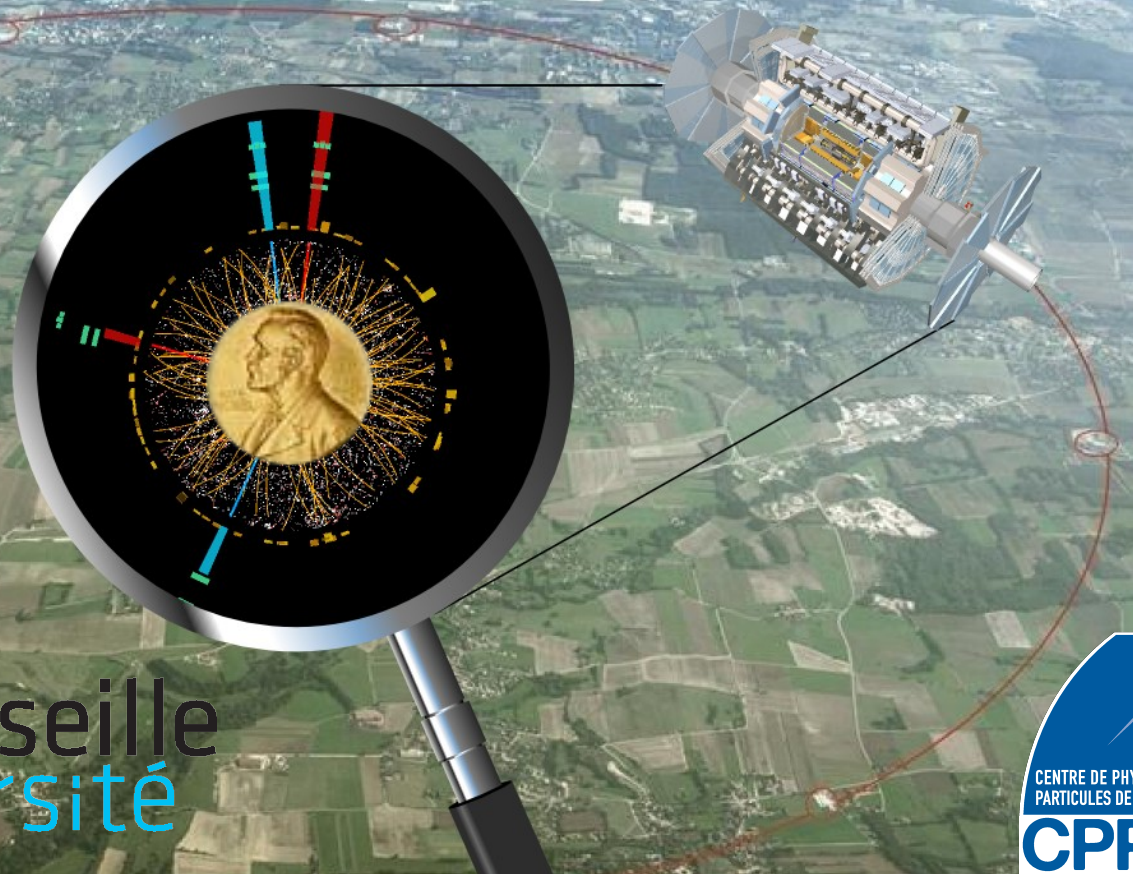
Yann Coadou

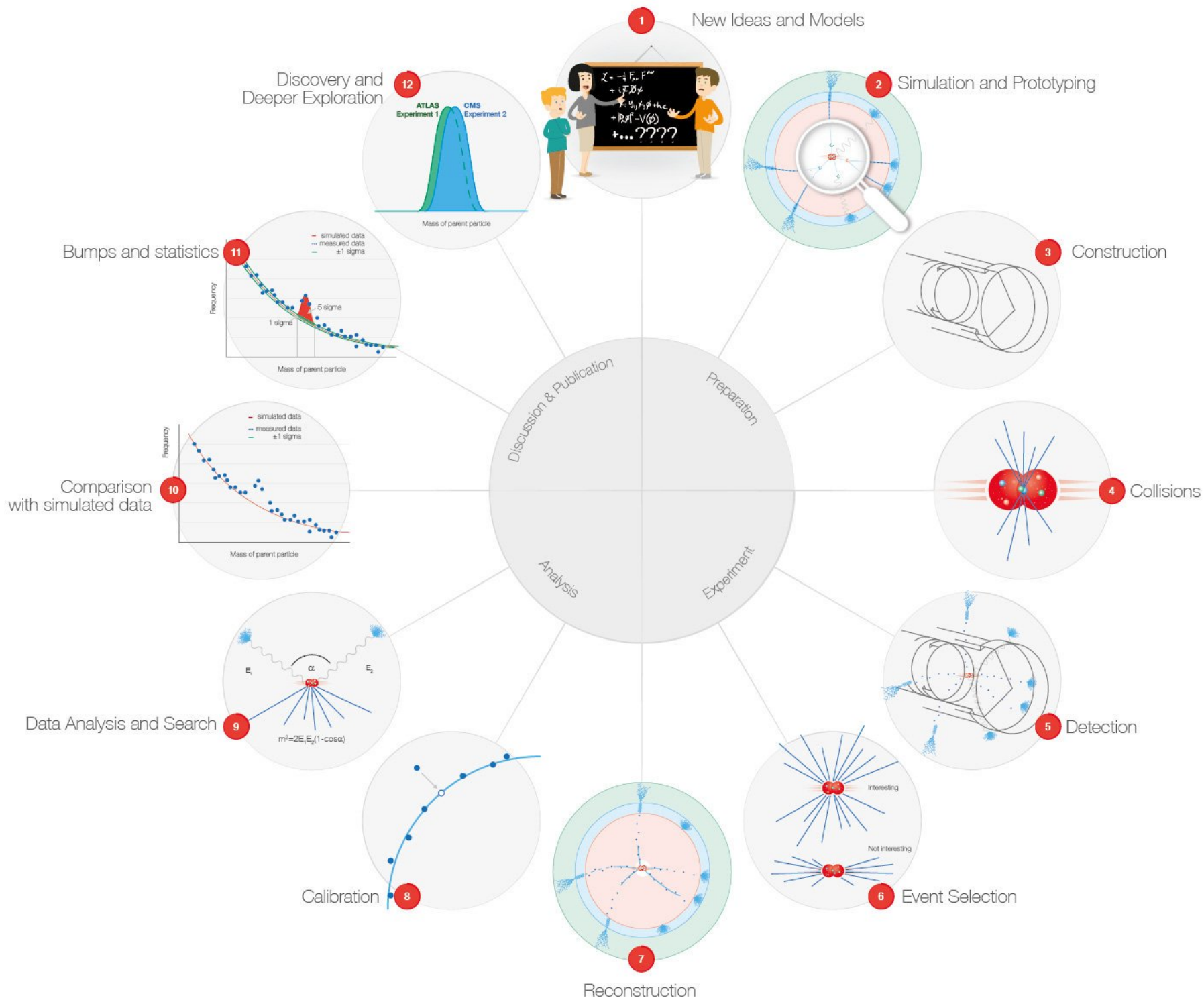
Centre de physique des particules de Marseille

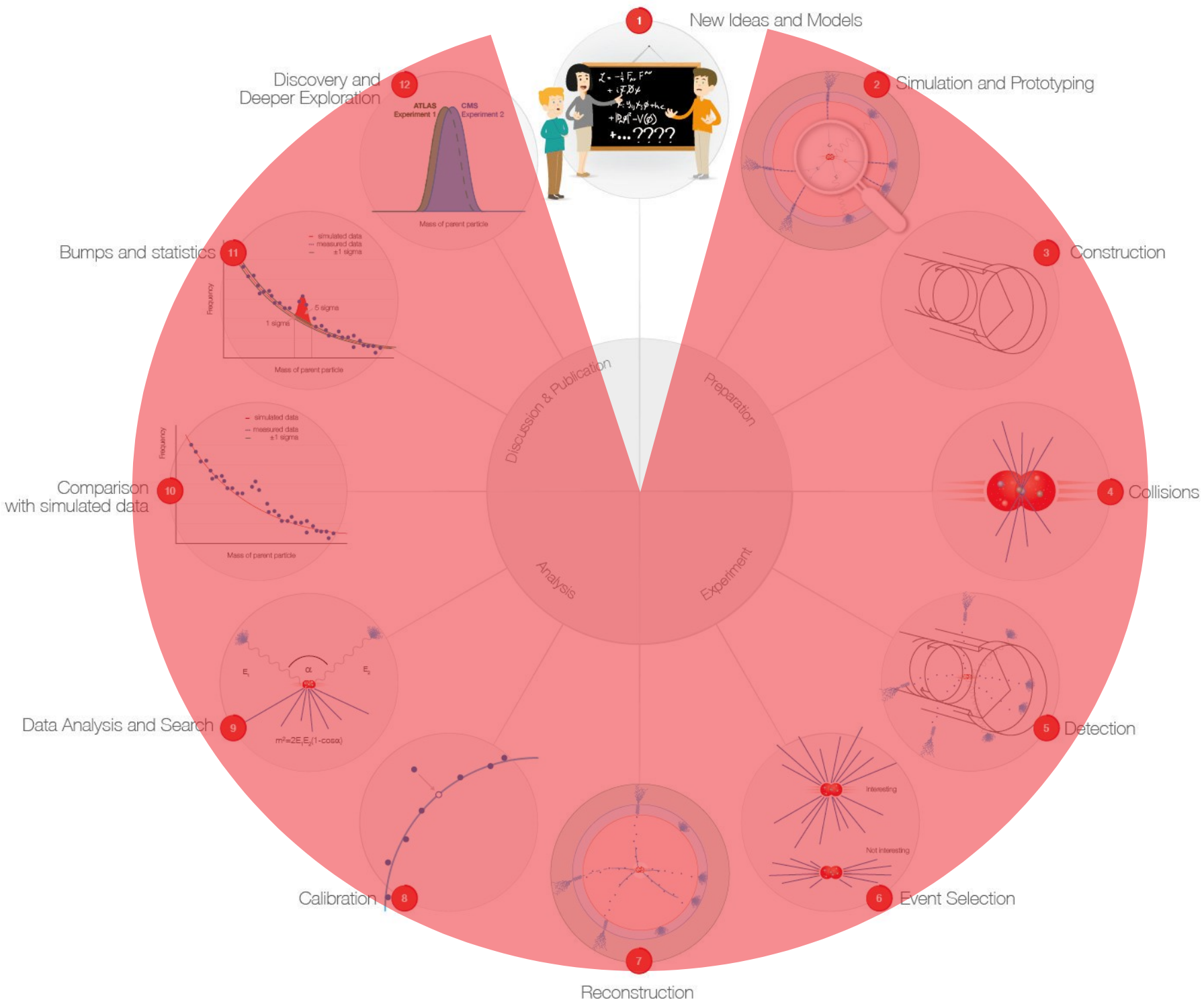
30 avril 2019

Atelier Cinésciences

Lycée René Char







De l'infiniment grand vers l'infiniment petit



La physique des particules

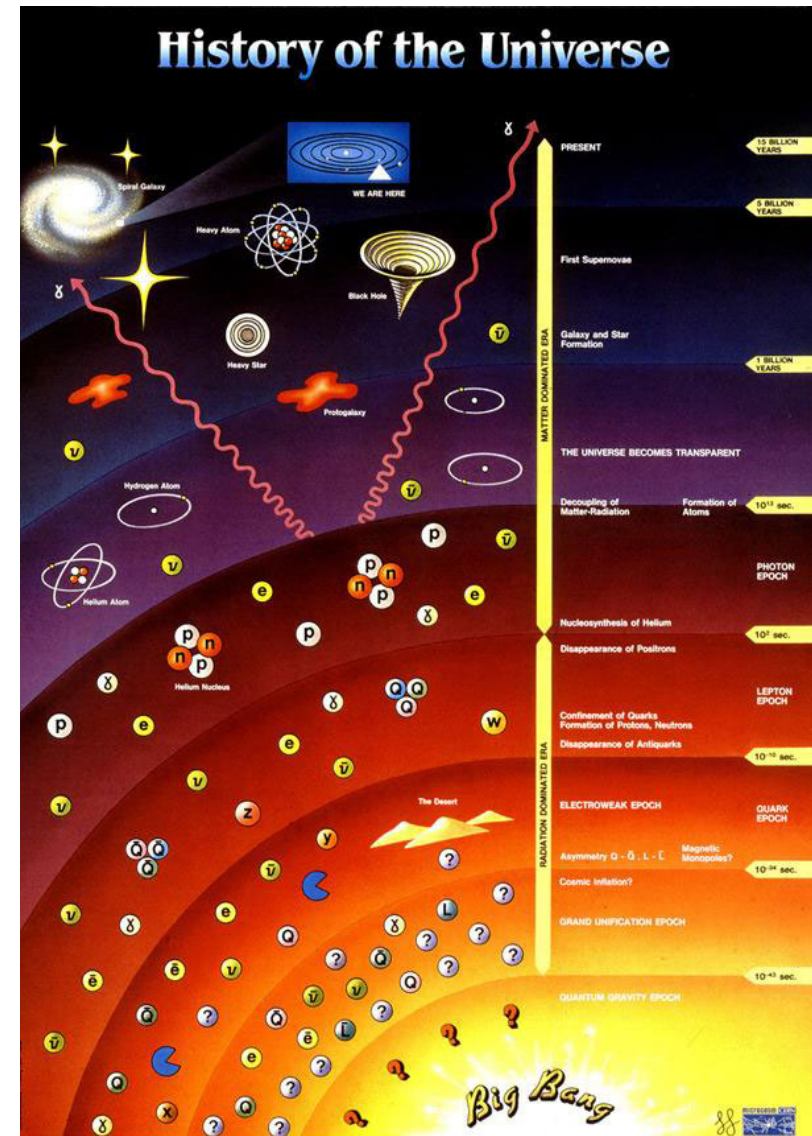
Étude des **constituants élémentaires** de la matière et de leurs **interactions**

- ▶ **constituants élémentaires** : « particules » sans structure interne
- ▶ **interactions** : les forces qui s'exercent entre ces composants élémentaires

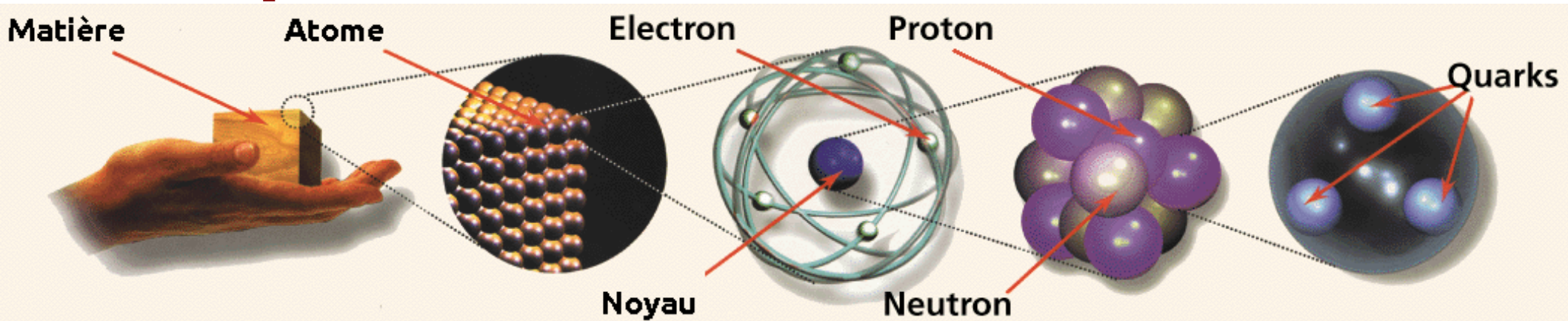
Présentes dans l'univers primordial, dense et chaud

Dans l'univers « froid » d'aujourd'hui, la plupart de ces particules ont maintenant disparu

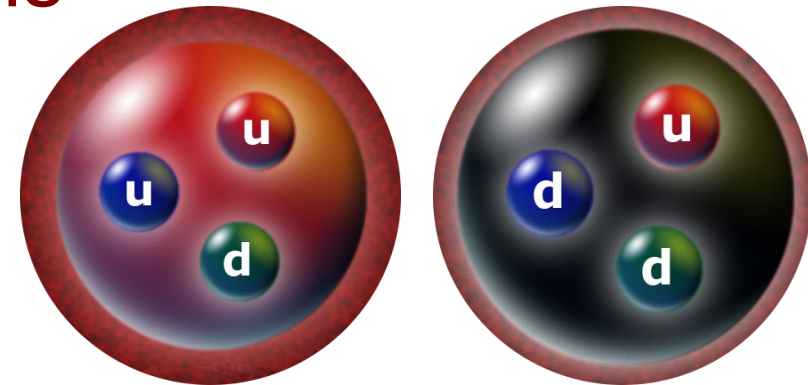
- ▶ **créées artificiellement dans des accélérateurs (collisionneurs) de particules qui reproduisent les conditions existant aux premiers instants de l'univers**
 - plus on accélère les particules,
plus on met d'énergie en jeu,
plus on remonte dans le temps



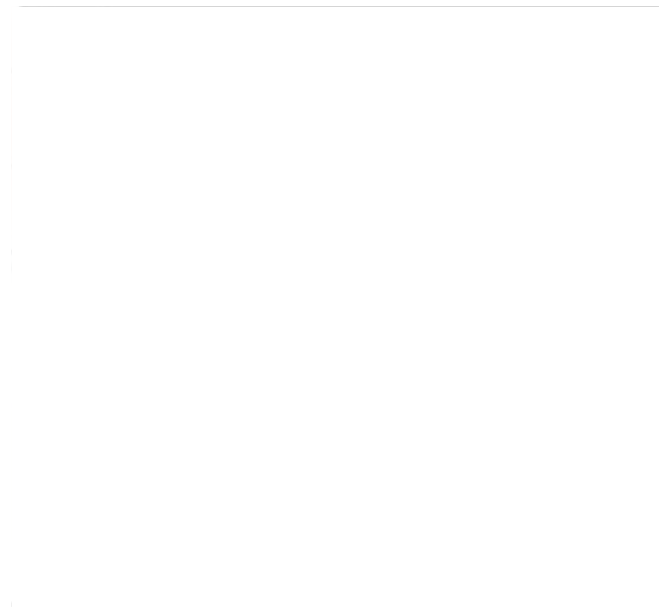
De quoi est fait l'Univers visible ?



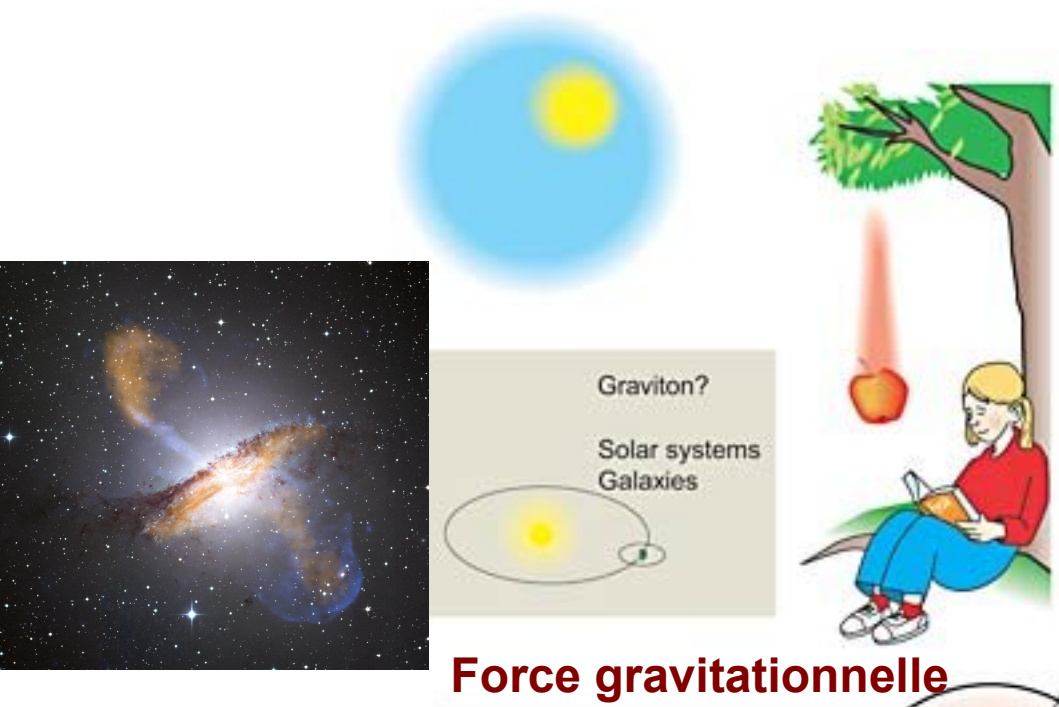
- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**
- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks
- Ils composent les noyaux
- Les électrons gravitent autour des noyaux
- Des **neutrinos** sont émis dans les réactions nucléaires au cœur des étoiles



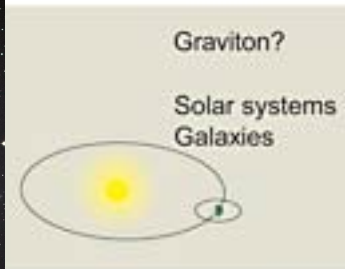
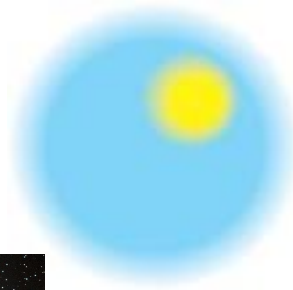
Les forces



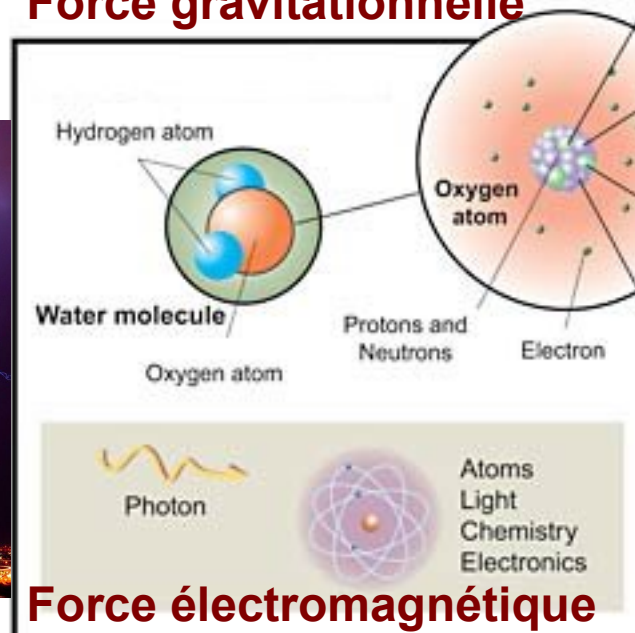
Les forces



Les forces

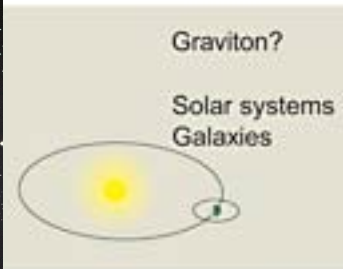
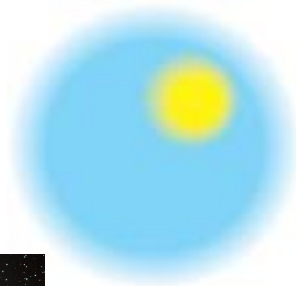


Force gravitationnelle

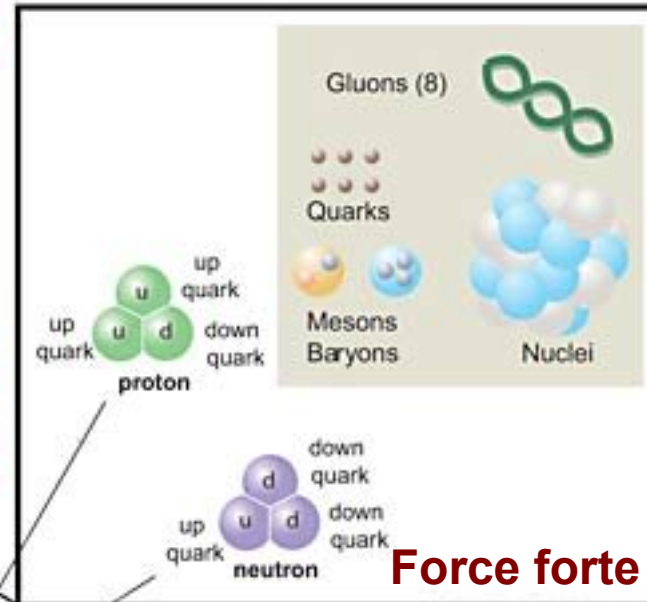


Force électromagnétique

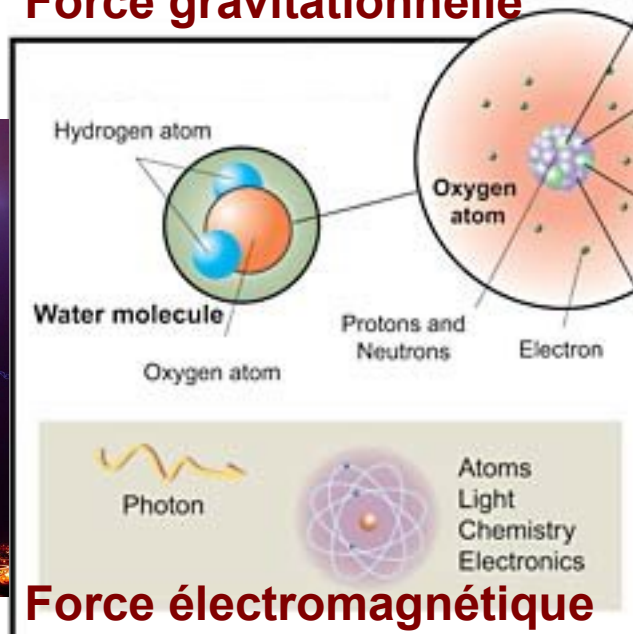
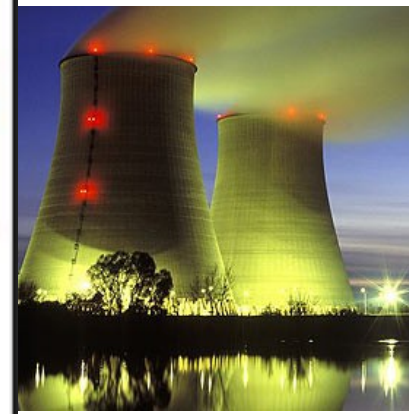
Les forces



Force gravitationnelle



Force forte

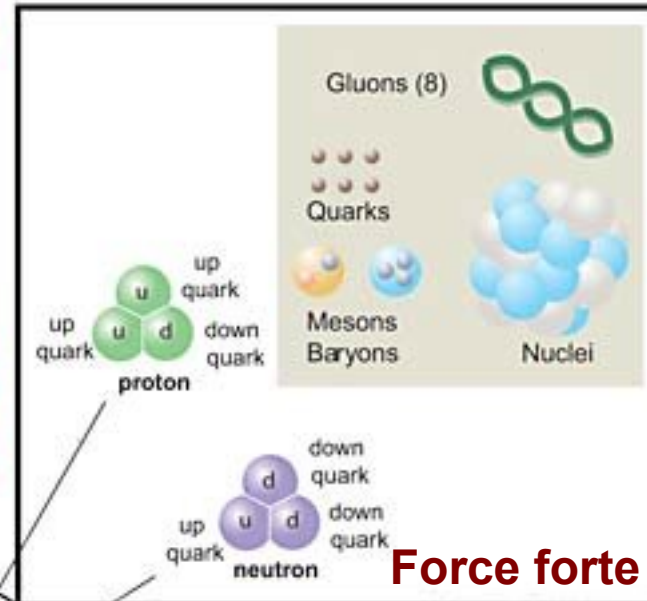


Force électromagnétique

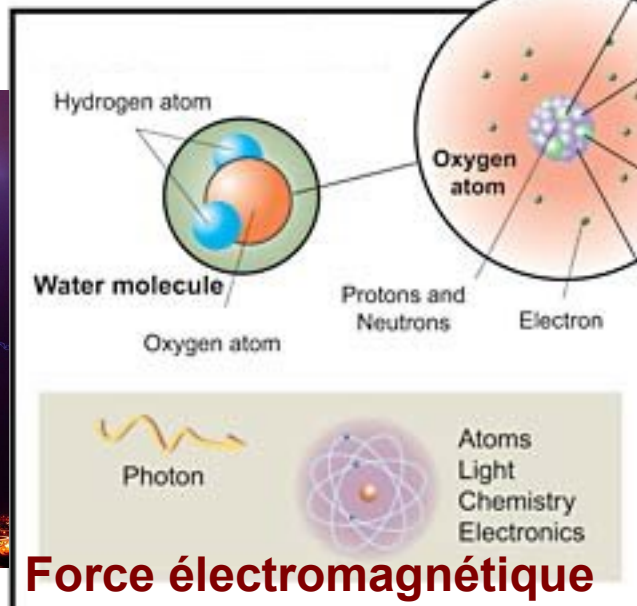
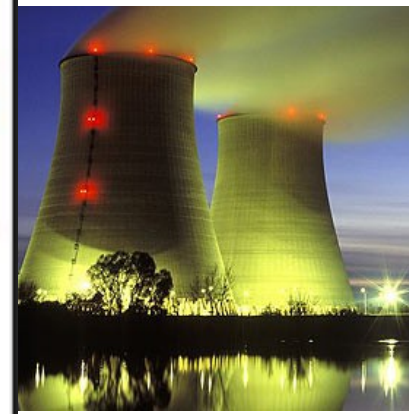
Les forces



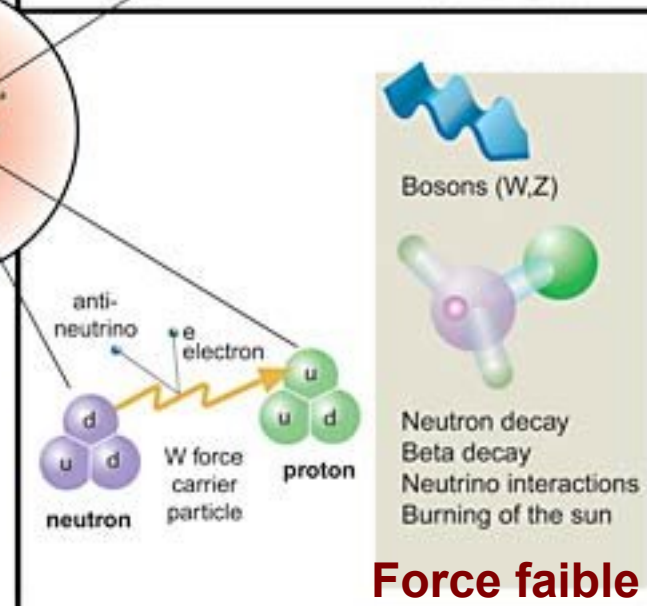
Force gravitationnelle



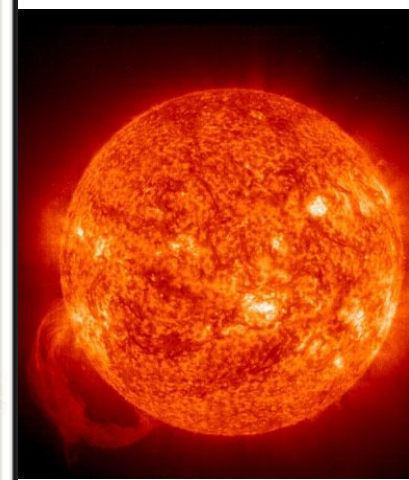
Force forte



Force électromagnétique



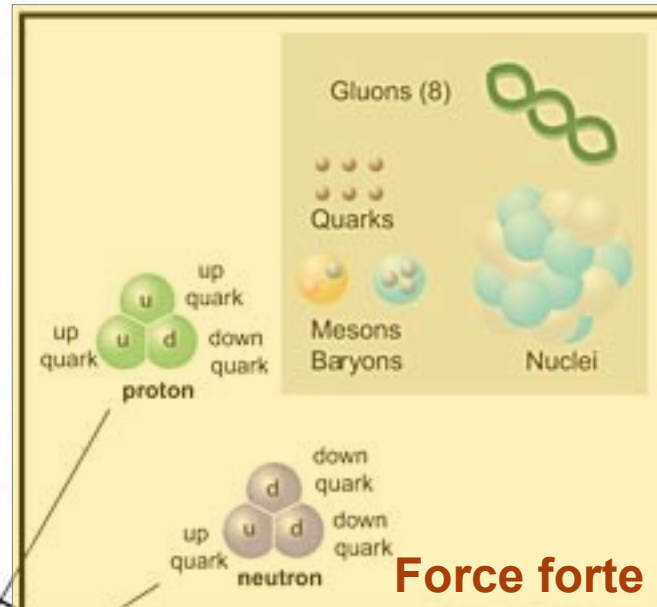
Force faible



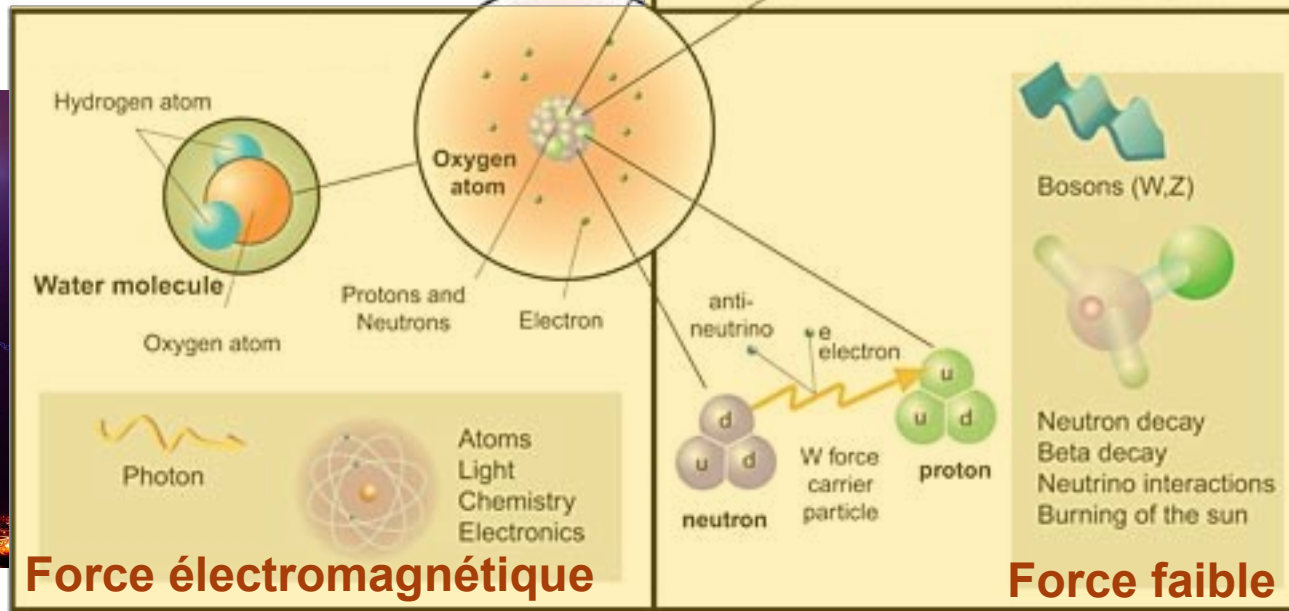
Les forces



Force gravitationnelle

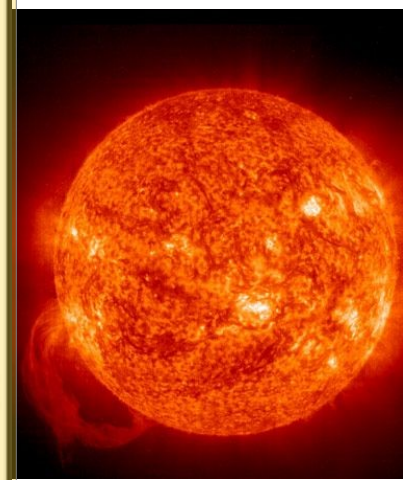


Force forte

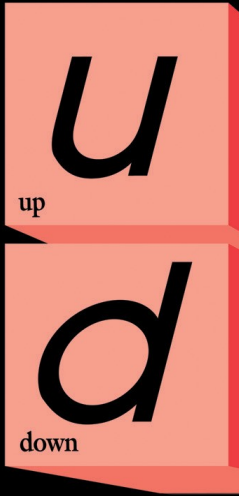


Force électromagnétique

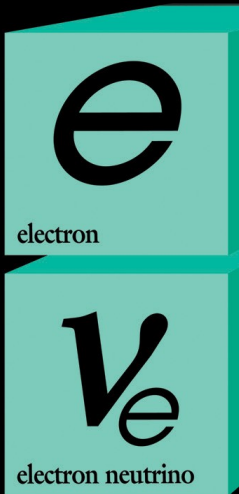
Force faible



Quarks



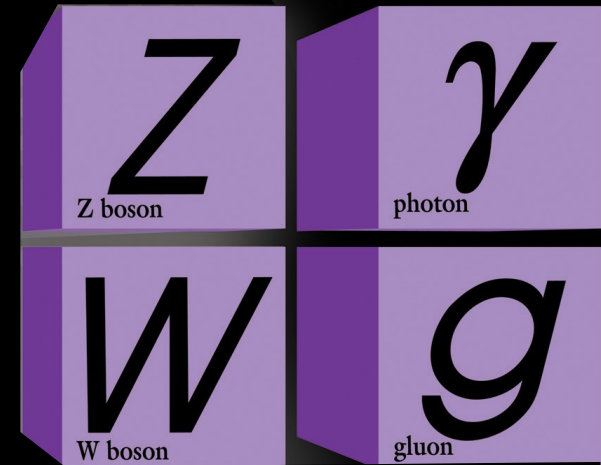
+ anti-matière



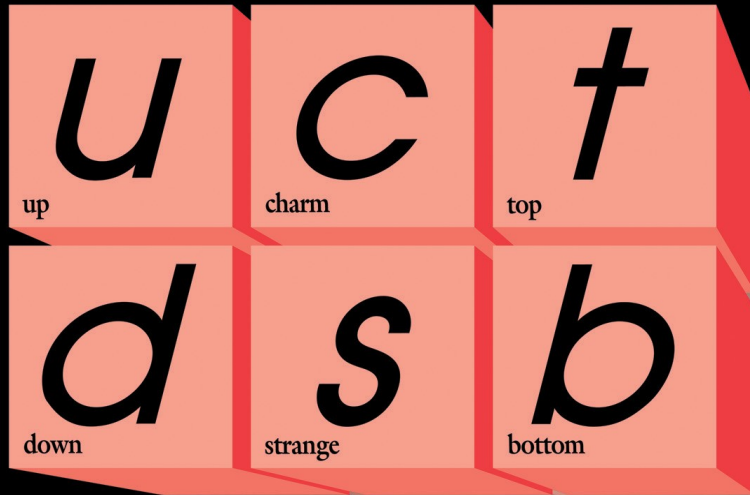
Leptons

Le modèle standard

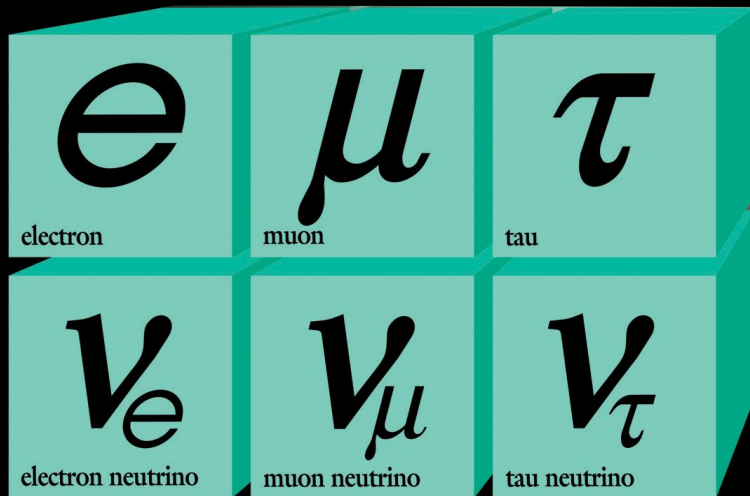
Forces



Quarks



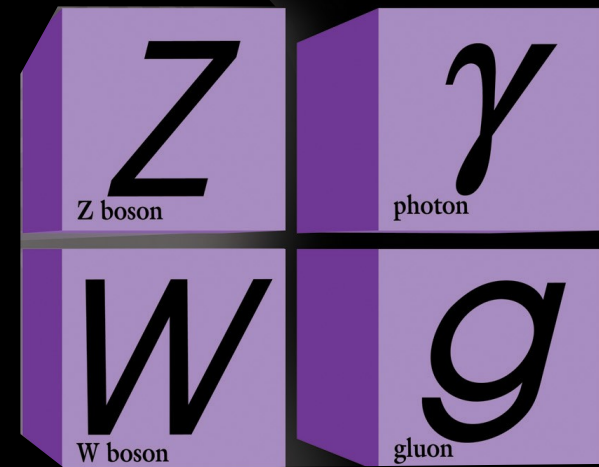
+ anti-matière



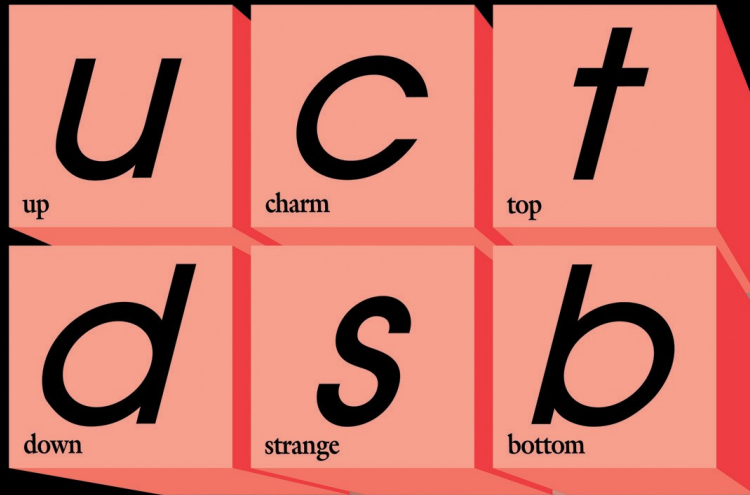
Leptons

Le modèle standard

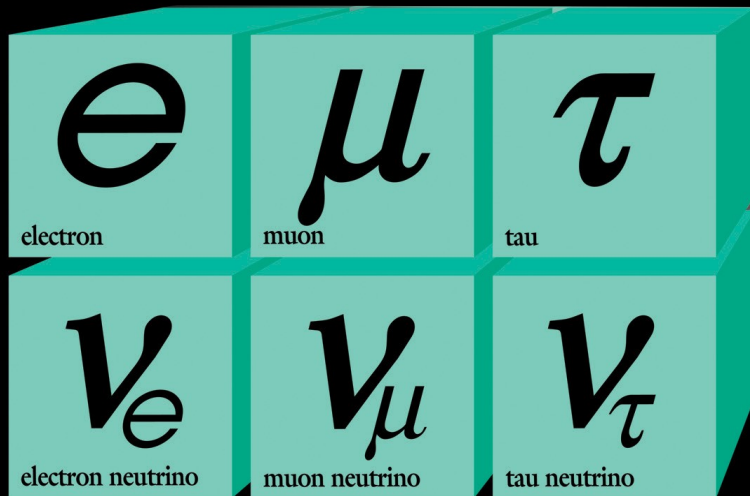
Forces



Quarks



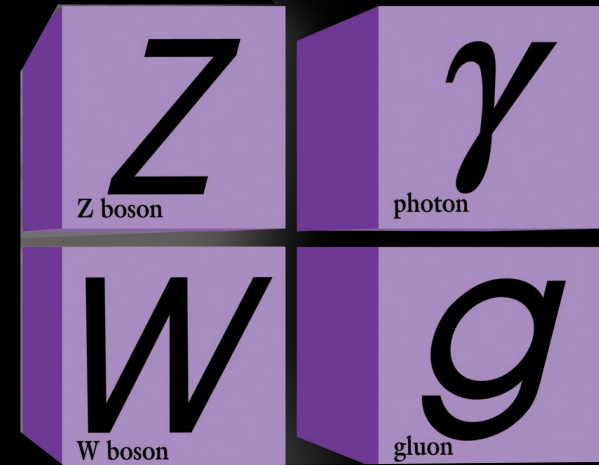
+ anti-matière



Leptons

Le modèle standard

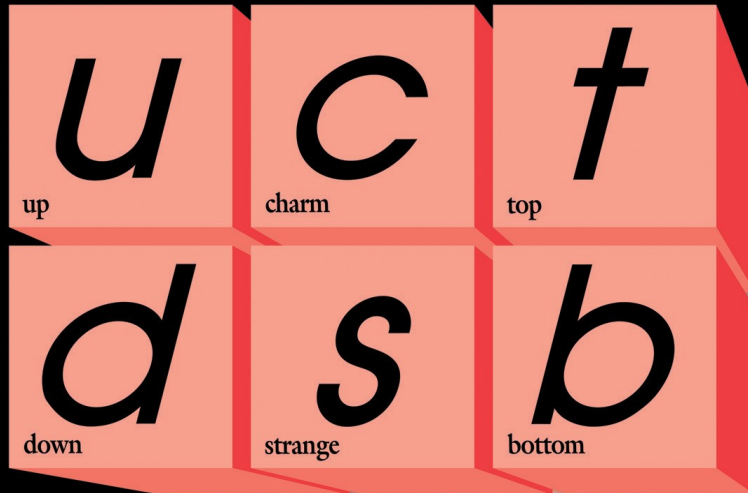
Forces



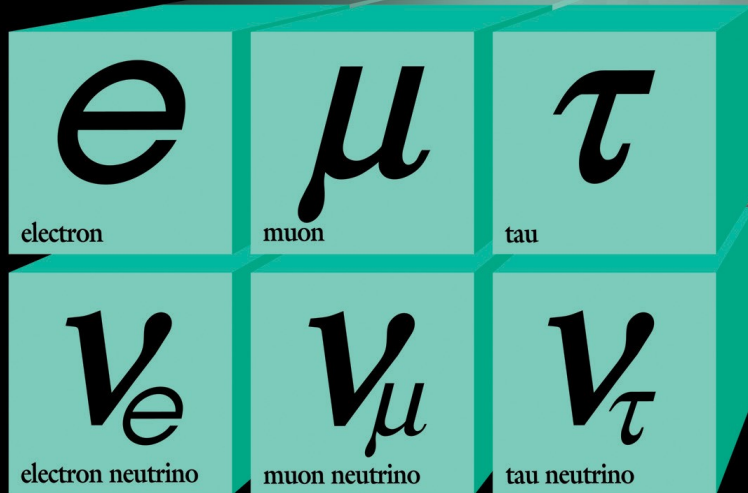
Toutes ces particules ont une masse nulle, c'est contraire à l'expérience...

Quarks

Le modèle standard

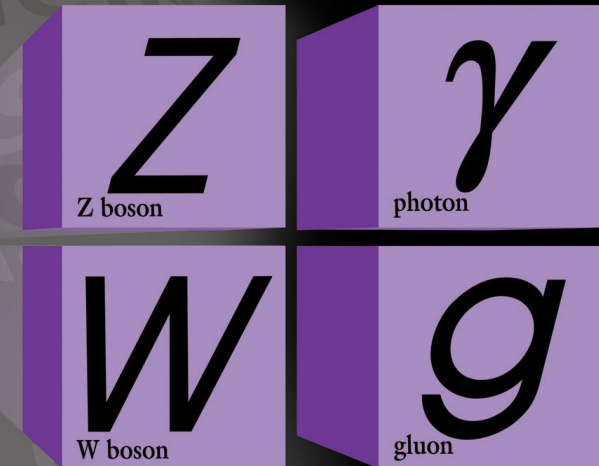


+ anti-matière



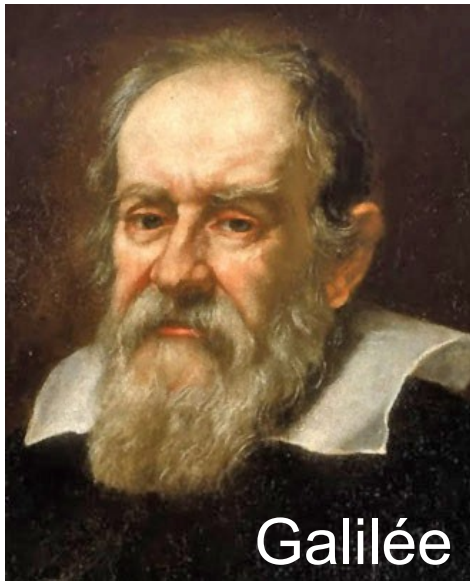
Leptons

Forces



Solution : rajouter un champ de Higgs

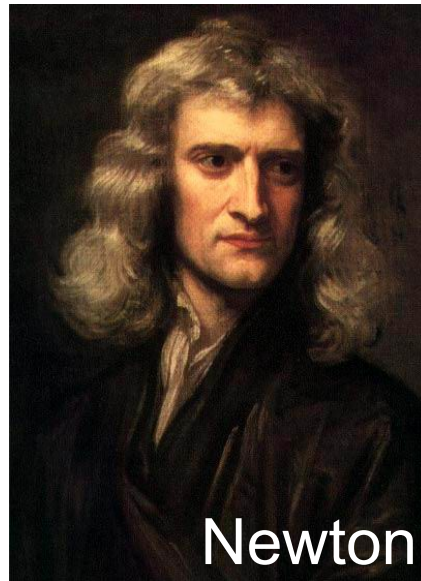
La masse



Galilée

- Masse gravitationnelle

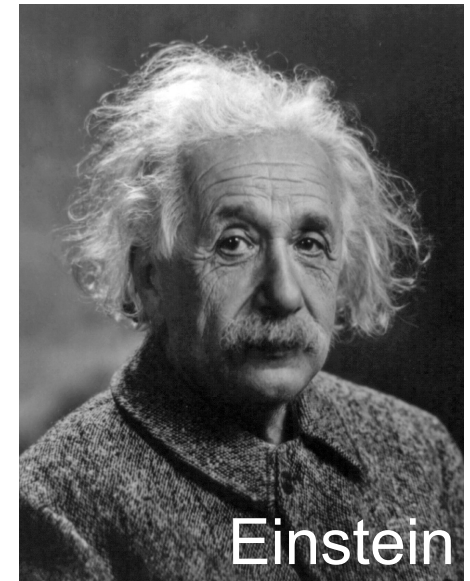
$$P = mg$$



Newton

- Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



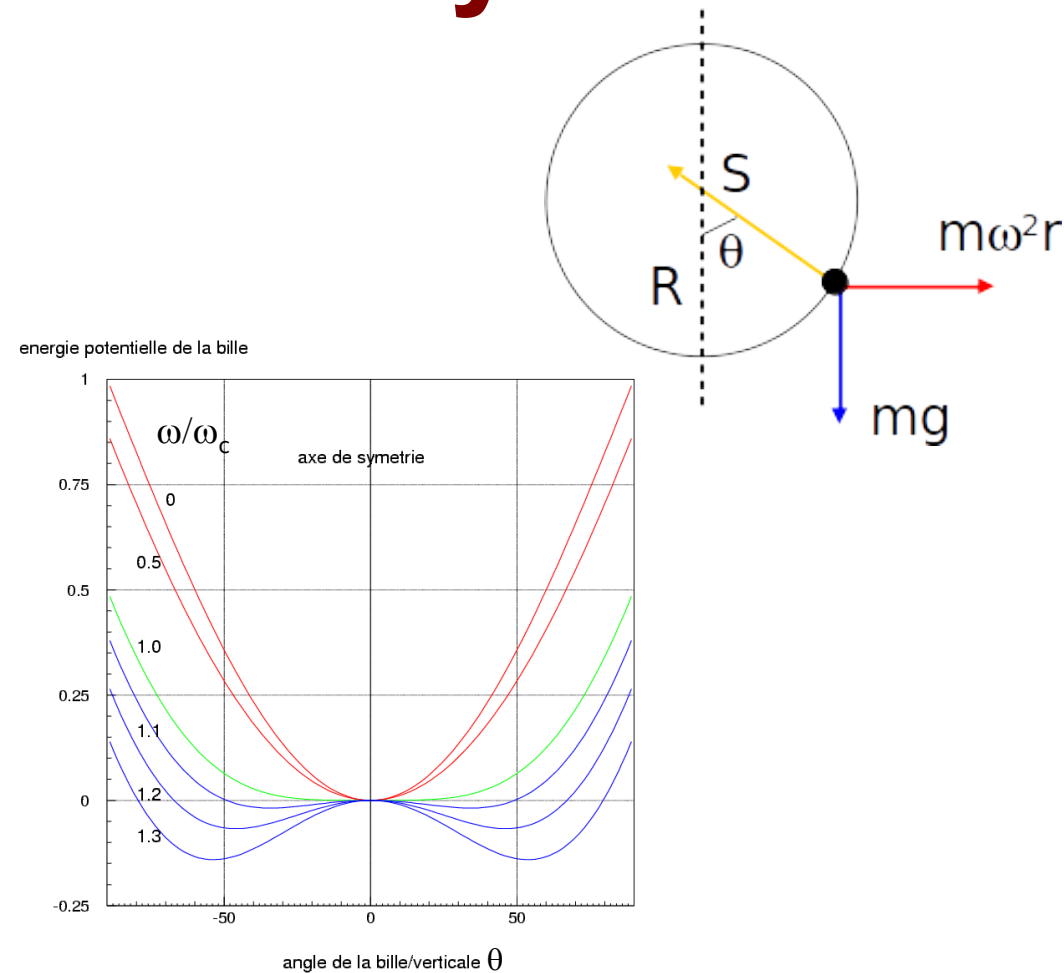
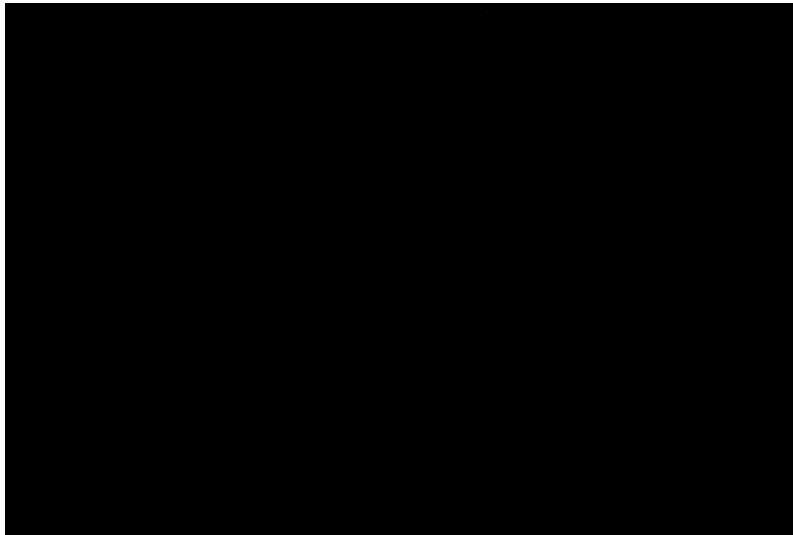
Einstein

- Équivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$

- Diverses interprétations de la notion de masse, toutes équivalentes
- D'après la théorie les particules élémentaires ont une masse nulle
 - L'Univers tel que nous le connaissons n'existe pas...
 - Contraire à l'expérience, introduction d'un mécanisme pour générer la masse : **brisure spontanée de la symétrie électrofaible**

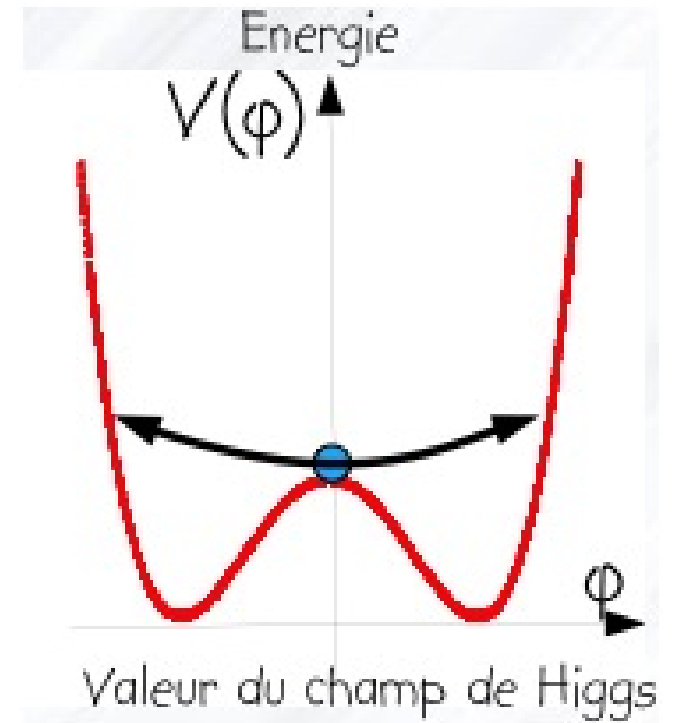
Brisure spontanée de symétrie



- vitesse angulaire de rotation $\omega \Rightarrow$ vitesse critique ω_c
 - ▶ si $\omega < \omega_c$: bille sur l'axe de symétrie
 - ▶ si $\omega > \omega_c$: 2 positions stables. La bille doit « choisir » l'une des deux $\Rightarrow$ **brisure spontanée de symétrie**

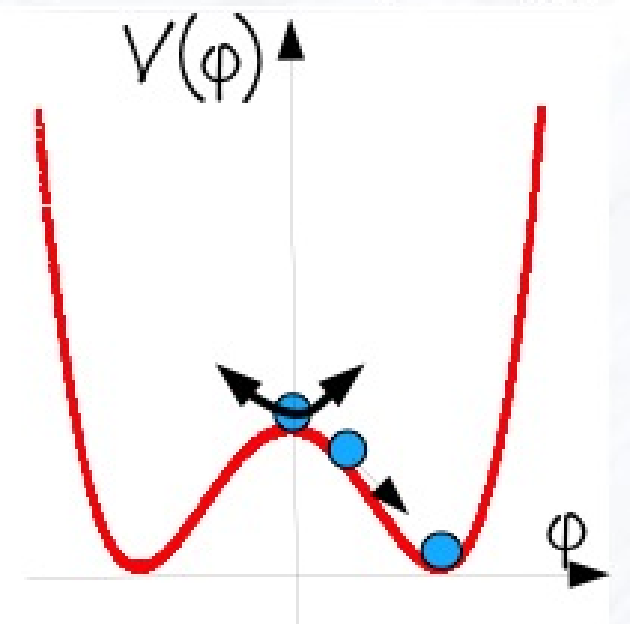
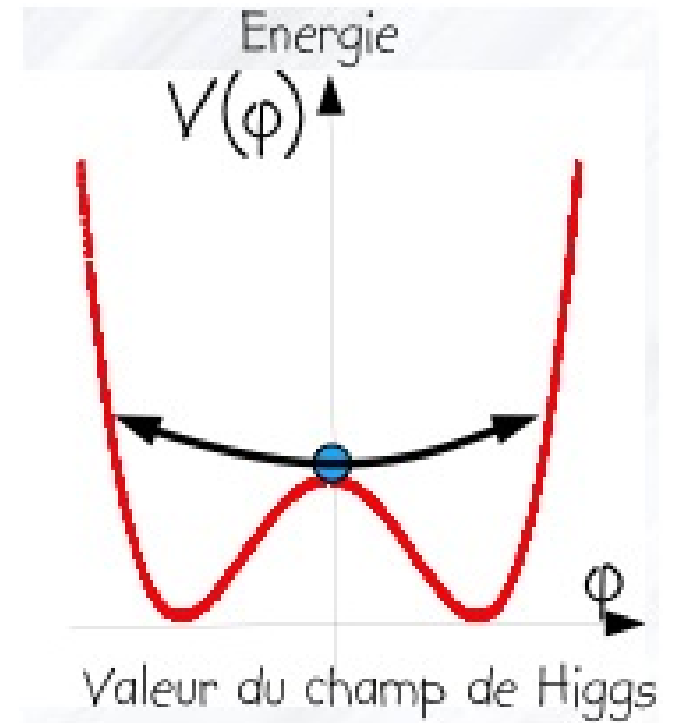
Brisure de la symétrie électrofaible

- A haute température, juste après le Big Bang :
 - ▶ champ de Higgs nul dans l'état fondamental
 - ▶ les particules restent sans masse

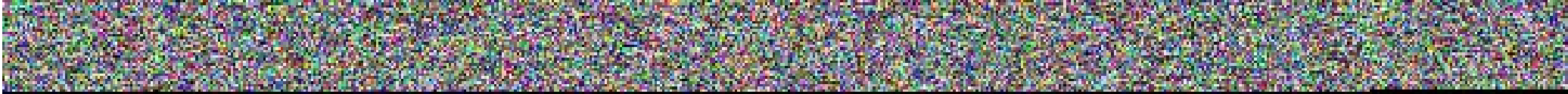


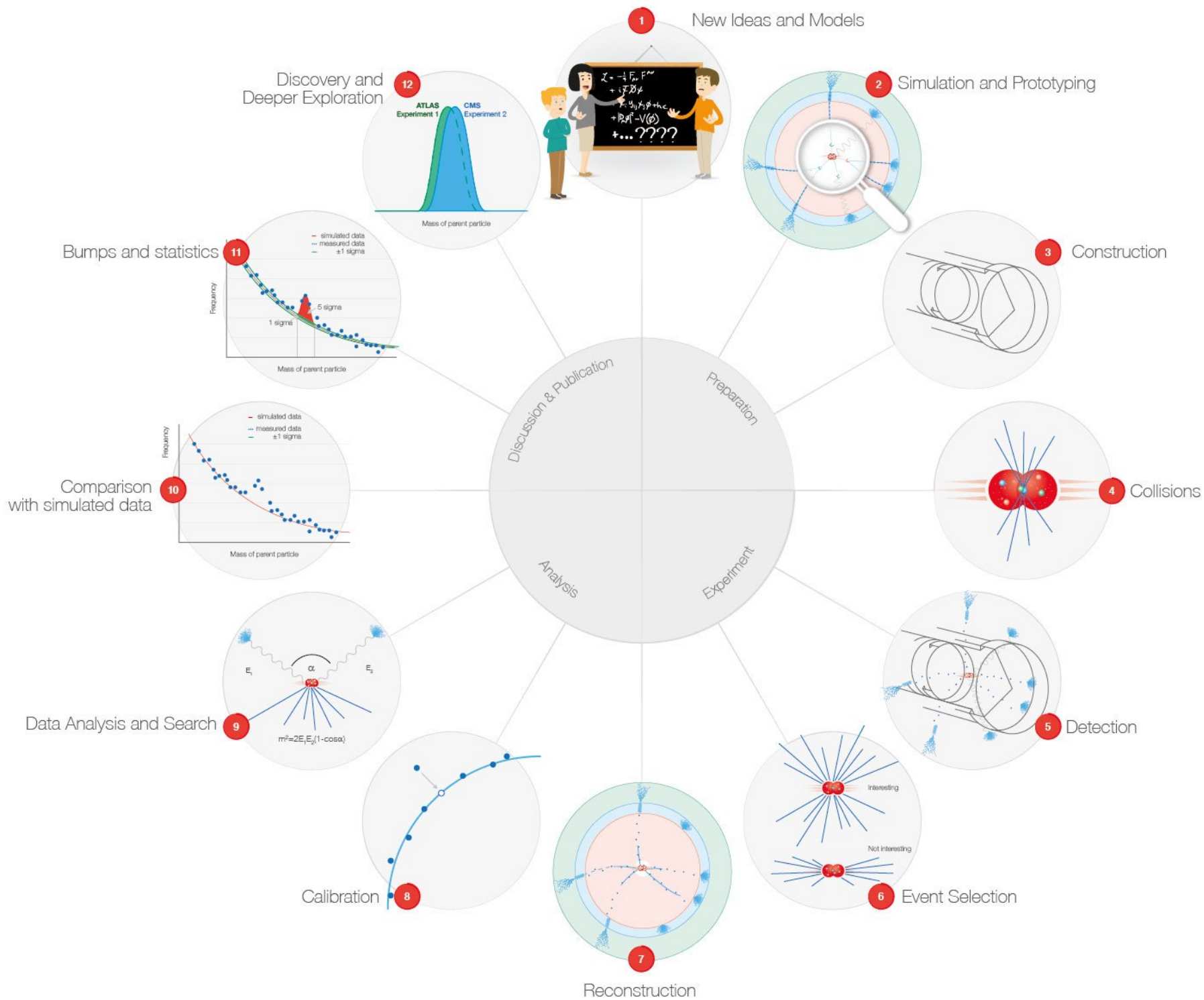
Brisure de la symétrie électrofaible

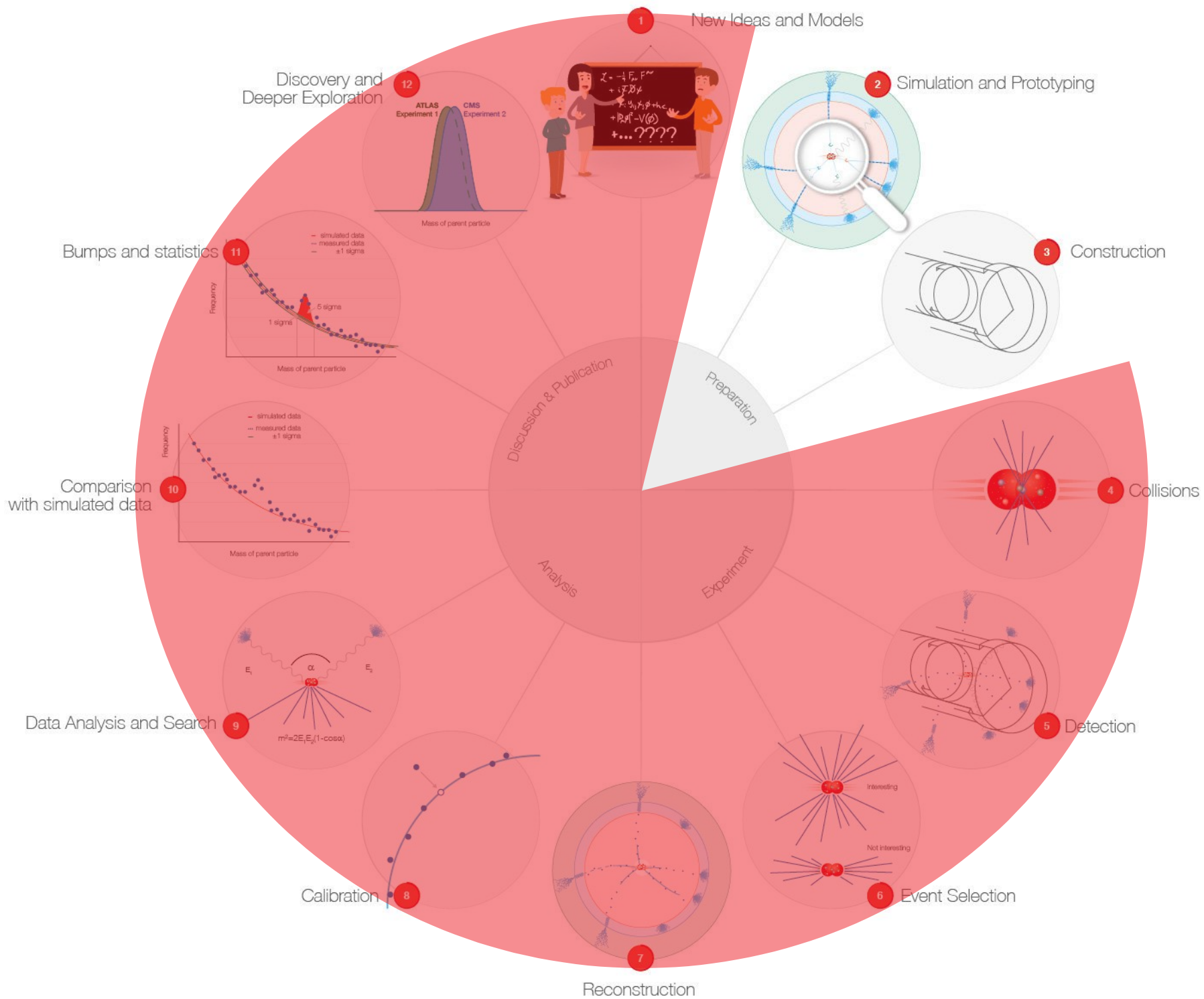
- A haute température, juste après le Big Bang :
 - champ de Higgs nul dans l'état fondamental
 - les particules restent sans masse
- Réduction de la température (10^{-12} s après le Big Bang) :
 - brisure de symétrie
 - champ non nul
 - les particules élémentaires acquièrent une masse non nulle en interagissant avec le champ de Higgs



Interactions avec le boson de Higgs







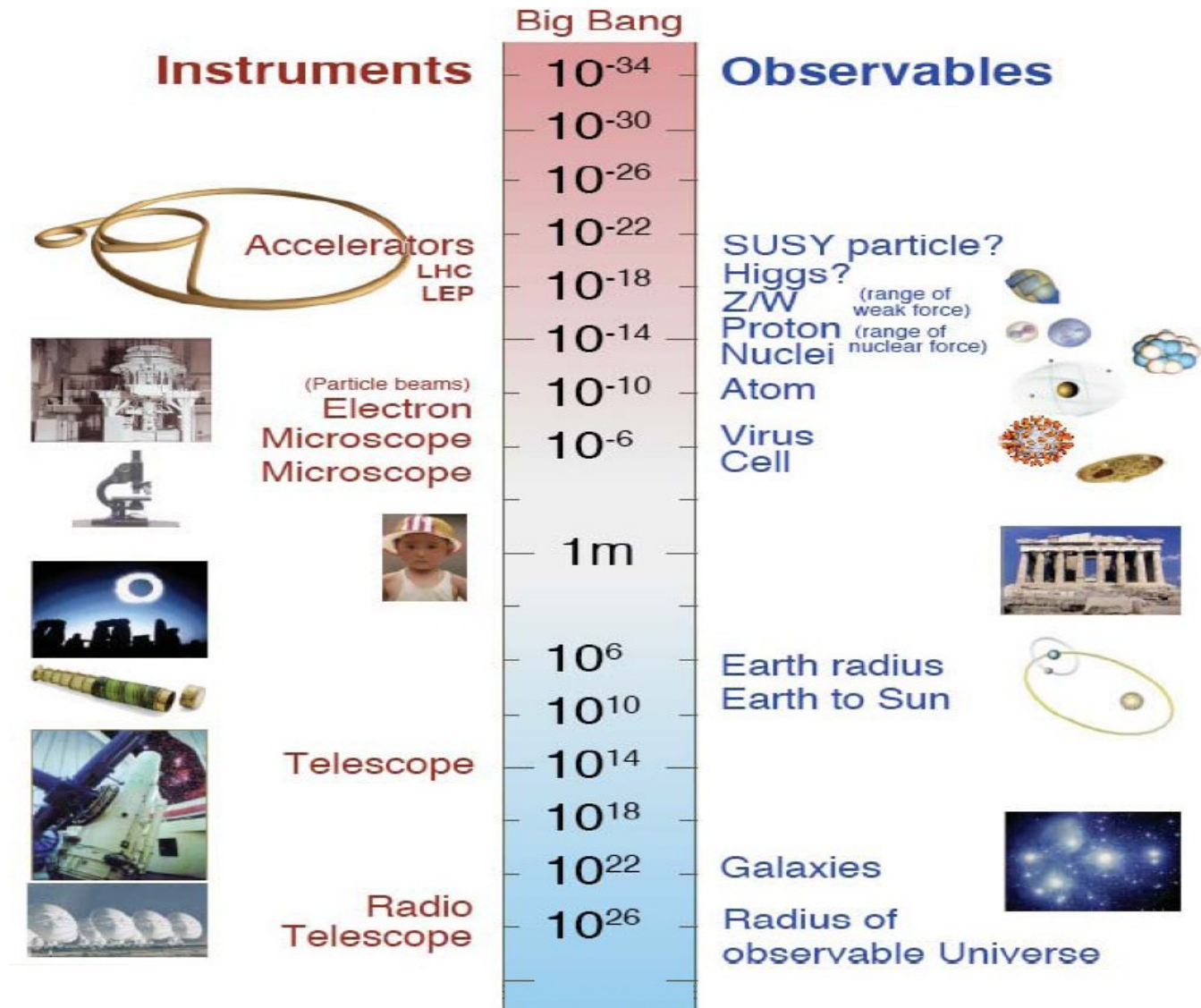
Pourquoi des accélérateurs de particules ?

- Pour voir des objets plus petits, il faut une énergie plus élevée :

▸ longueur d'onde associée $\lambda = h/p$

- Pour créer des particules plus lourdes

▸ $E = mc^2$



Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



LHCb

ATLAS

CMS

ALICE

Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)

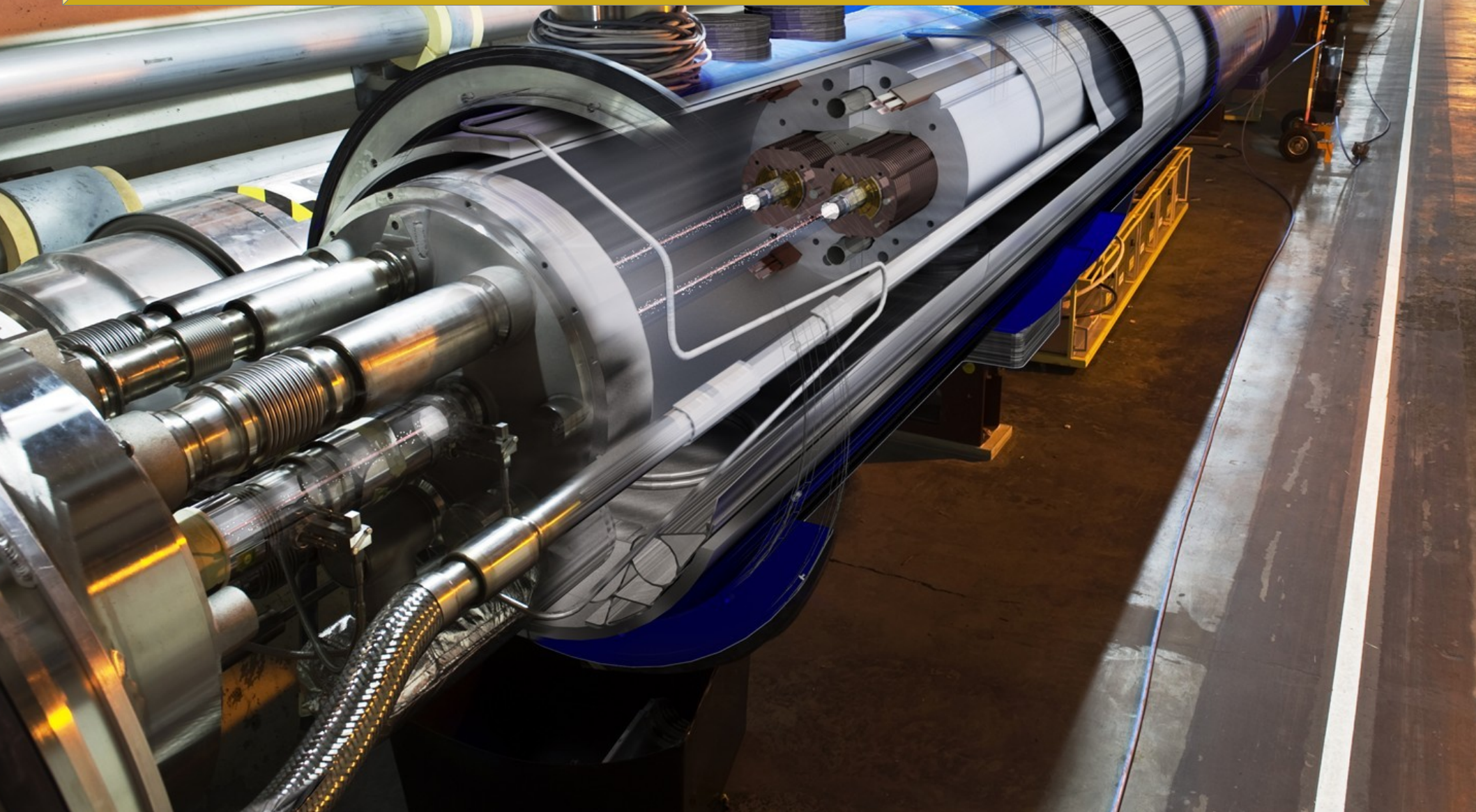


Le LHC : la machine à superlatifs



Le LHC : la machine à superlatifs

La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite



Le LHC : la machine à superlatifs



27 km de circonférence
100 m sous terre

Le LHC : la machine à superlatifs



Protons voyageant à
99,9999991%
de la vitesse de la lumière,
soit 11000 tours
par seconde

Le LHC : la machine à superlatifs



Le plus grand congélateur : 1,9 K (-271 °C),
plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K),
avec de l'hélium superfluide
pour rendre les câbles supraconducteurs
et générer un champ magnétique de 8,3 T
(200000 fois le champ magnétique terrestre)

Le LHC : la machine à superlatifs

1232 dipôles.
Un dipôle :
15 m de long
35 tonnes



Le LHC : la machine à superlatifs

Longueur des câbles supraconducteurs :
assez pour 5 aller-retours Terre-soleil



Le LHC : la machine à superlatifs



Vide presque parfait (10^{-13} atm) :
pression 10 fois plus faible
que sur la Lune

Le LHC : la machine à superlatifs



Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol, mais il y en a 2800 paquets de 100 milliards !

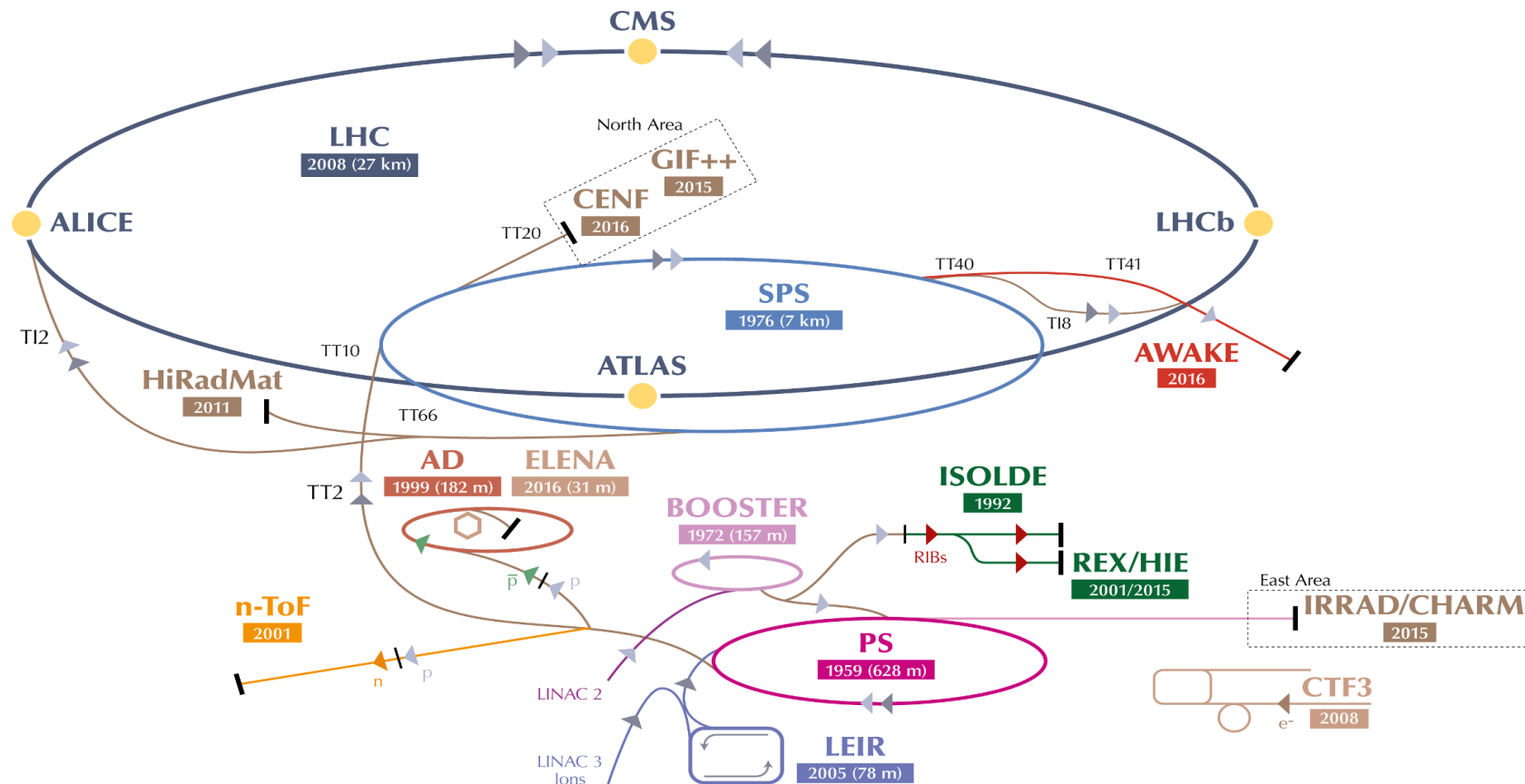
► Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.

Le LHC : la machine à superlatifs

A photograph of a long, blue and silver superconducting magnet in the LHC tunnel. The magnet is a large, cylindrical structure with a blue outer shell and a silver inner section. It is surrounded by various pipes, cables, and support structures. A yellow ladder is visible on the right side of the magnet. The tunnel is dimly lit, with the magnet being the primary light source. A small sign with a warning symbol is visible on the left side of the magnet.

Consommation électrique :
Tous les foyers du canton de Genève

Le CERN : les accélérateurs



► p (protons) ► ions ► RIBs (Radioactive Ion Beams) ► n (neutrons) ► $\bar{p}$ (antiprotons) ► e^- (electrons)

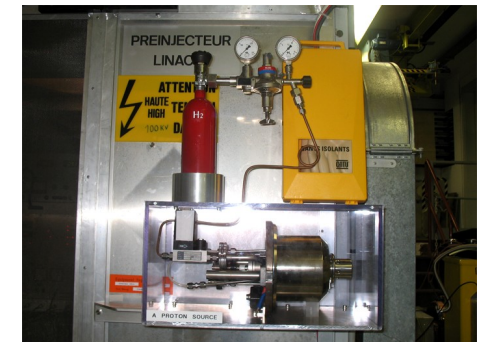
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility

AWAKE Advanced WAKEfield Experiment ISOLDE Isotope Separator OnLine REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight HiRadMat High-Radiation to Materials

CHARM Cern High energy AcceleraTOR Mixed field facility IRRAD proton IRRADIation facility GIF++ Gamma Irradiation Facility

CENF CERN Neutrino platForm



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
	1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
	Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	2021	Début du Run 3
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
	2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grands accélérateurs
	1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
	Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	2021	Début du Run 3
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
	2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



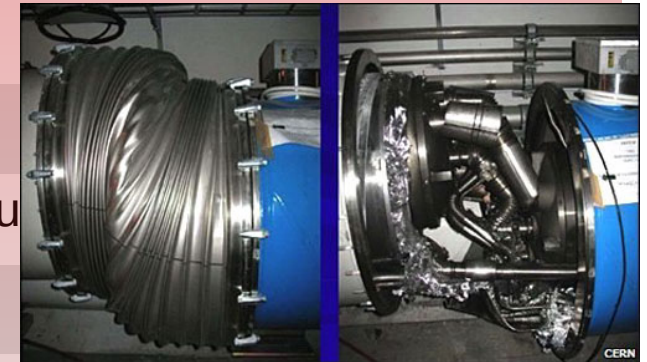
Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
	1998-2008	Construction du
	Septembre 2008	Mise en service
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	2021	Début du Run 3
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
	2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
	1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
	Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	2021	Début du Run 3
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
	2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
	1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
	Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
25 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	2021	Début du Run 3
	2023	Fin des collisions à luminosité nominale
	2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



Le CERN



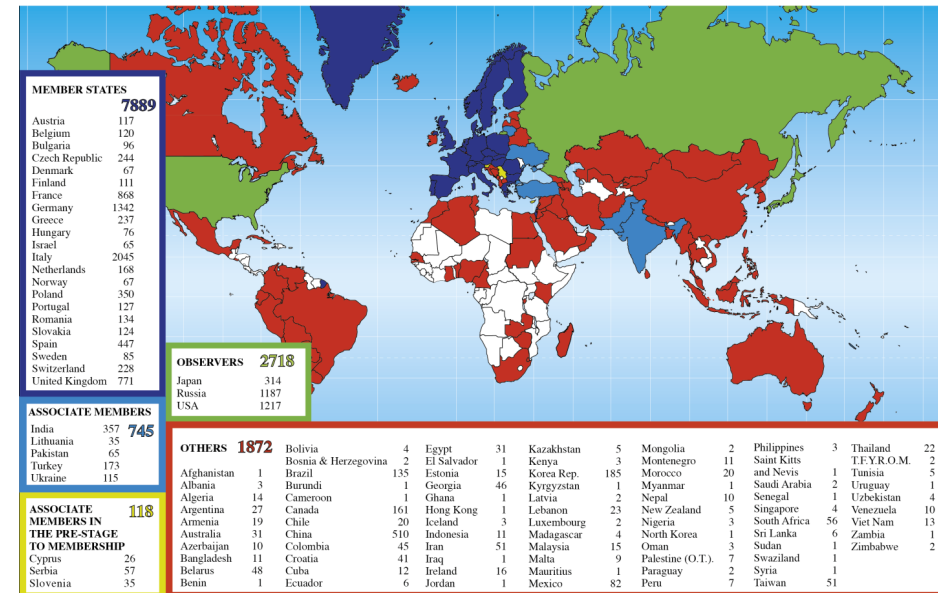
Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Le laboratoire européen pour la physique des particules

Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018

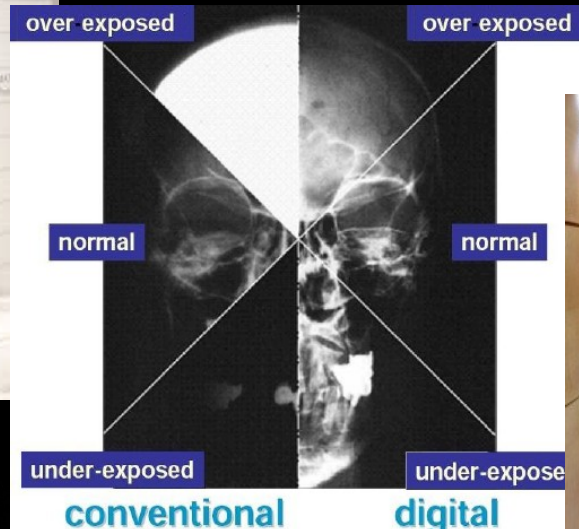
- organisation internationale
- créé en 1954
- 23 état membres
- Emploie ~2500
- ~13 000 utilisateurs

– 500 instituts, 80 pays

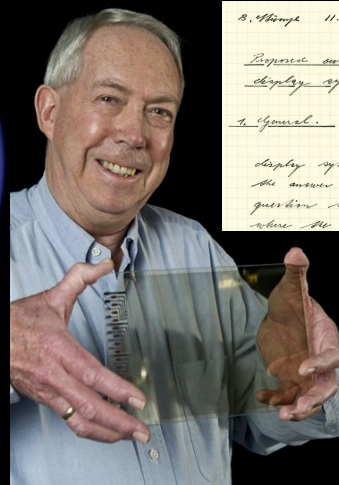
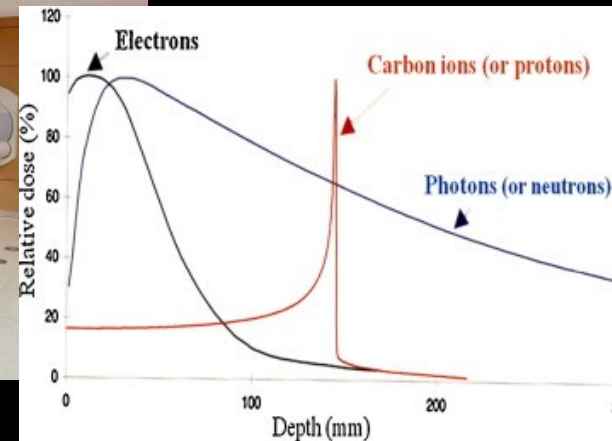
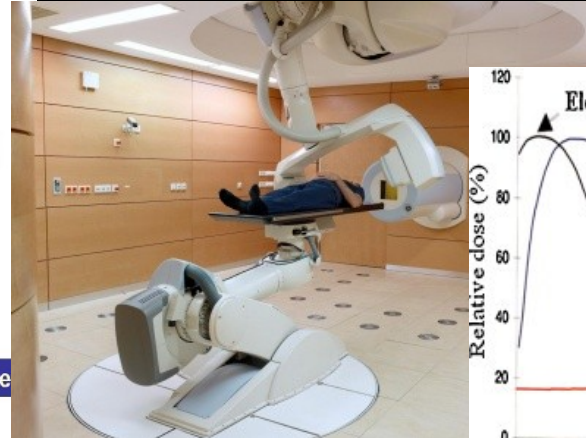


- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques / Plusieurs prix Nobel
- Formidable lieu de collaboration internationale
- Programme d'étudiant d'été

A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?

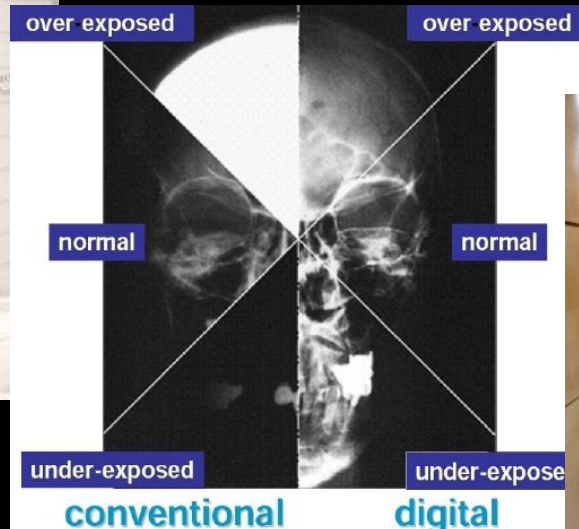


Running jobs: 246791
Transfer rate: 13.98 GiB/sec

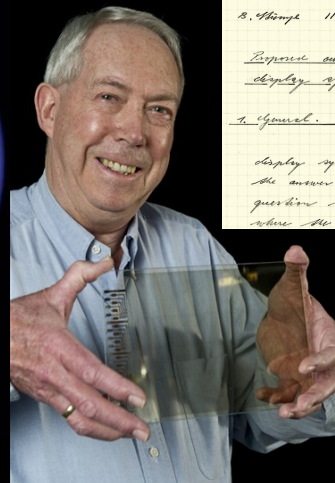
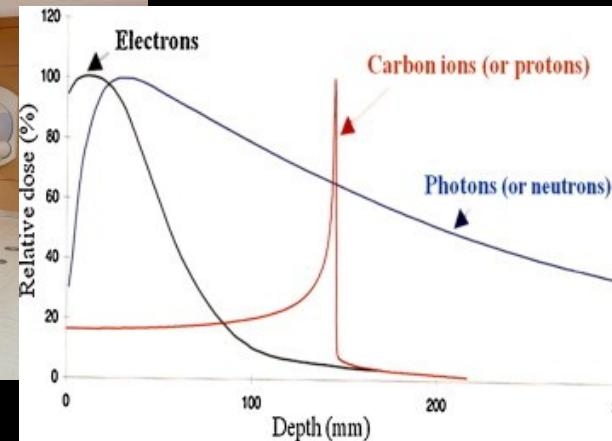
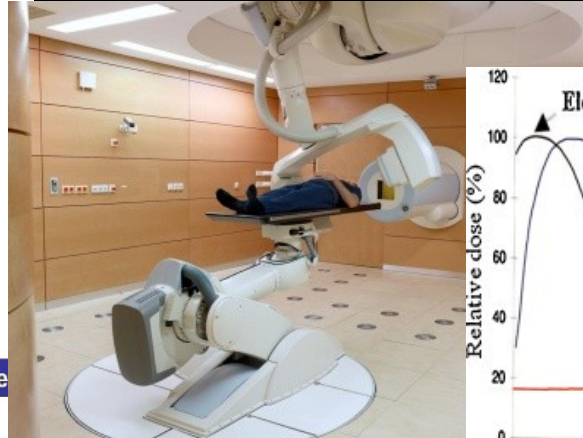


B. Thompson 11.03.1992 PAGE 7.
Propose outline for a fast interactive computer display system *
1. General.
Ideally all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to

A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



Running jobs: 246791
Transfer rate: 13.98 GiB/sec

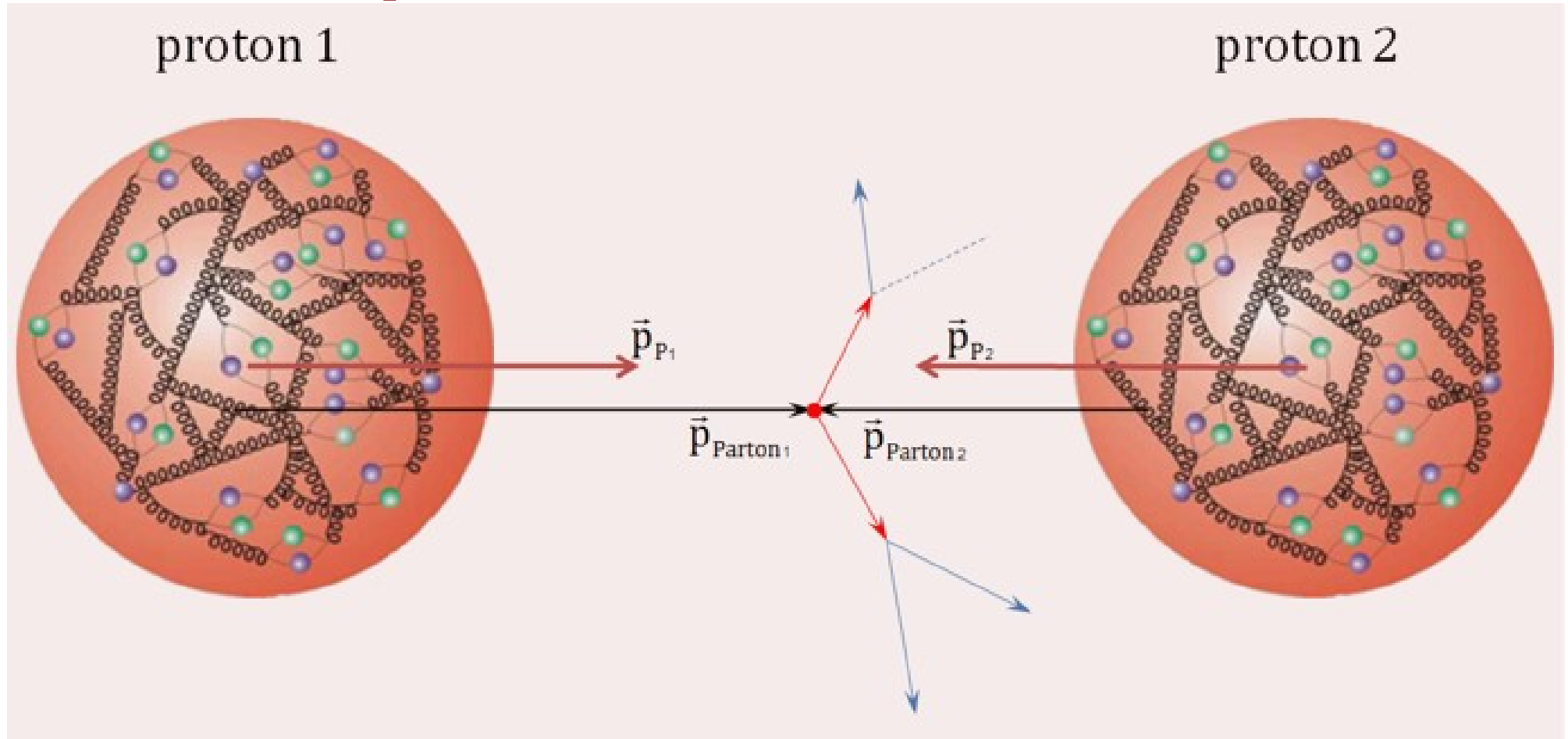


B. Thompson 11.03.1992 PAGE 7.
Propose outline for a fast interactive computer display system *
1. General.
Ideally all interactive display systems operate in a way where the answer to a question (and displayed) question takes place via a keyboard and form where the information is coded back to

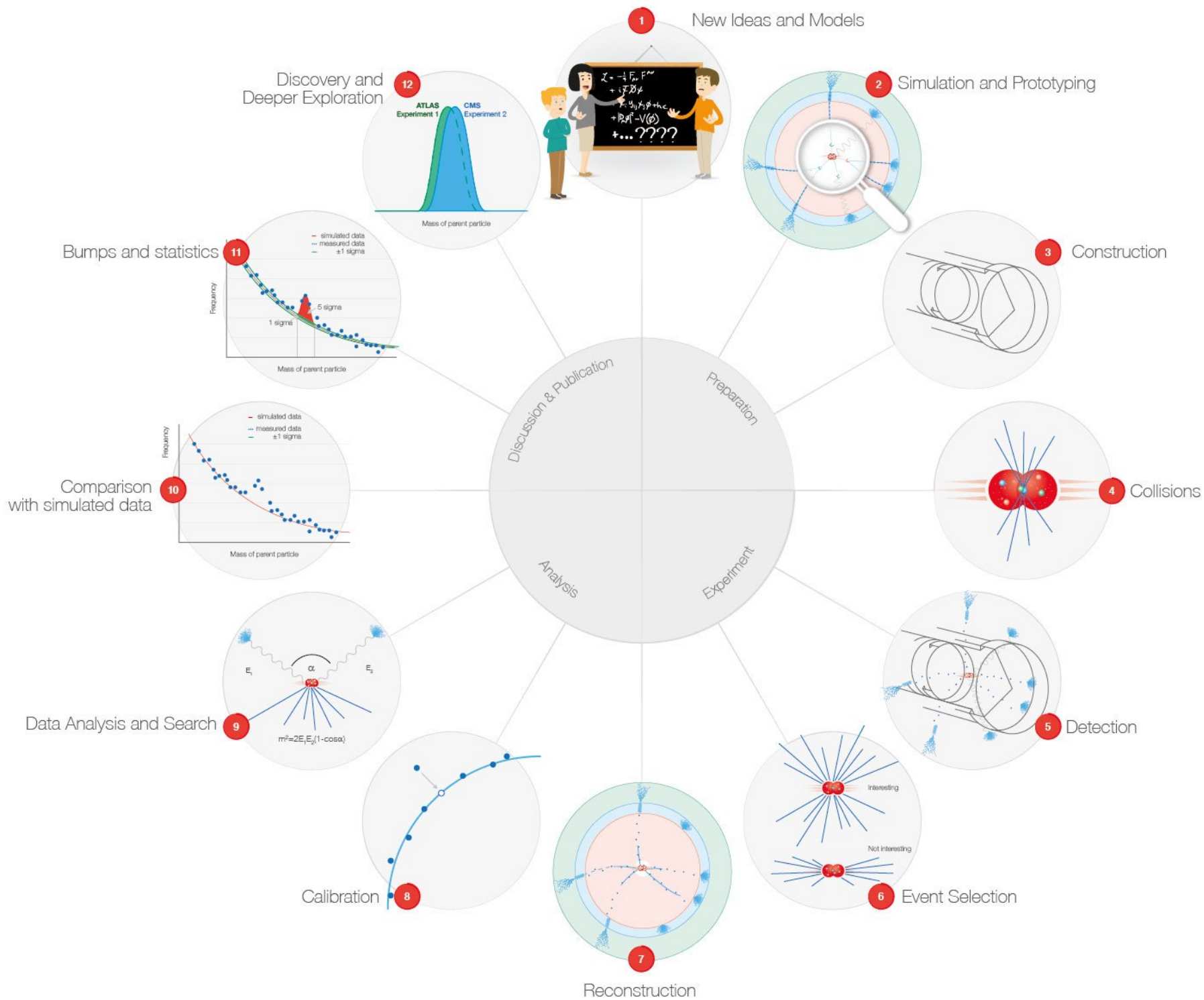


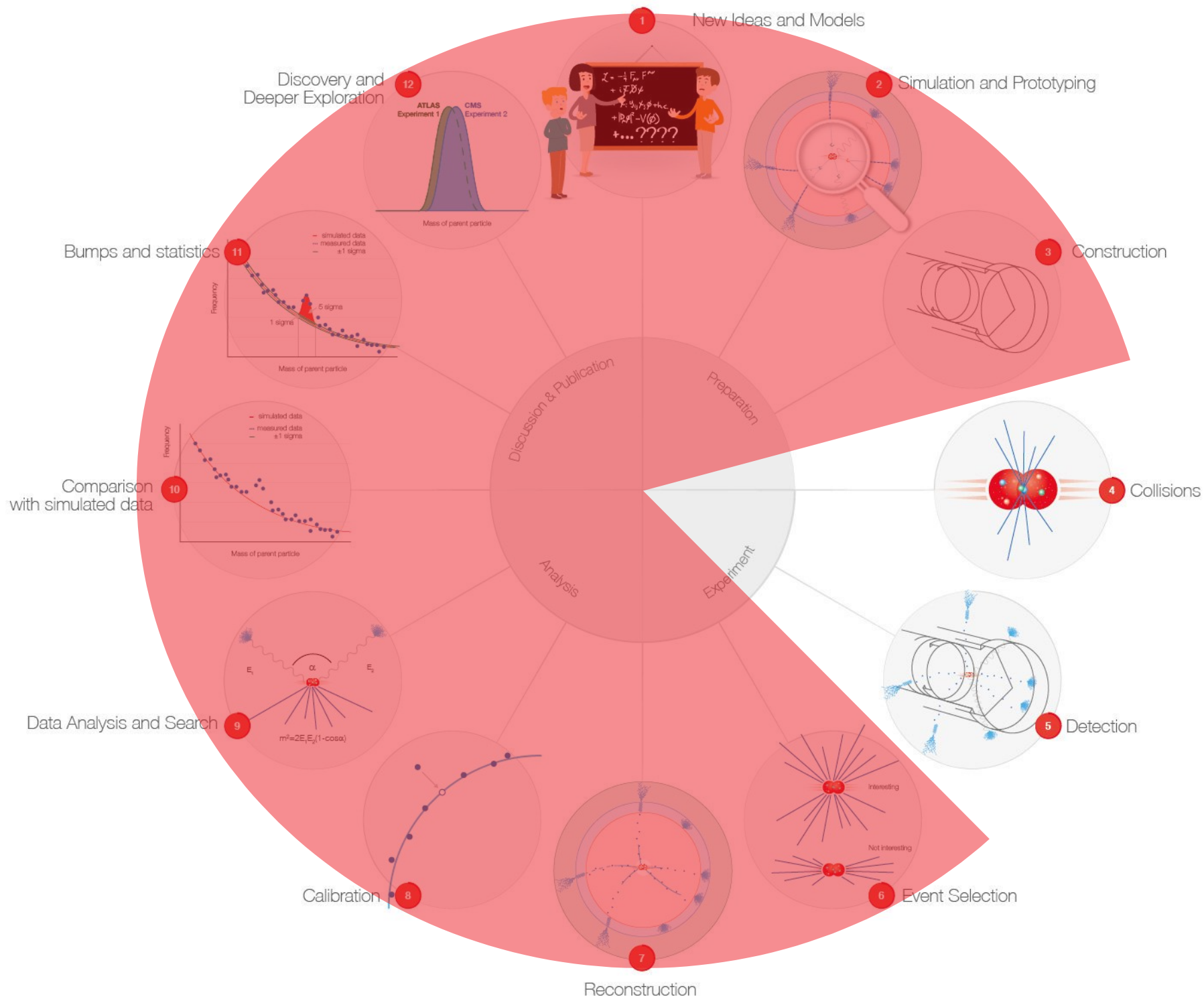
► Le Web a été inventé au CERN !

Deux protons se rencontrent...

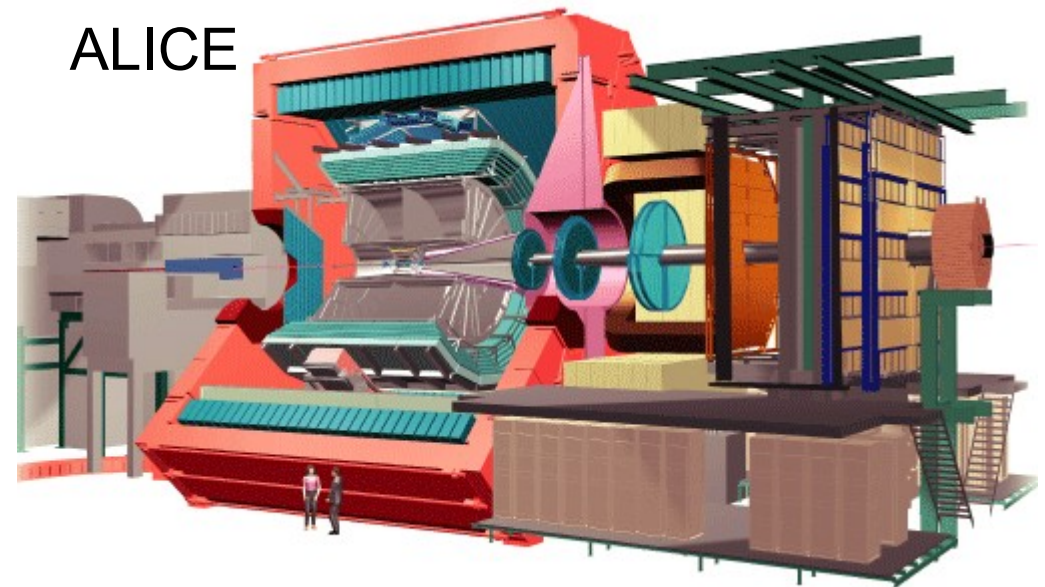
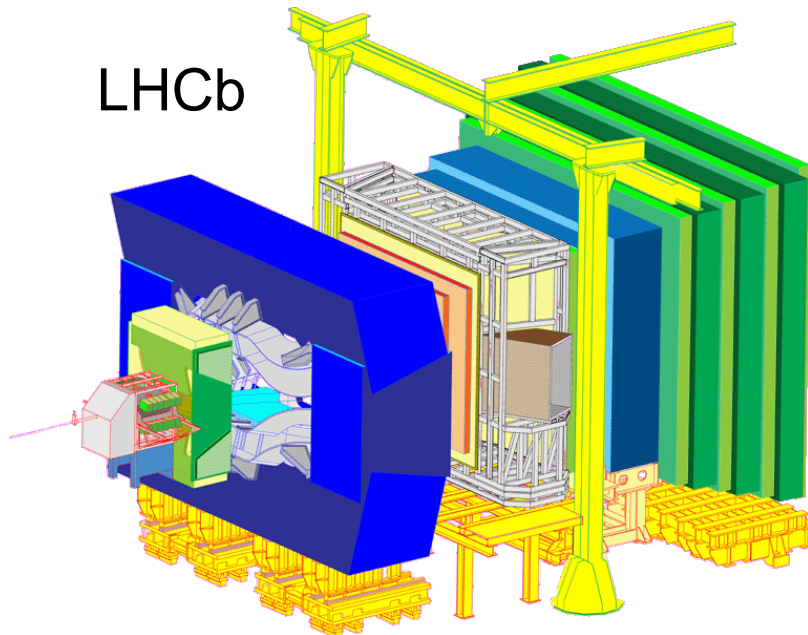
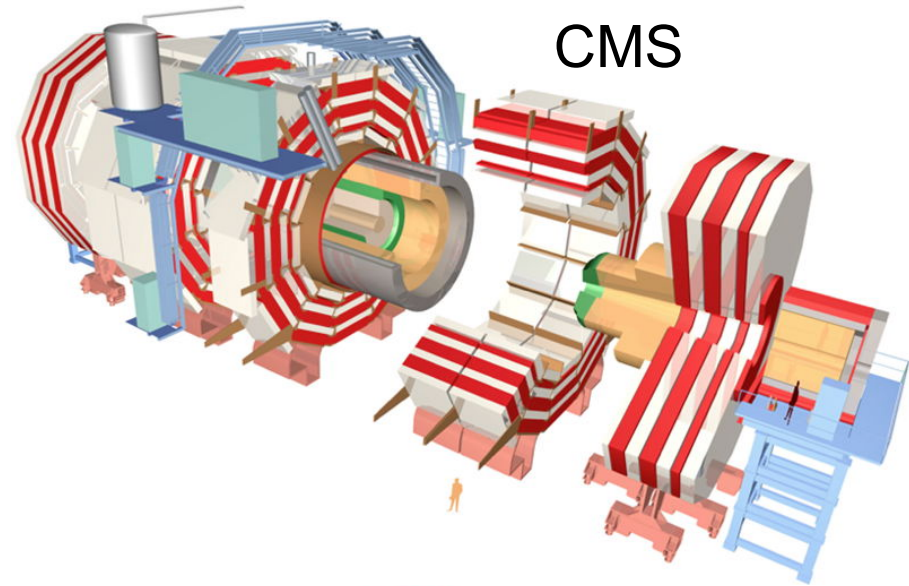
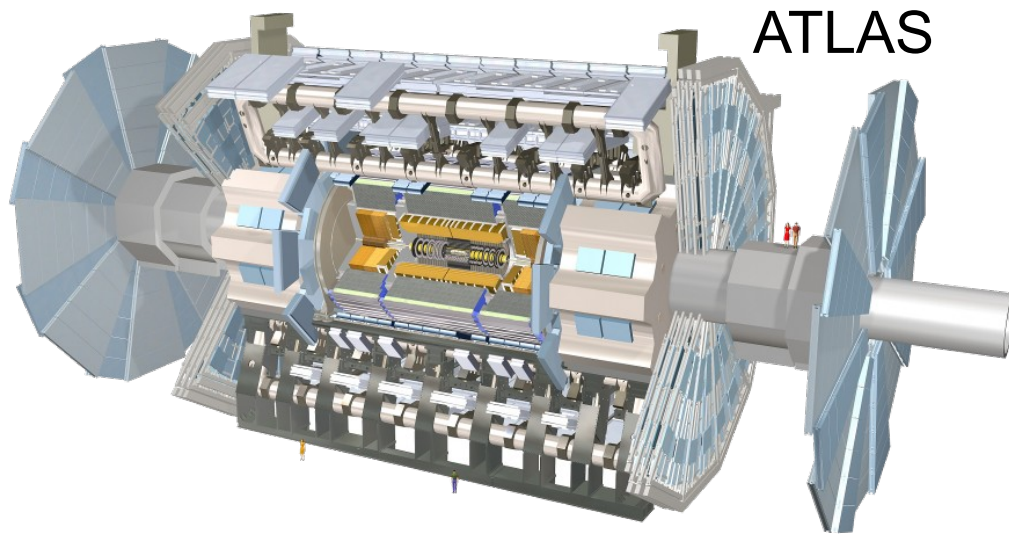


- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

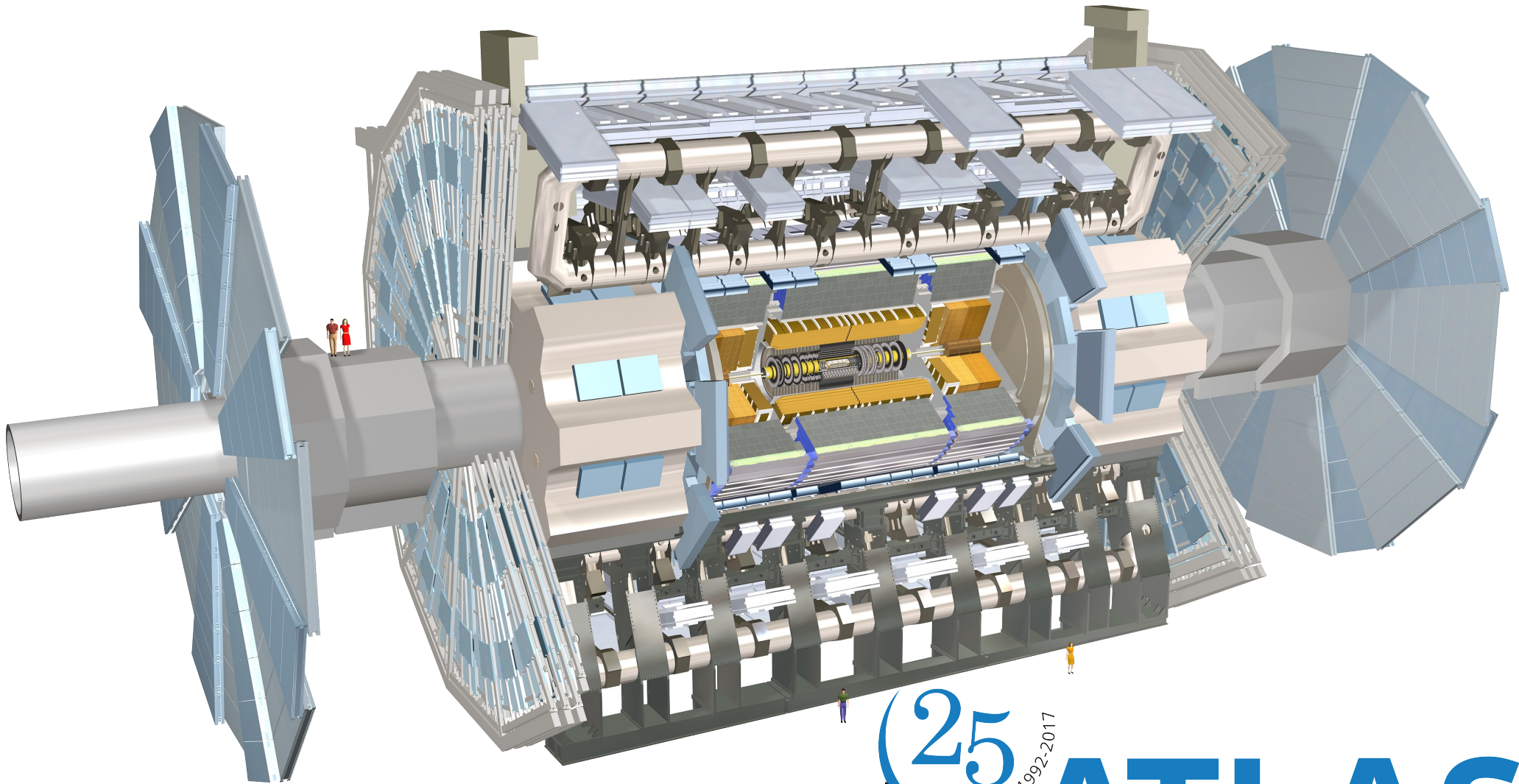




Les détecteurs géants du LHC



Le détecteur ATLAS

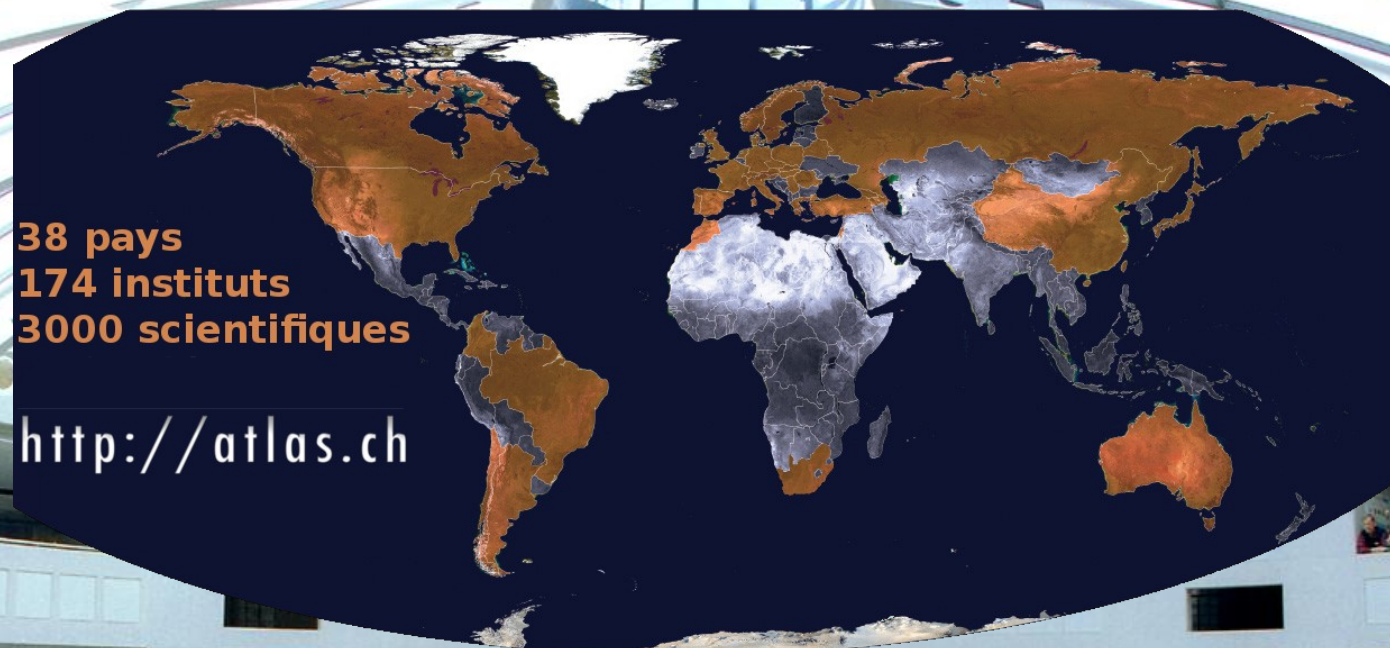


ATLAS
EXPERIMENT

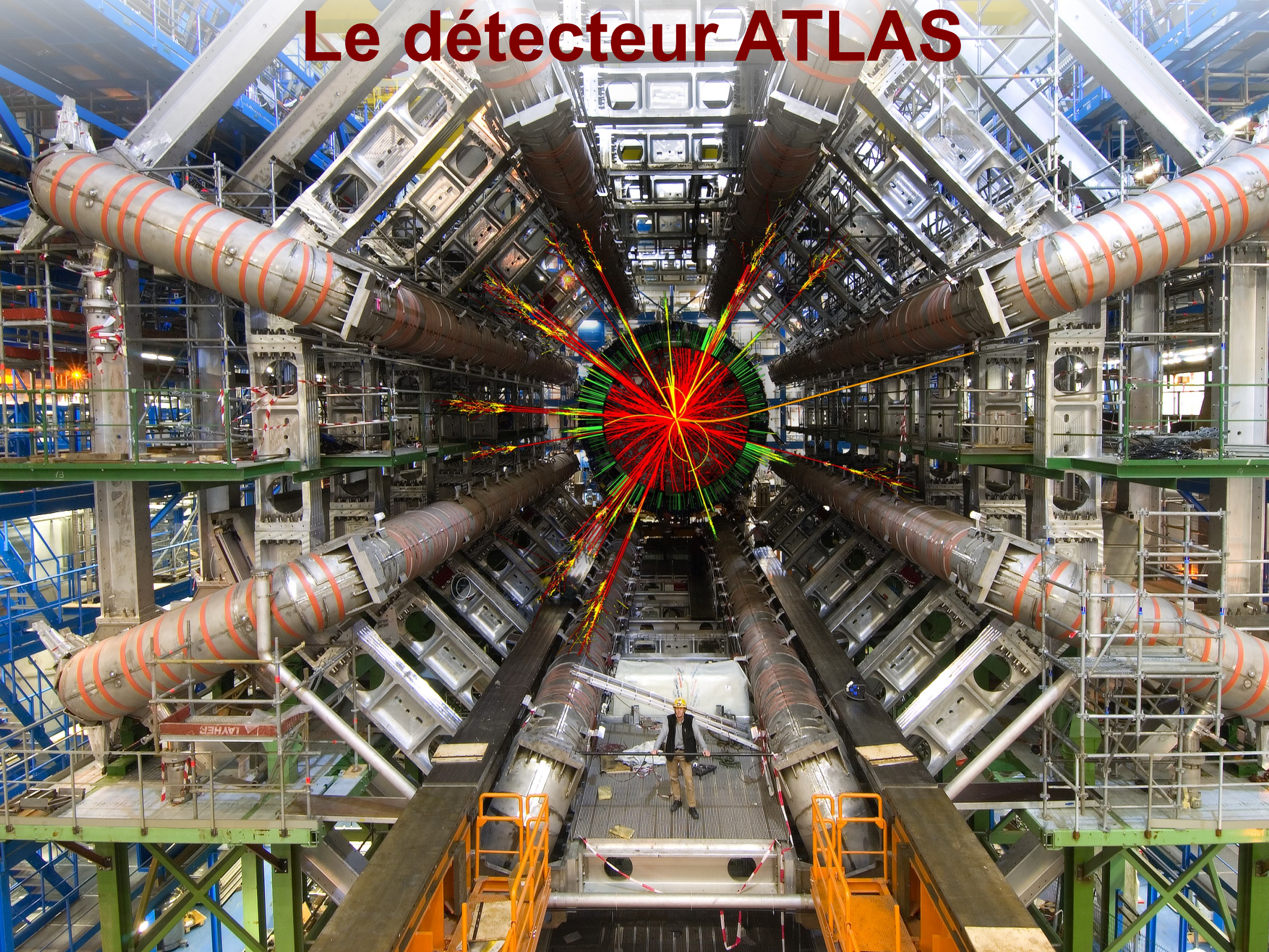
La collaboration ATLAS



La collaboration ATLAS

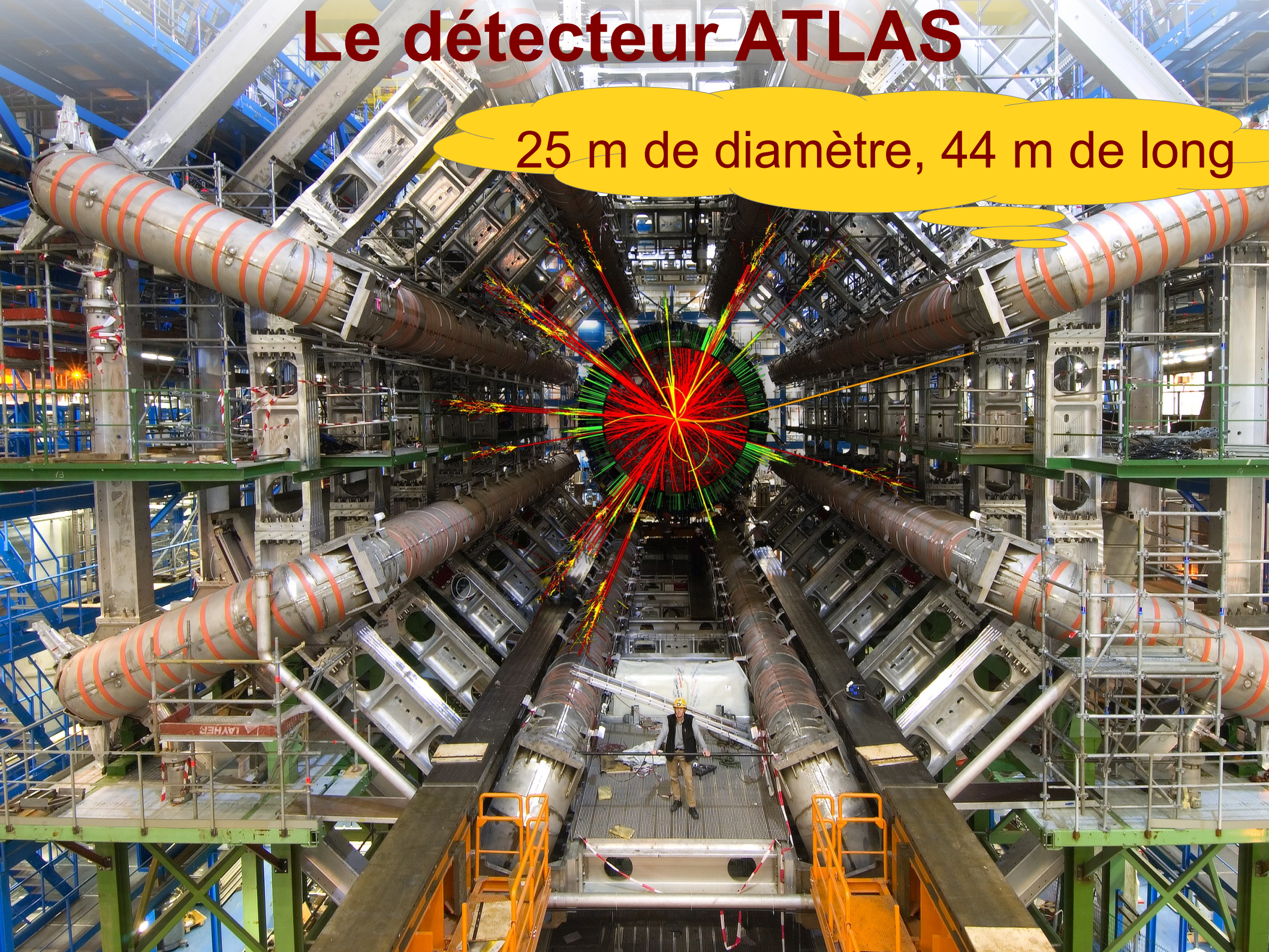


Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

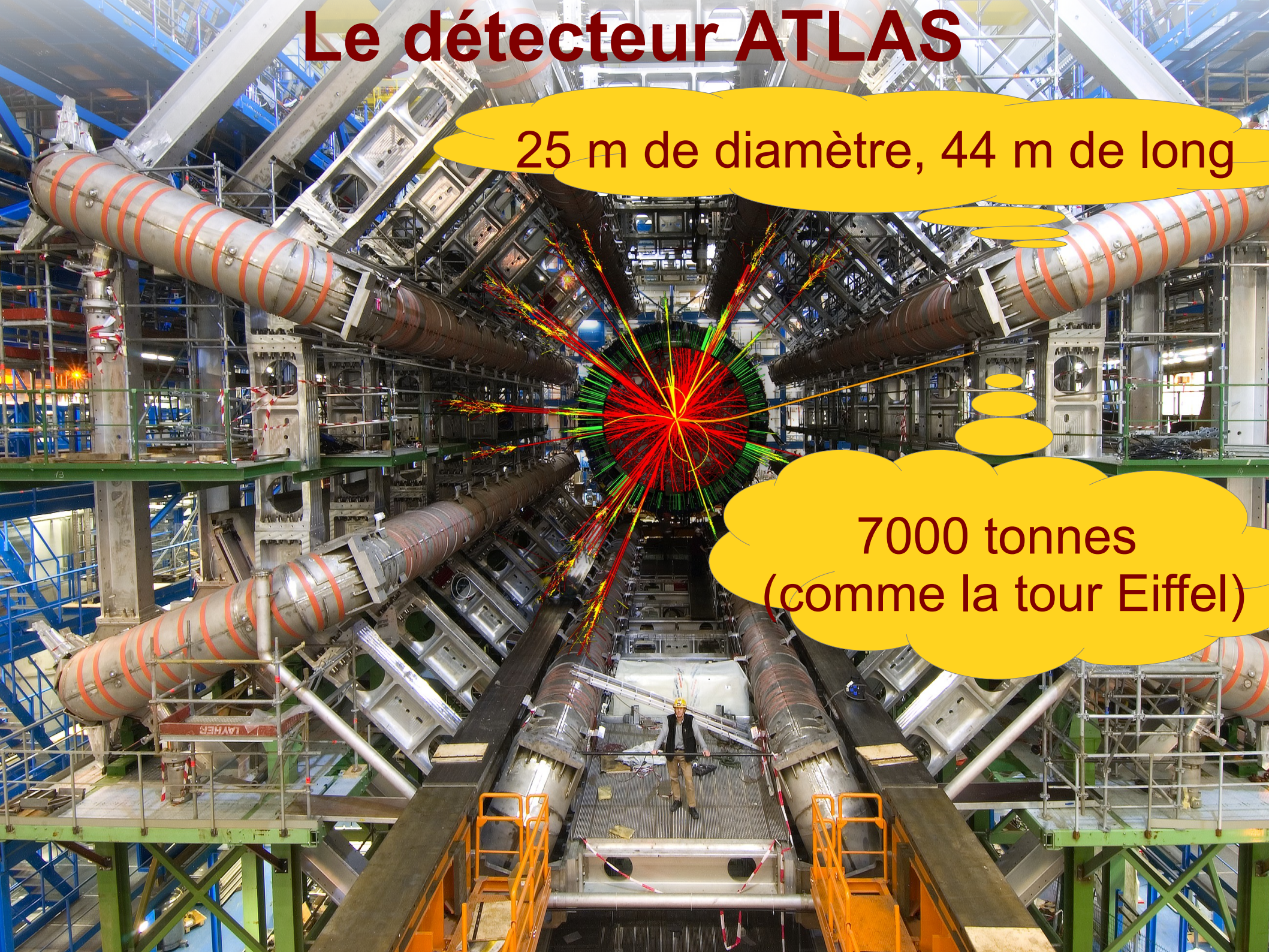
25 m de diamètre, 44 m de long



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

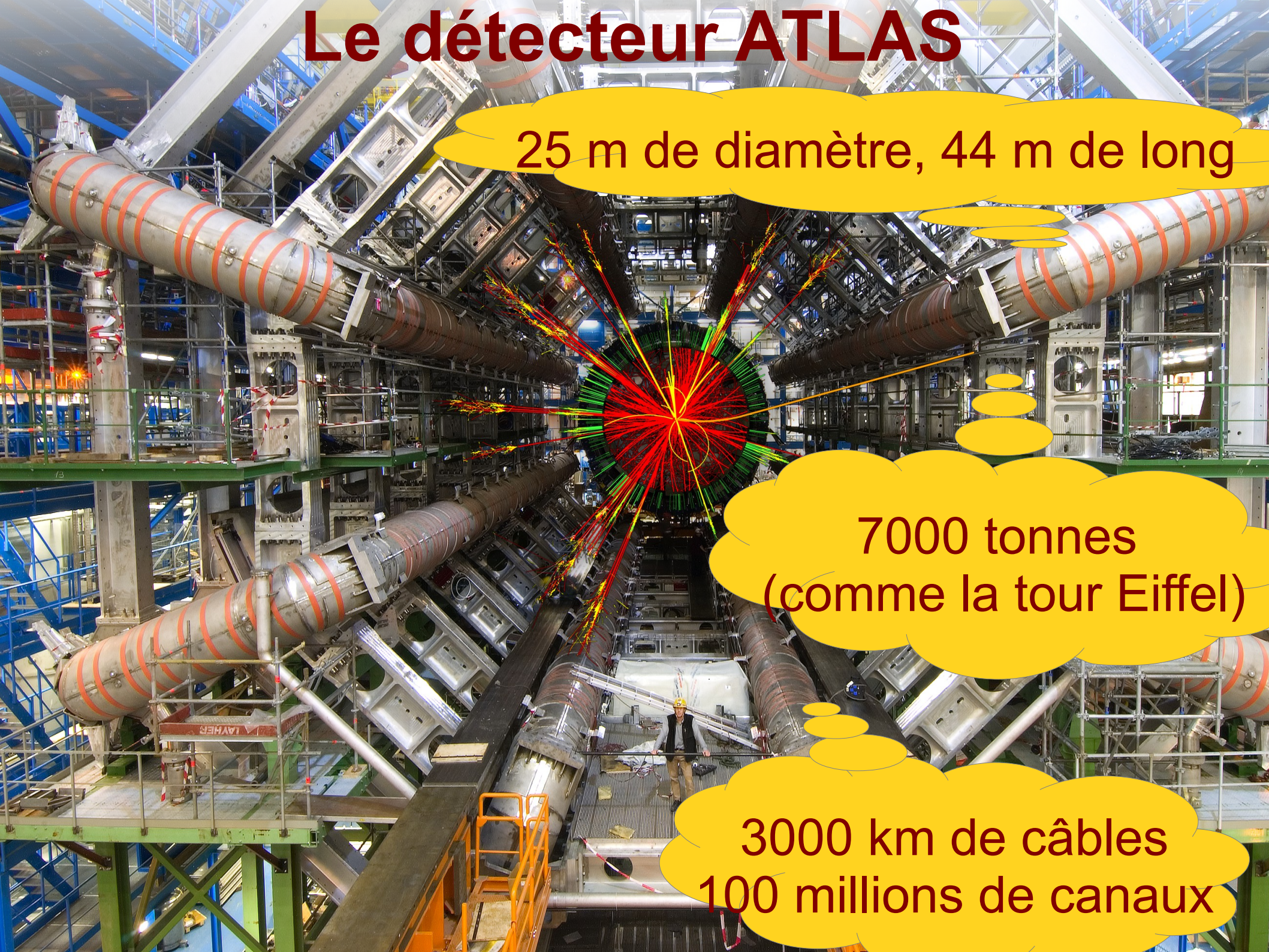


Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles
100 millions de canaux



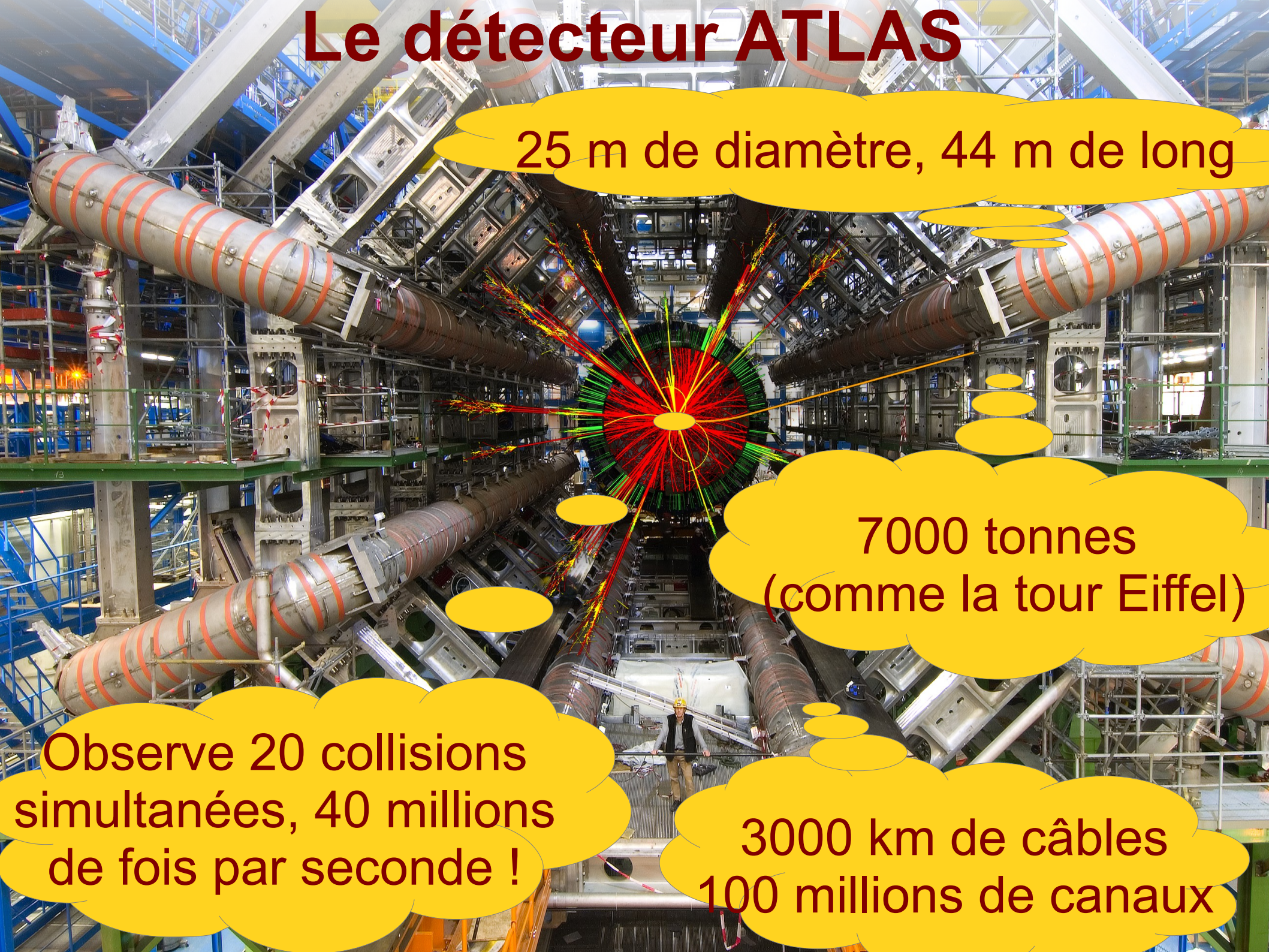
Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

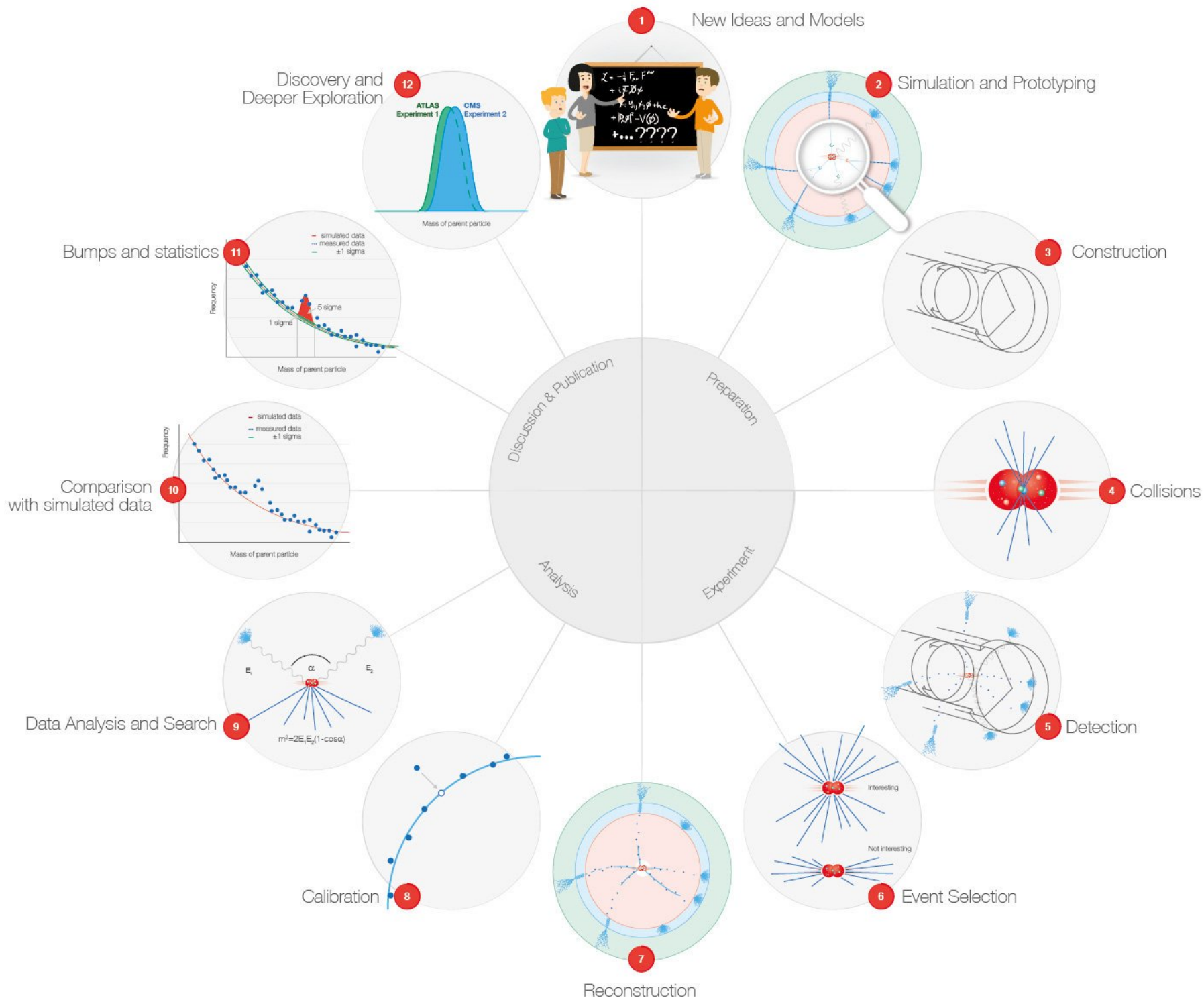
En France :
6 laboratoires CNRS,
1 CEA, 400 personnes
(physiciens, ingénieurs,
étudiants)

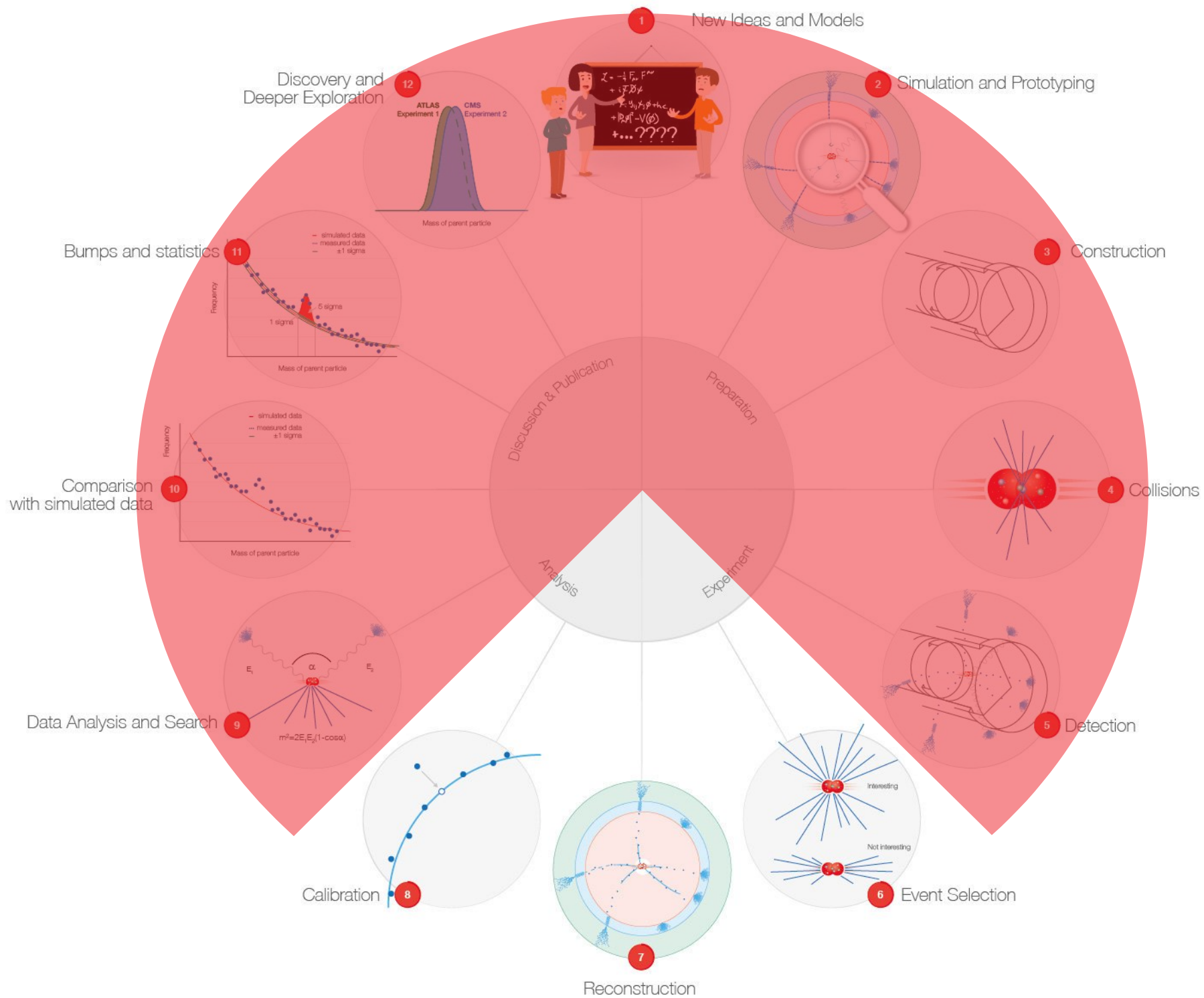
7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

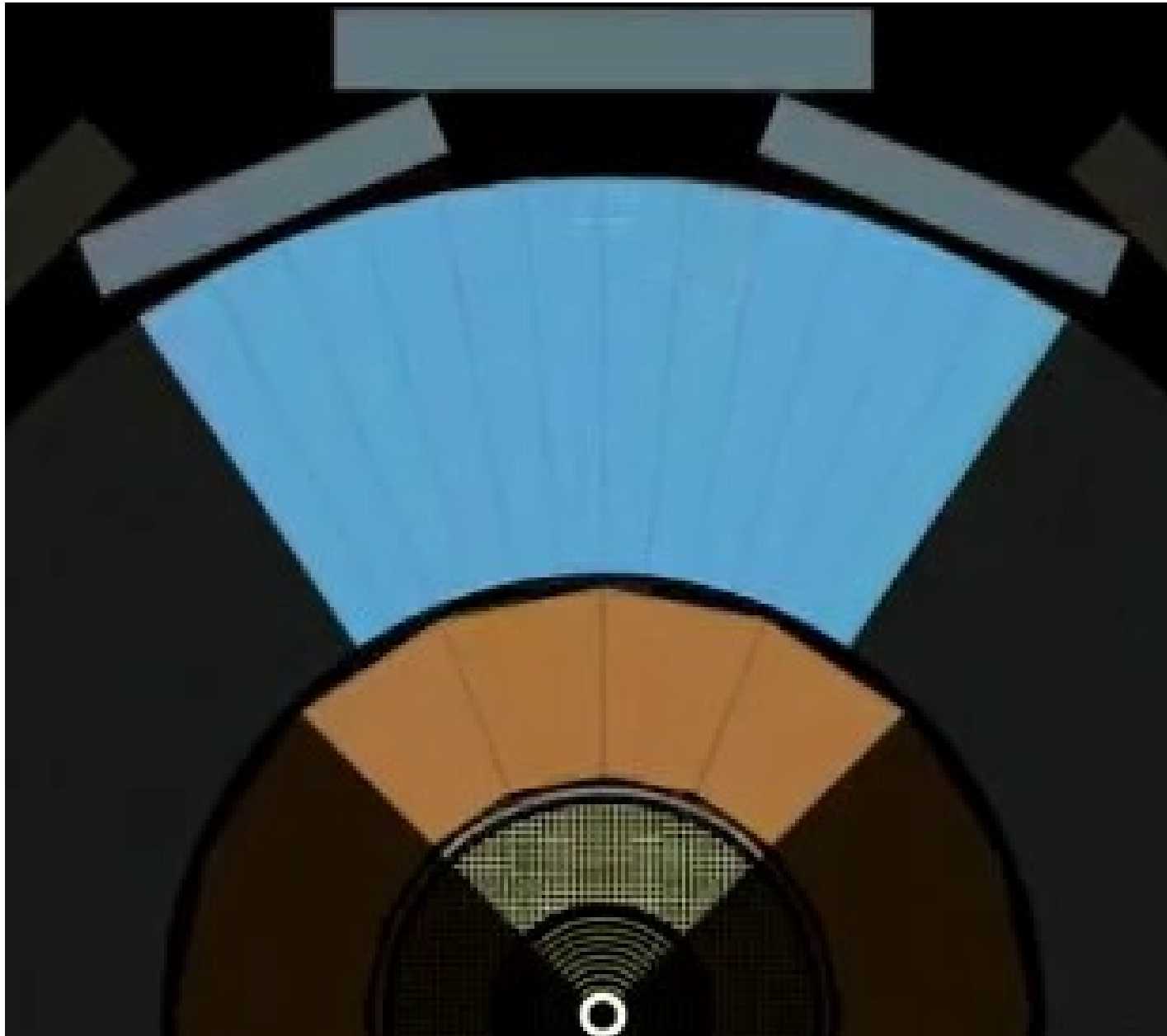
3000 km de câbles
100 millions de canaux







Interaction des particules avec le détecteur



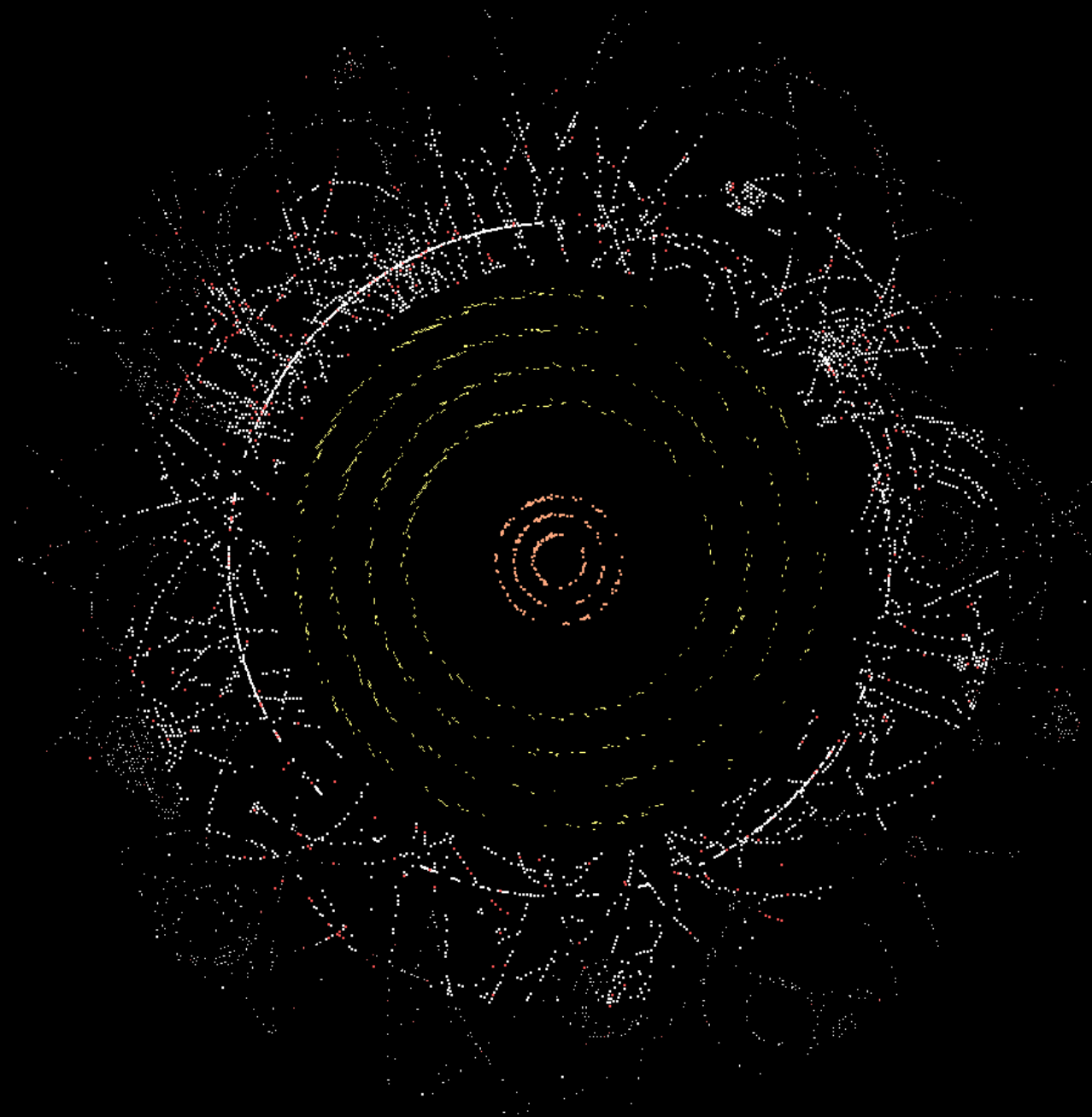
Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



© CERN

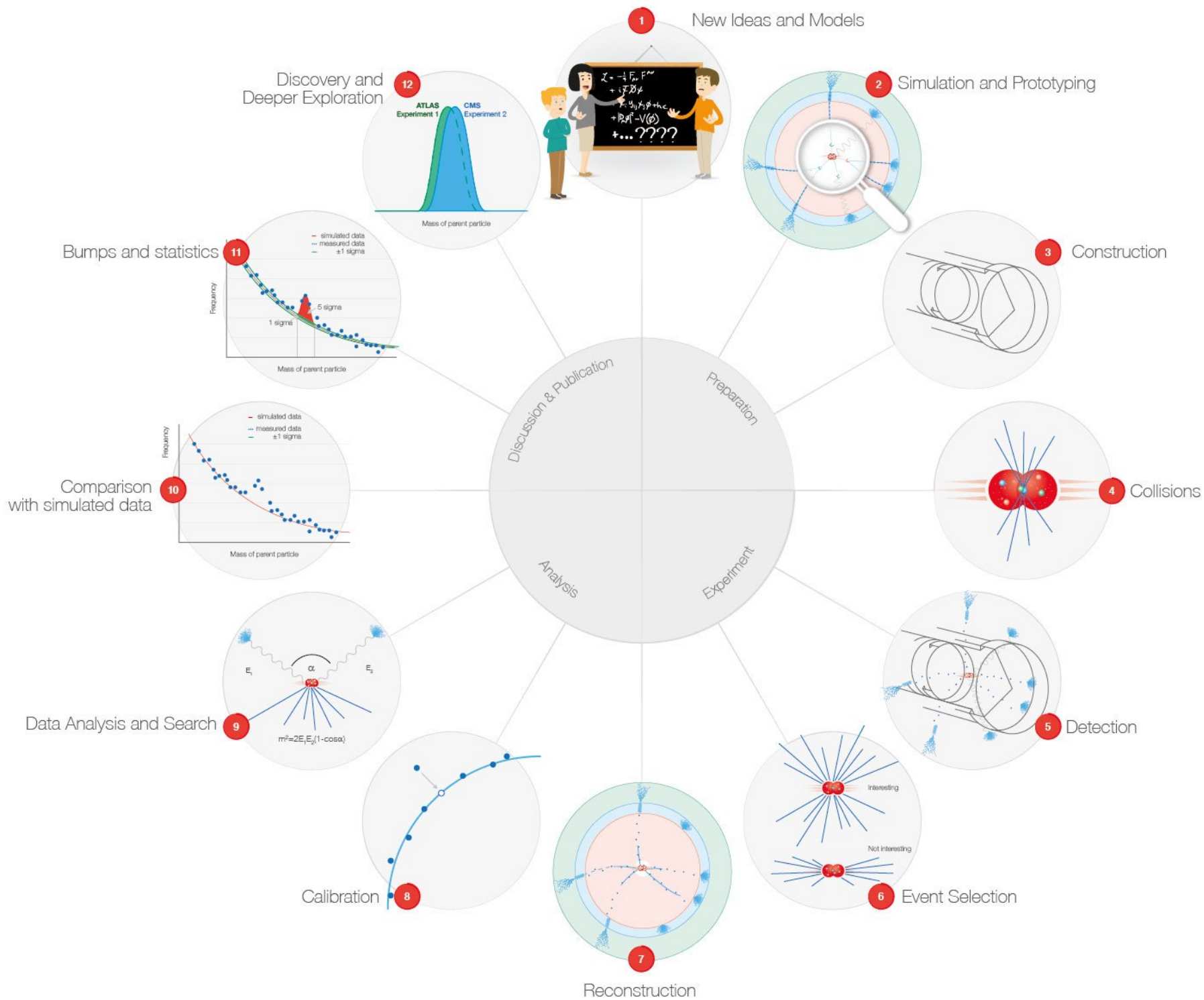
- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m² de silicium

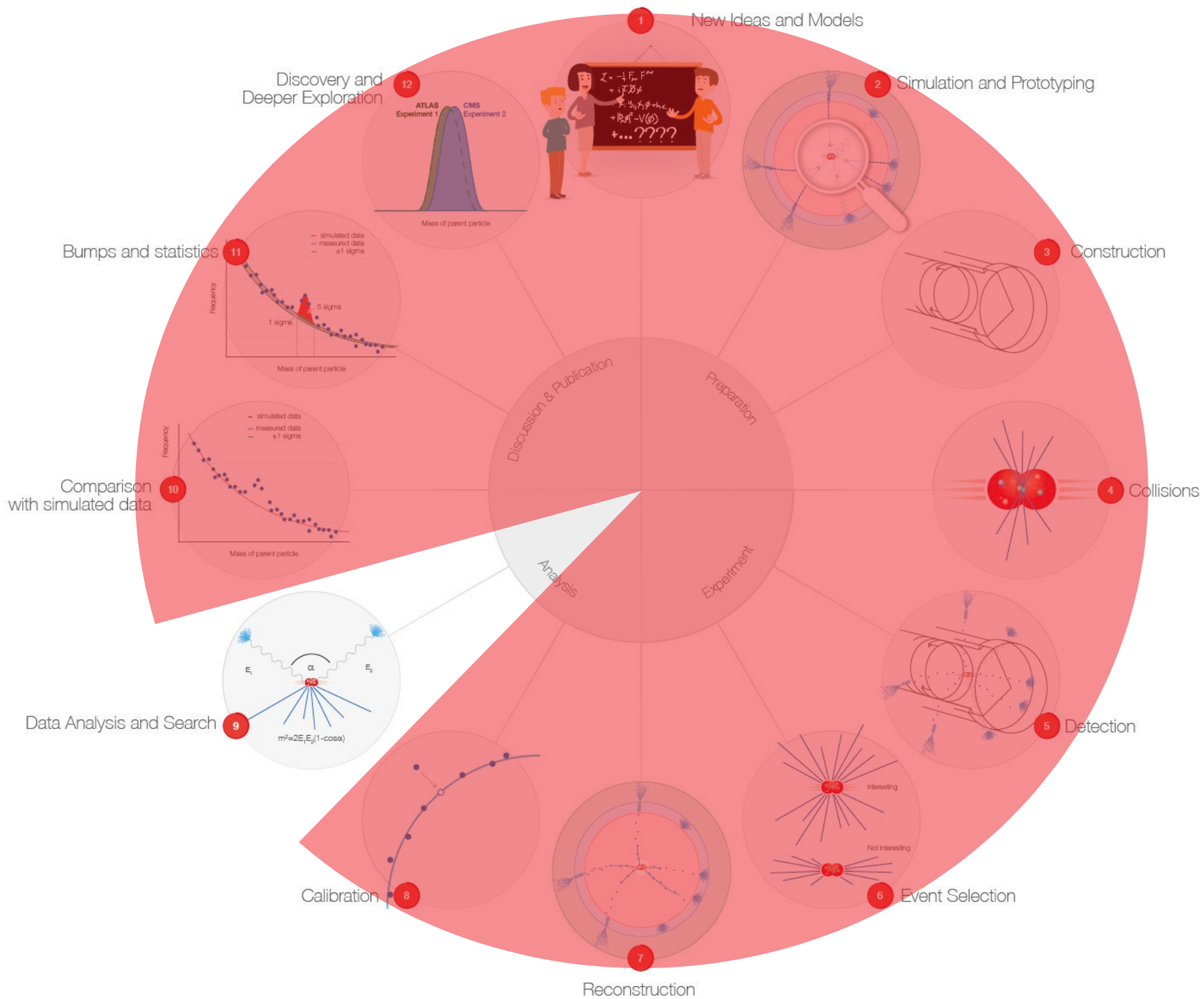
Passage des particules



Reconstruction des trajectoires

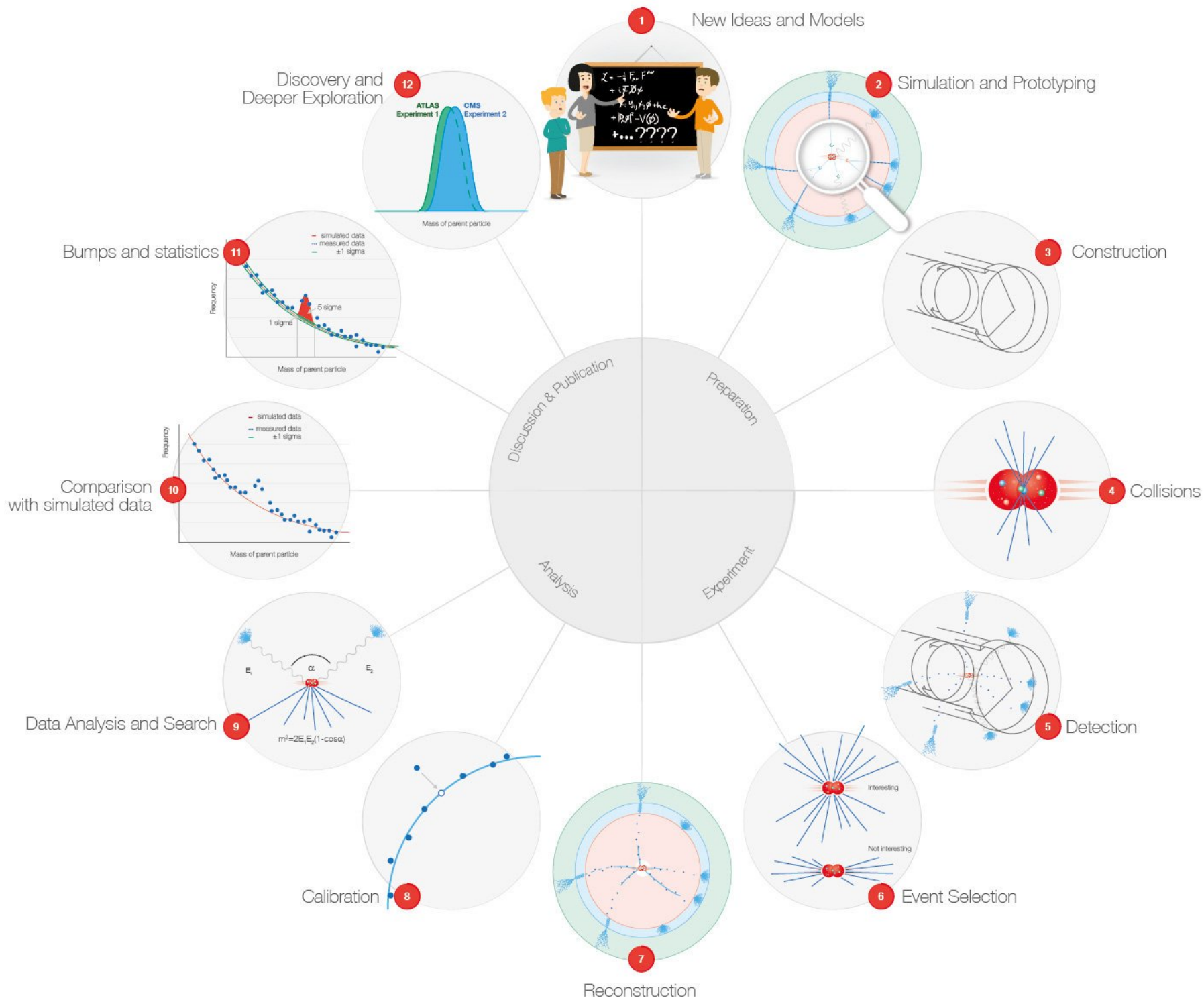


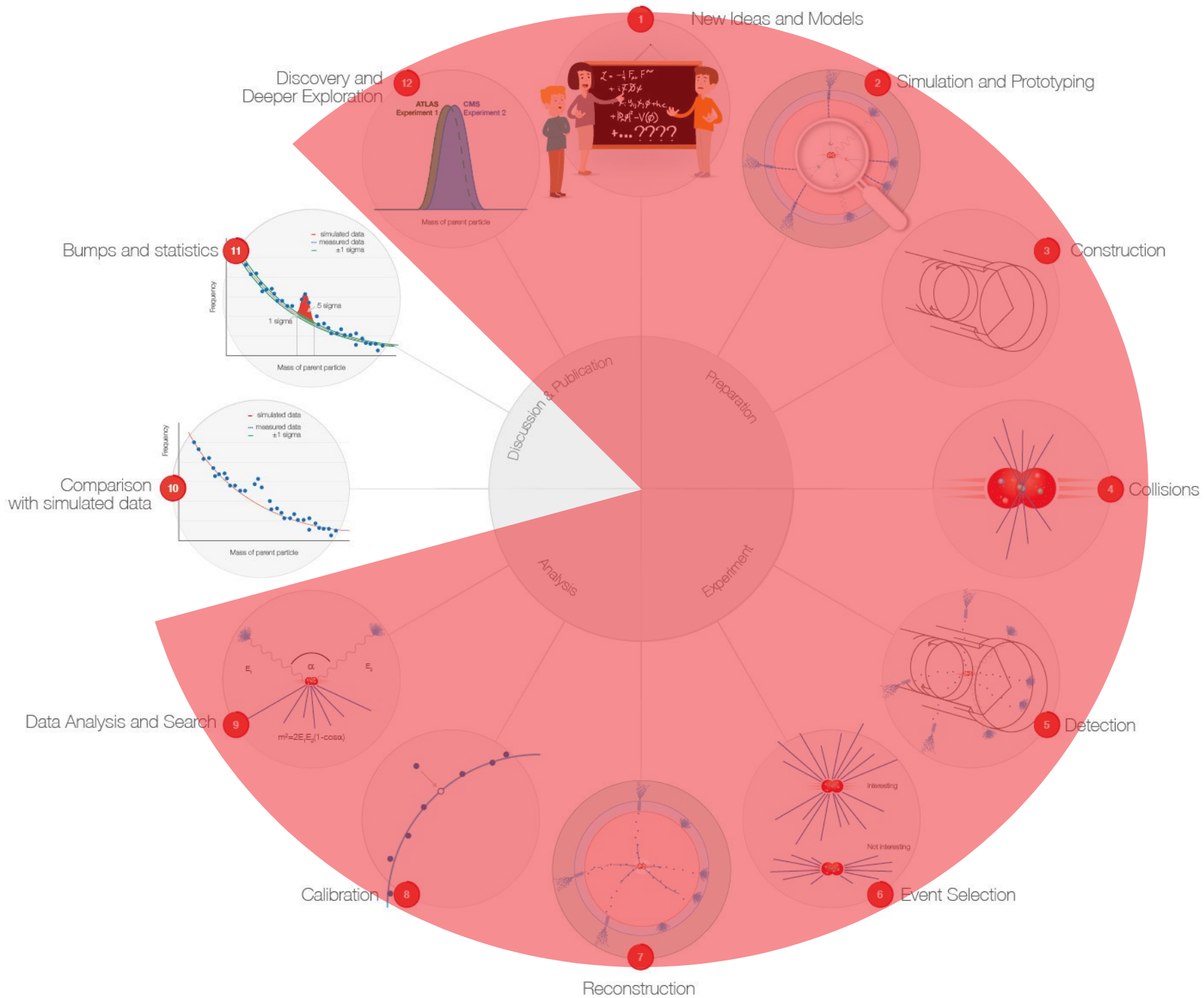




Le LHC en action



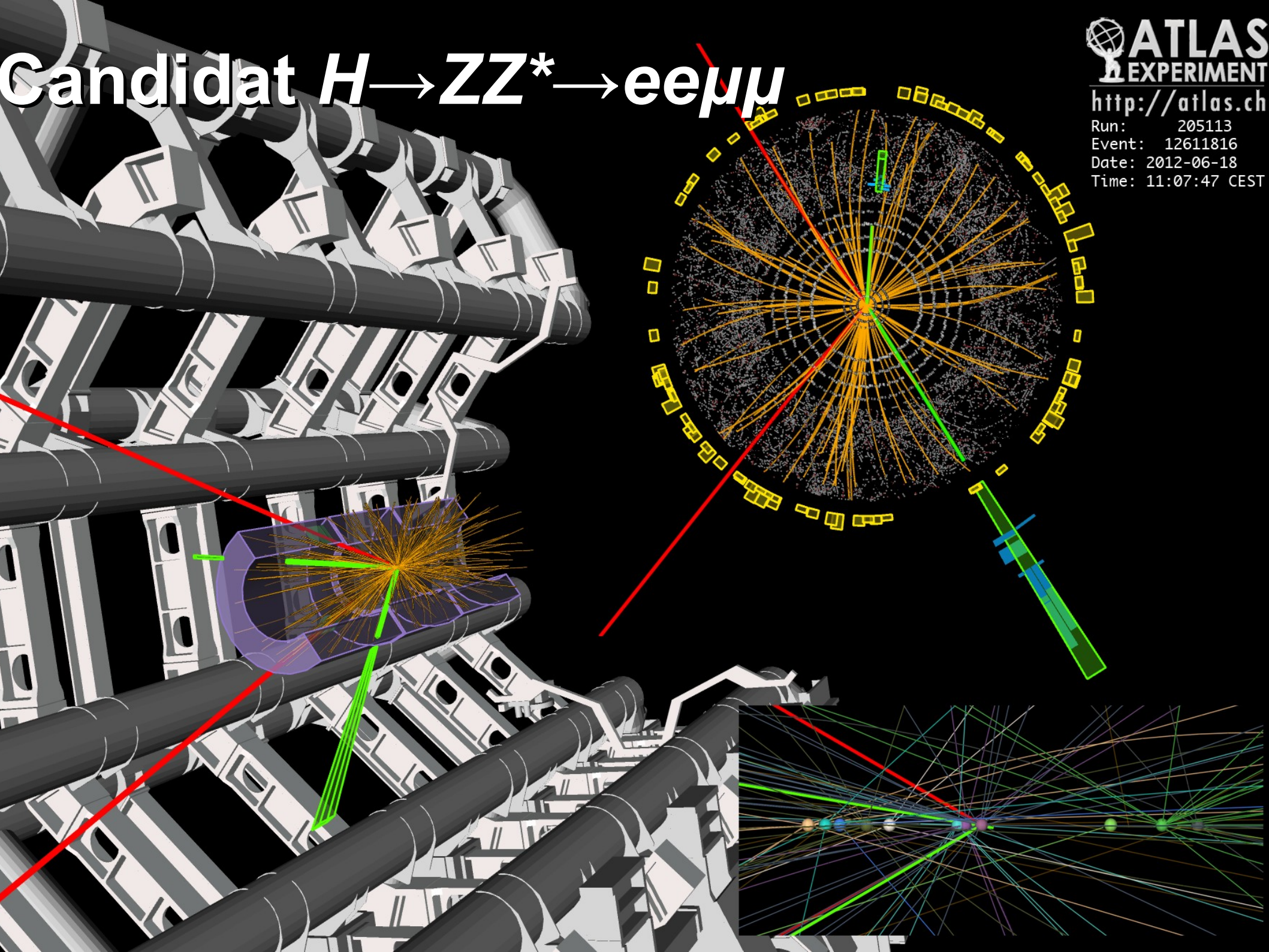




Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

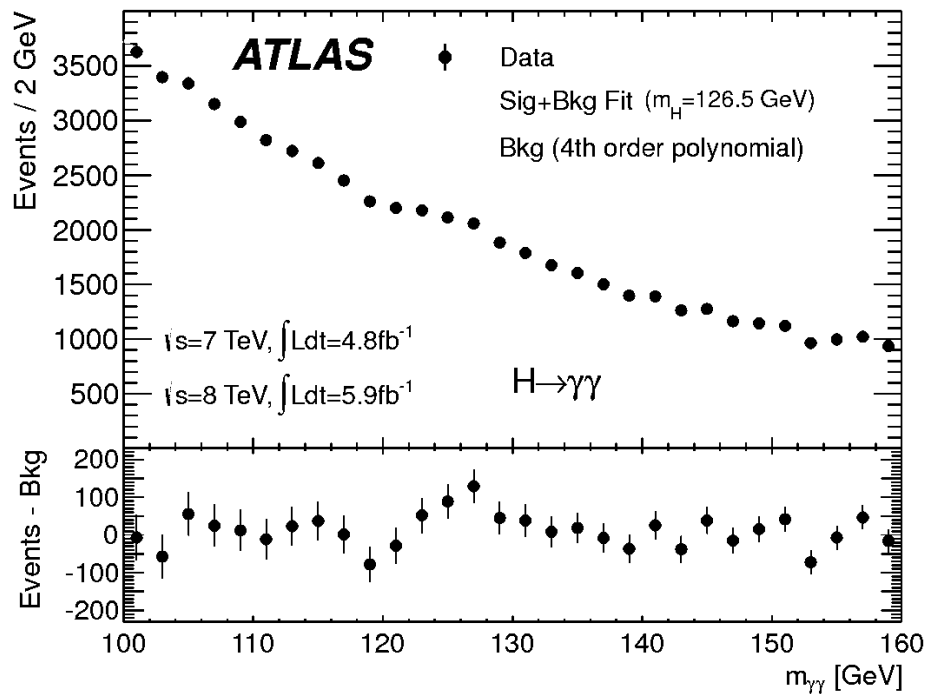


Candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$



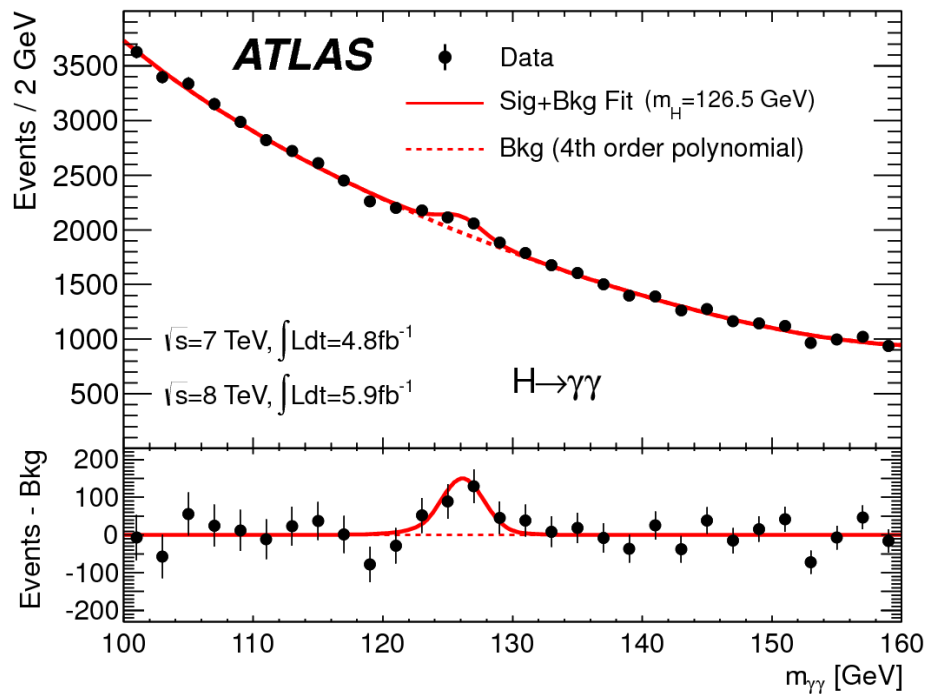
Mesure

- Higgs en 2 photons
 - Bruit de fond important
 - Petit pic avec « beaucoup » de signal



Measure

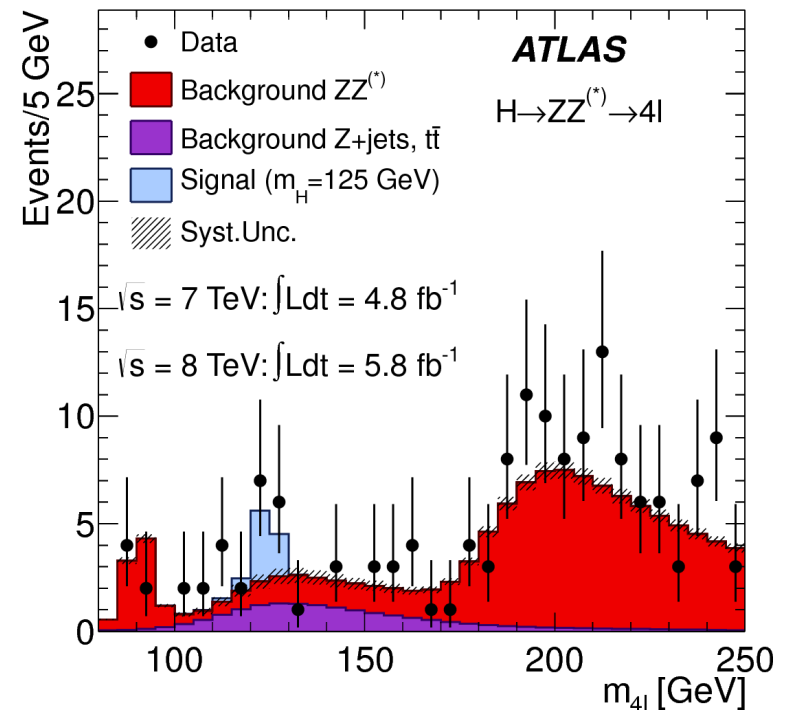
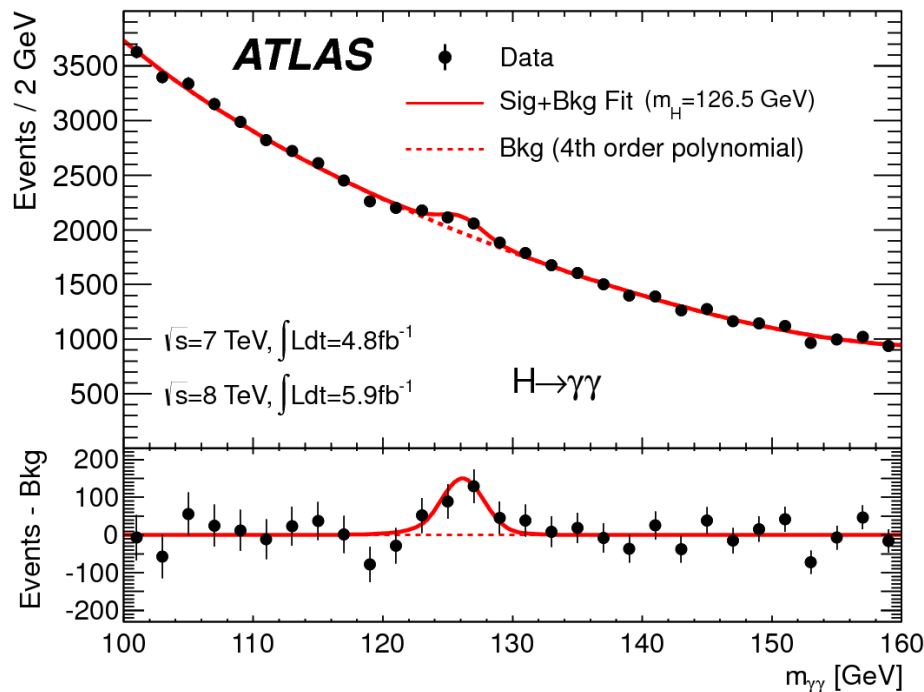
- Higgs en 2 photons
 - ▶ Bruit de fond important
 - ▶ Petit pic avec
« beaucoup » de signal



Mesure

- Higgs en 2 photons
 - Bruit de fond important
 - Petit pic avec « beaucoup » de signal

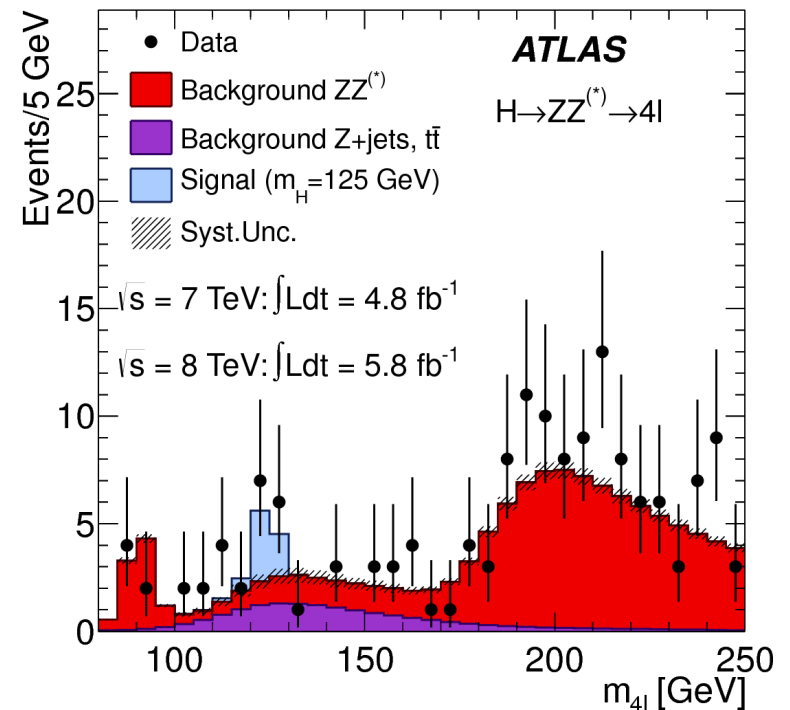
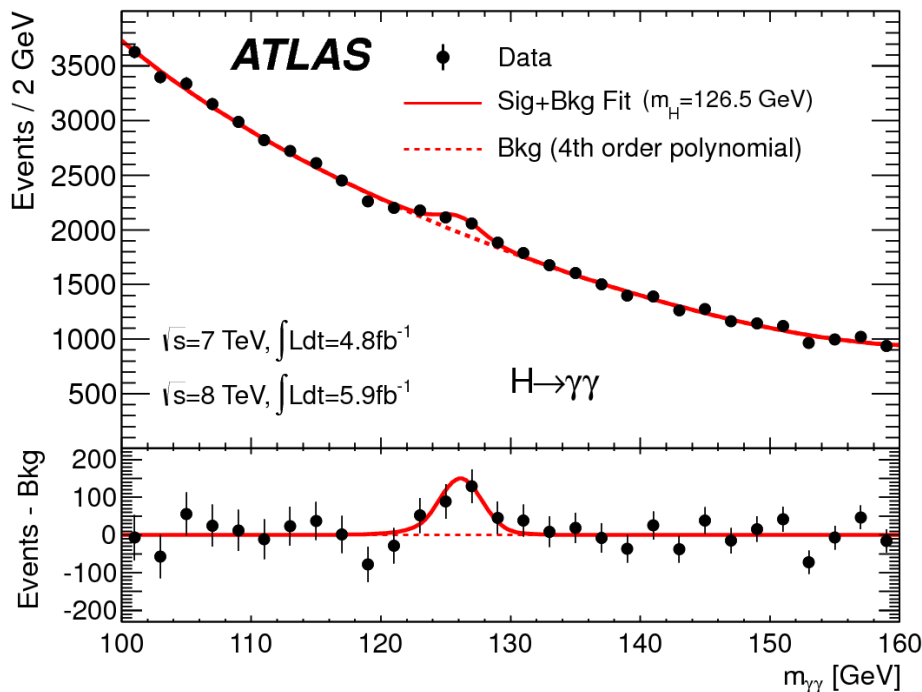
- Higgs en ZZ
 - Très peu de bruit de fond
 - Très peu d'événements



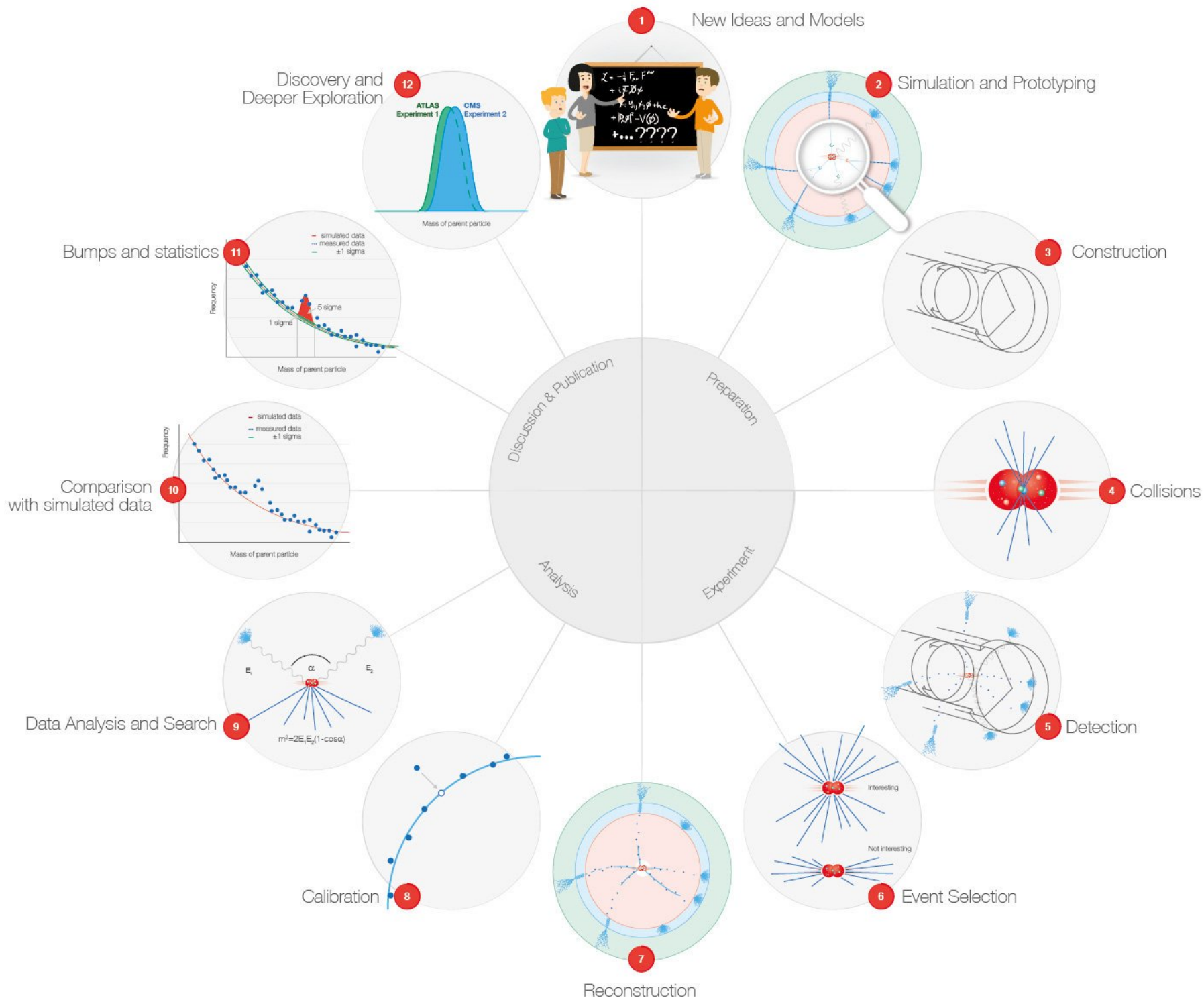
Mesure

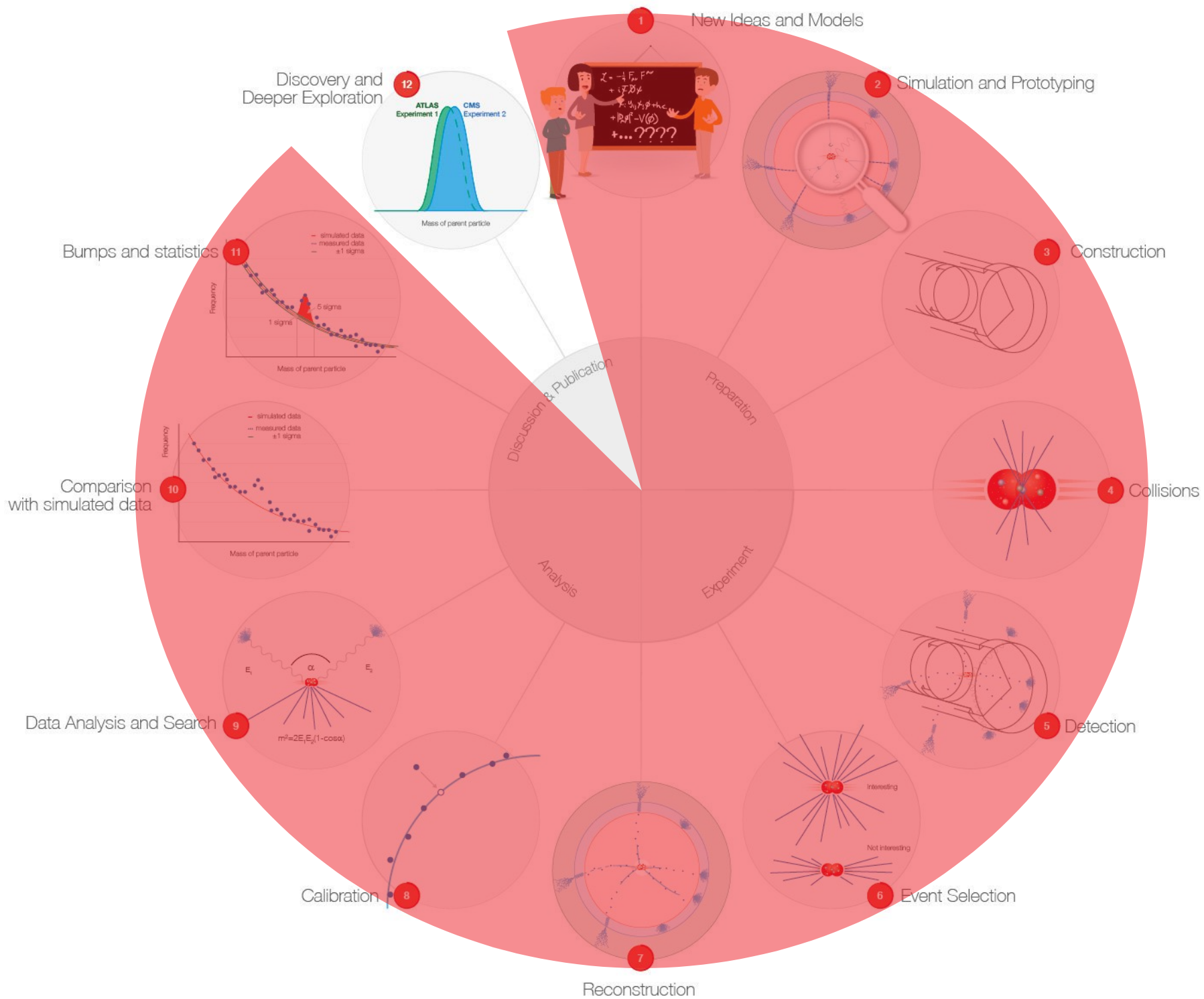
- Higgs en 2 photons
 - Bruit de fond important
 - Petit pic avec « beaucoup » de signal

- Higgs en ZZ
 - Très peu de bruit de fond
 - Très peu d'événements



Est-ce que cela est significatif ?
Outils statistiques pour répondre



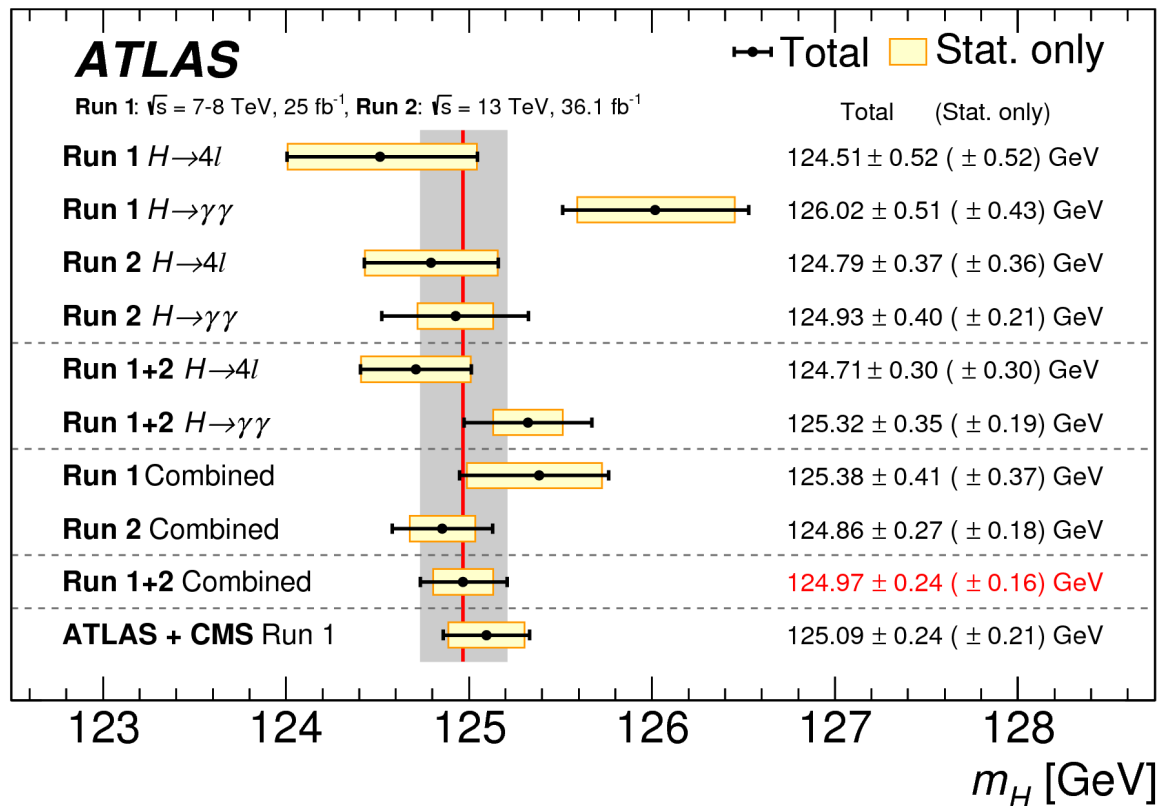


[illegible]

Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :

- ▶ $m_H = 125.09 \pm 0.24$ (0.21 stat. $\pm$ 0.11 syst.) GeV
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]
(134 fois la masse du proton)



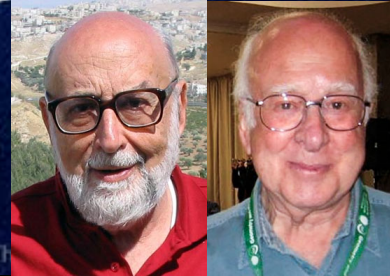
Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :
 - ▶ $m_H = 125.09 \pm 0.24$ (0.21 stat. $\pm$ 0.11 syst.) GeV
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]
(134 fois la masse du proton)
- La signification statistique a continué d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Mesure des propriétés :
 - ▶ Canaux divers, modes de production, couplages, spin...
 - ▶ Confirmation du modèle standard...

Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs

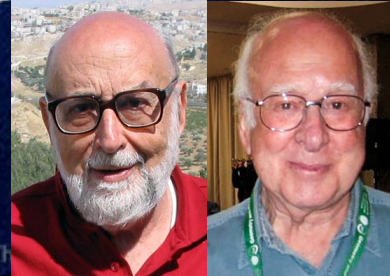


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs

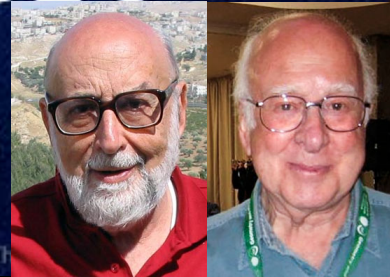


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



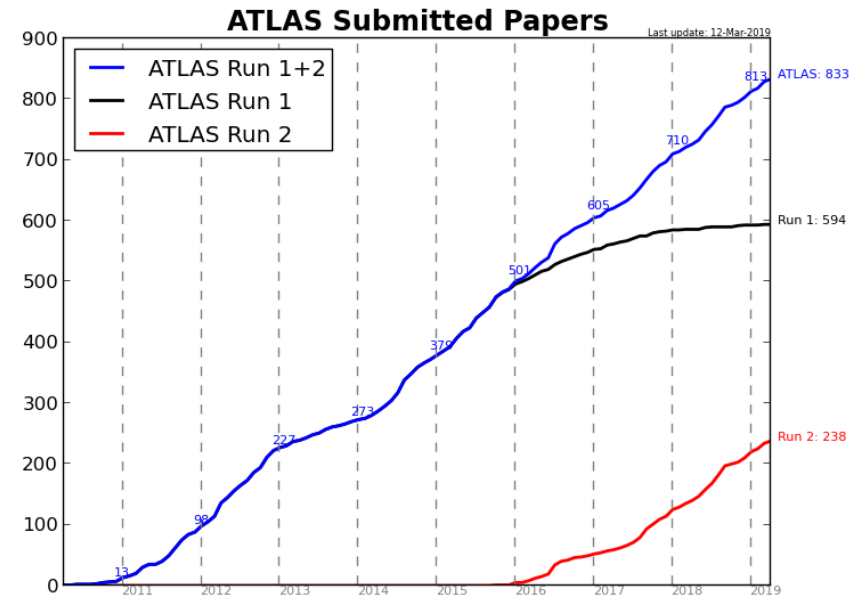
« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



Le CERN et les expériences ATLAS & CMS

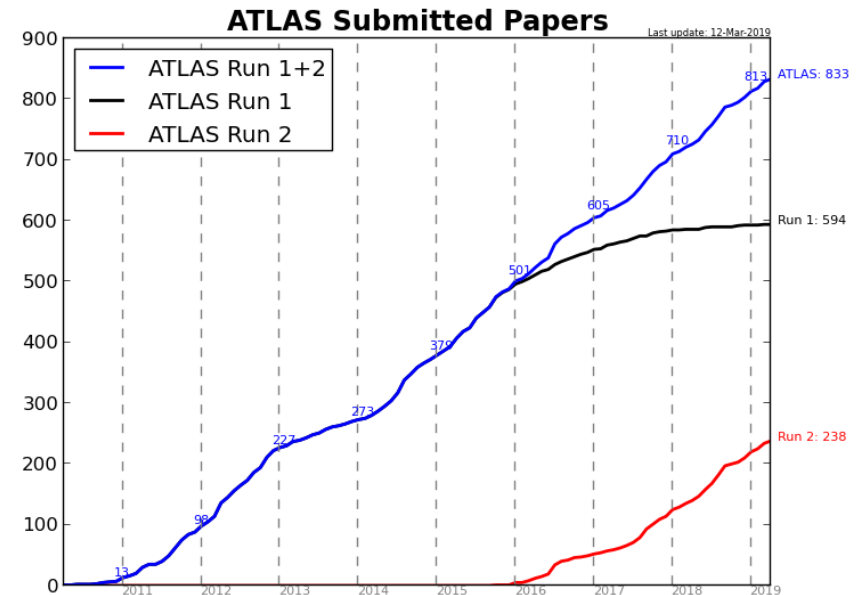
Publications

- ATLAS :
 - ▶ > 840 publications
 - ▶ > 950 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
 - ▶ > 450 publications
- ALICE :
 - ▶ > 200 publications



Publications

- ATLAS :
 - ▶ > 840 publications
 - ▶ > 950 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
 - ▶ > 450 publications
- ALICE :
 - ▶ > 200 publications



**Toutes les publications du LHC
sont accessibles gratuitement
par tous**

Forte pression du CERN sur les journaux :
Open Access

C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



Modèle standard

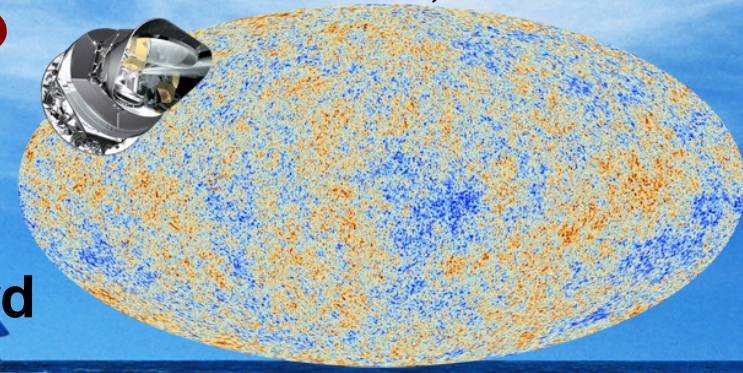


C'est tout ?

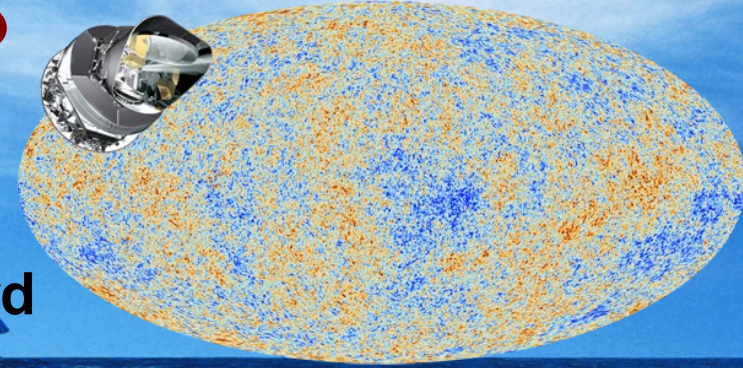
Nous et l'Univers visible



5% Modèle standard



C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

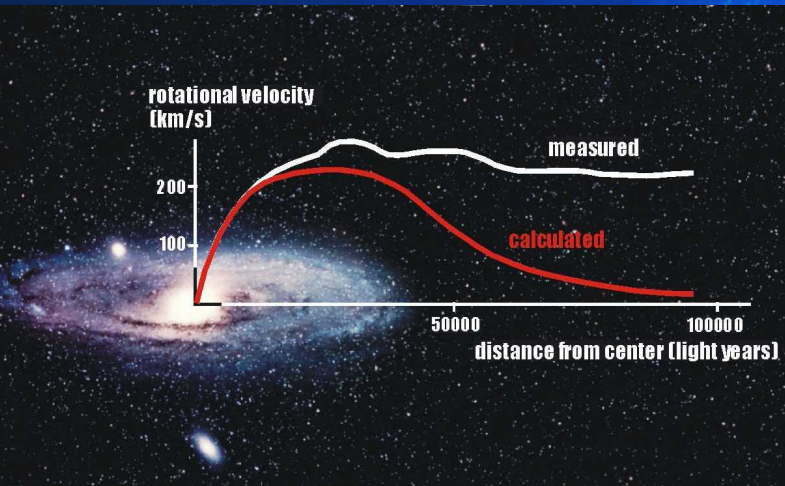


5% Modèle standard

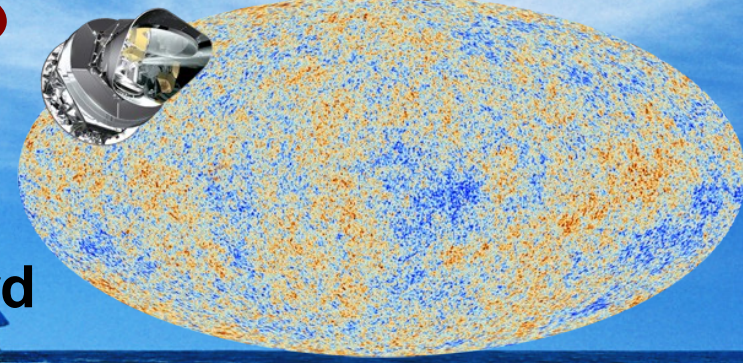
27% Matière noire



- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

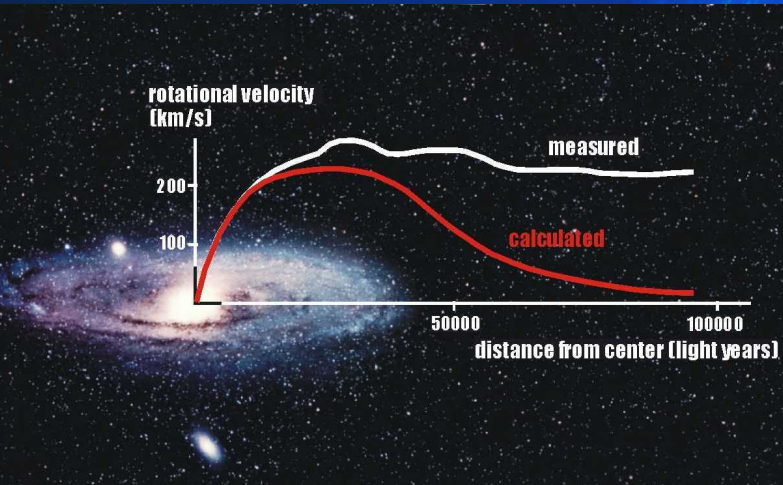


5% Modèle standard

27% Matière noire



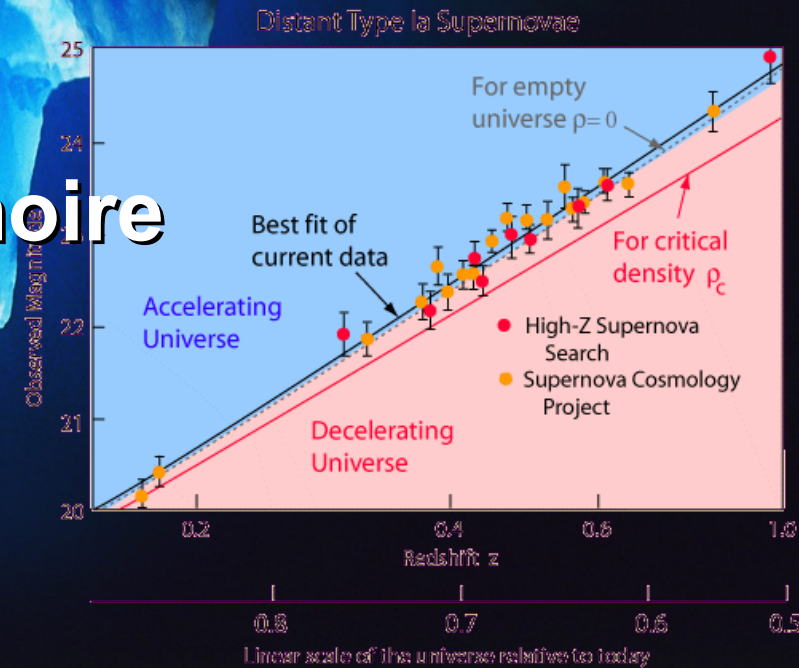
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?

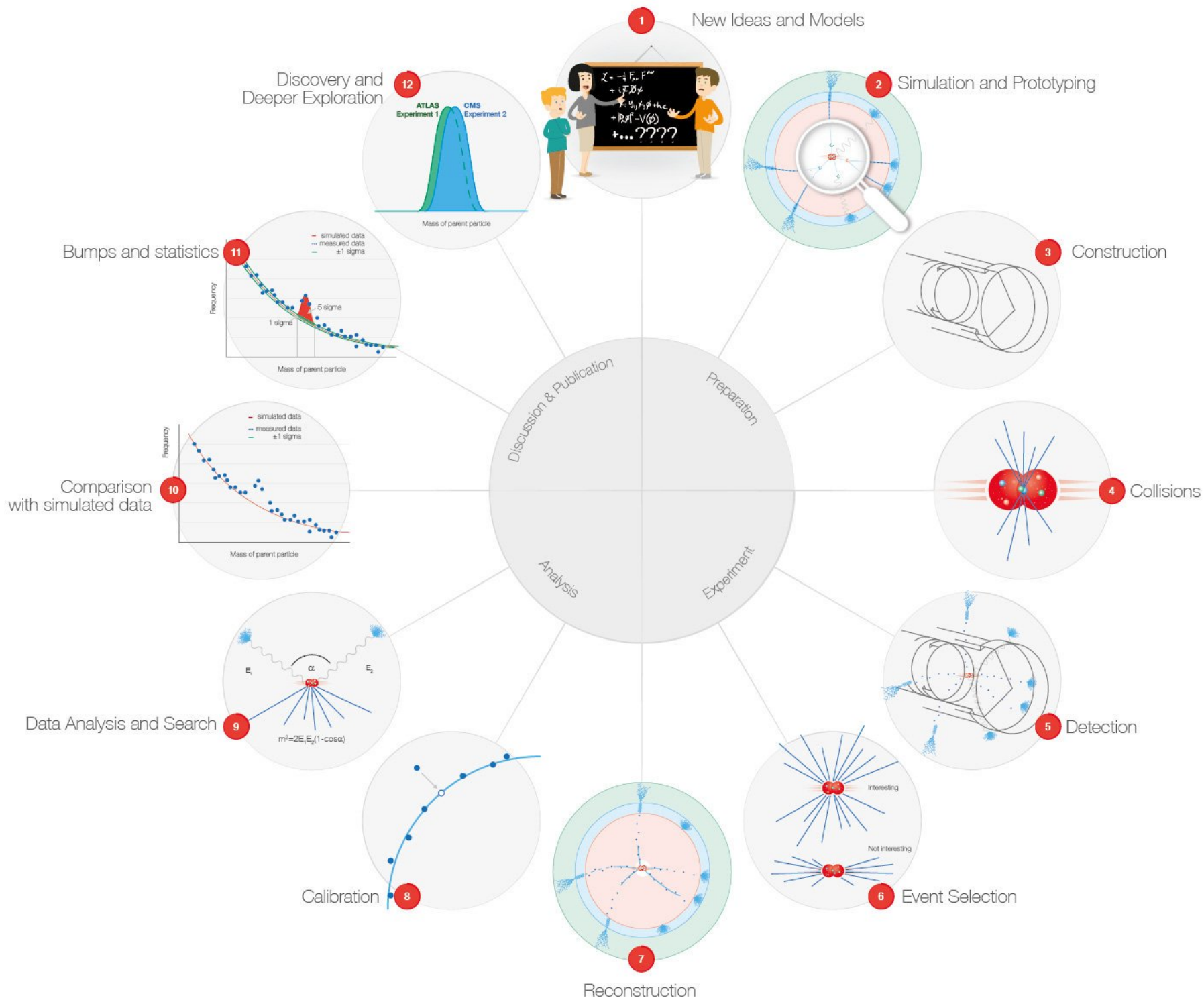


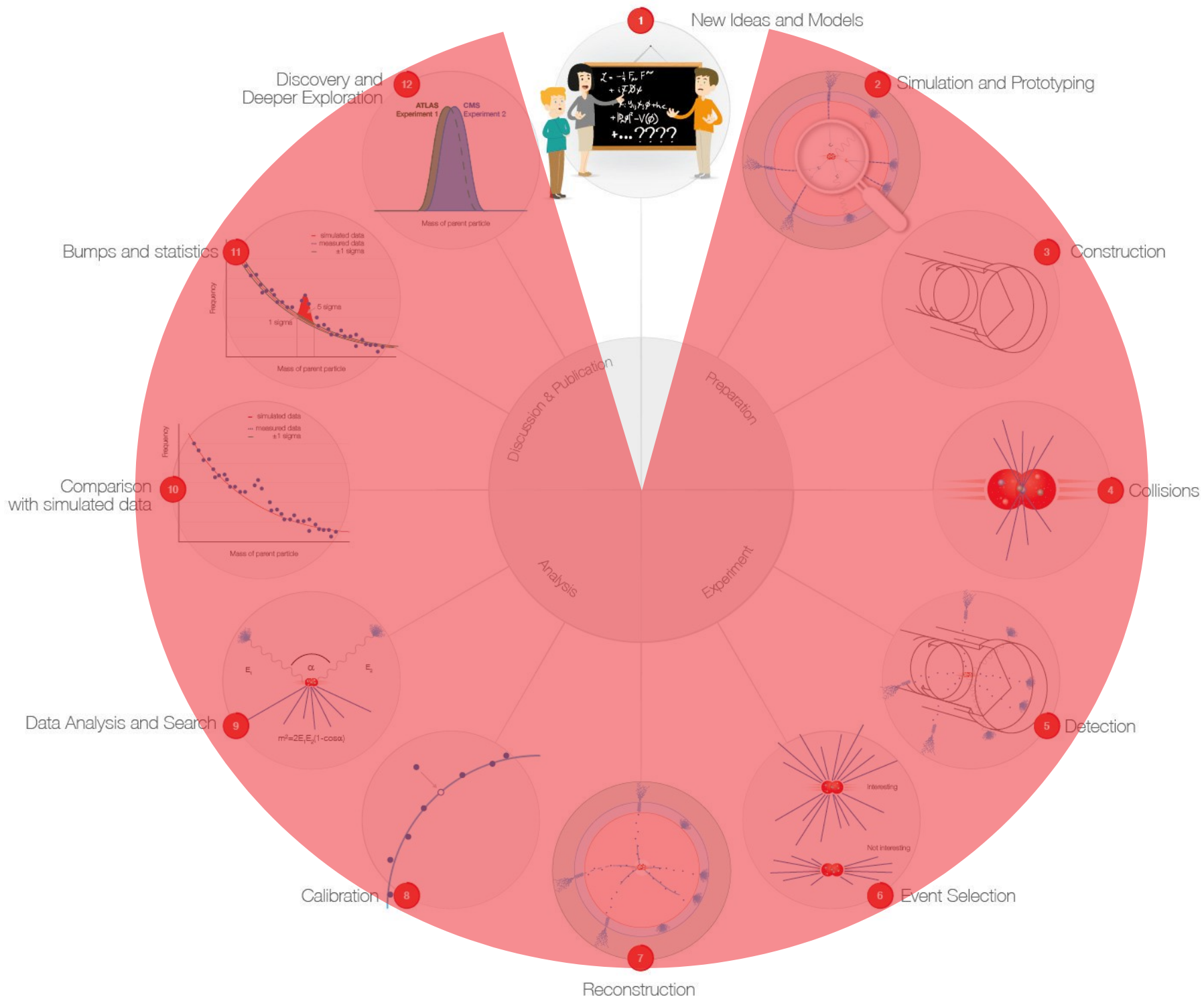
68% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !

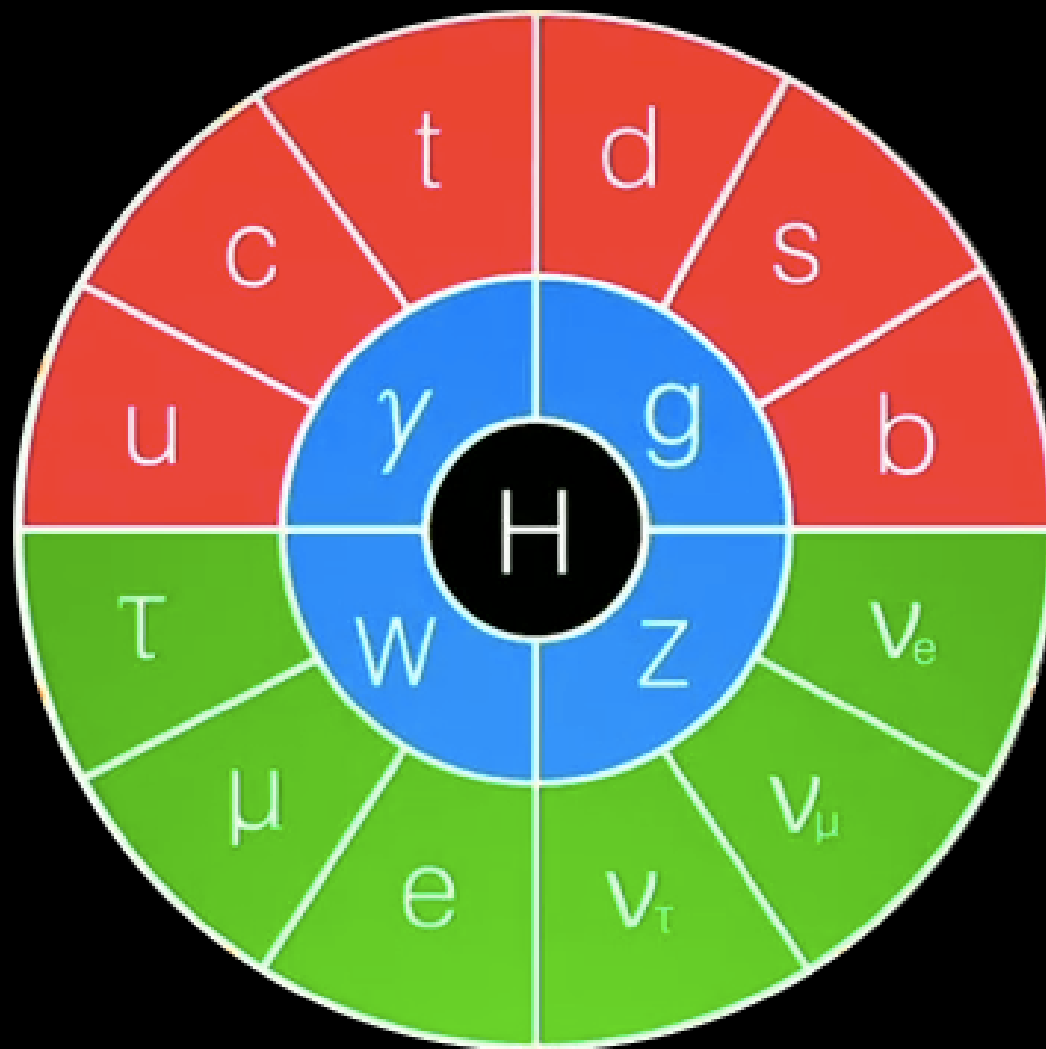


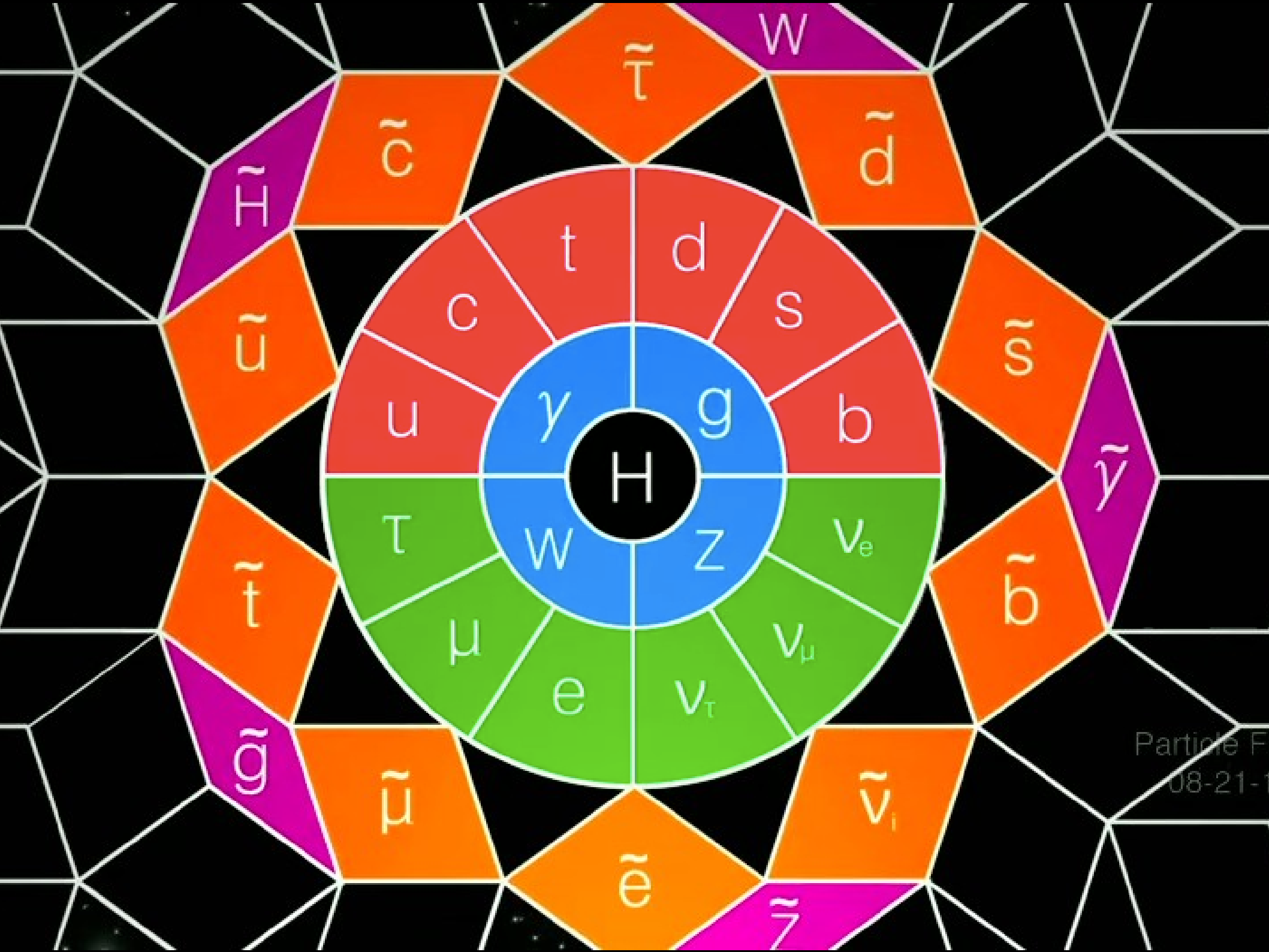




Autres théories

- Le modèle standard n'explique pas tout :
 - Pourquoi trois familles ?
 - Pourquoi les particules élémentaires ont des masses si différentes ?
 - Que sont la matière noire et l'énergie noire ?
 - Pourquoi l'antimatière a presque disparu ?
- Les théoriciens ne manquent pas d'idées pour le compléter
- Beaucoup de modèles font des prédictions que l'on peut tester au LHC
- Supersymétrie, modèles exotiques, dimensions supplémentaires d'espace, ...
 - Prédiction de nouvelles particules, ou d'effets sur les phénomènes déjà connus
- Besoin de mesures expérimentales pour orienter les théoriciens





Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?



Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

LHC Saisons 2 & 3 (Runs 2&3) :

- Étude des propriétés du boson observé
 - Déviations du modèle standard ?
- Recherche d'autres bosons de Higgs
 - Signe de nouvelle physique ?

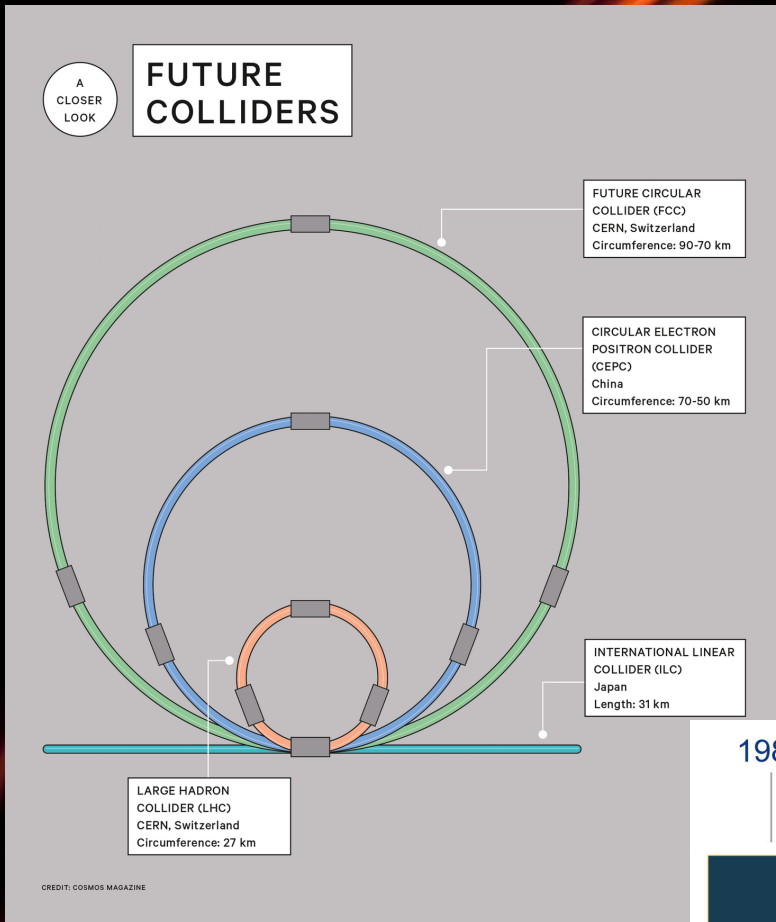
Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

LHC Saisons 2 & 3 (Runs 2&3) :

- Étude des propriétés du boson observé
 - Déviations du modèle standard ?
- Recherche d'autres bosons de Higgs
 - Signe de nouvelle physique ?
- Recherche de candidats pour expliquer la matière noire
- Asymétrie matière-antimatière
- On espère des surprises !

Et après ?



1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 2025 2030 2035 2040



HL-LHC - ongoing project



~20 years

FCC – design study



Liens

ATLAS@home



atlasathome.cern.ch

ATLAS grand public



atlas.cern

ATLAS en direct

atlas-live.cern.ch

ATLAS sur



twitter.com/ATLASexperiment

ATLAS sur



www.facebook.com/ATLASexperiment

ATLAS sur



www.instagram.com/atlasexperiment

ATLAS sur



www.youtube.com/theATLASExperiment

Site français du



www.lhc-france.fr

Le CPPM



www.cppm.in2p3.fr

Le CERN



home.cern



twitter.com/cppmluminy

twitter.com/cern

Le CERN sur



www.facebook.com/cern

«Nouvelle» affiche du SM

www.particuleselementaires.fr