

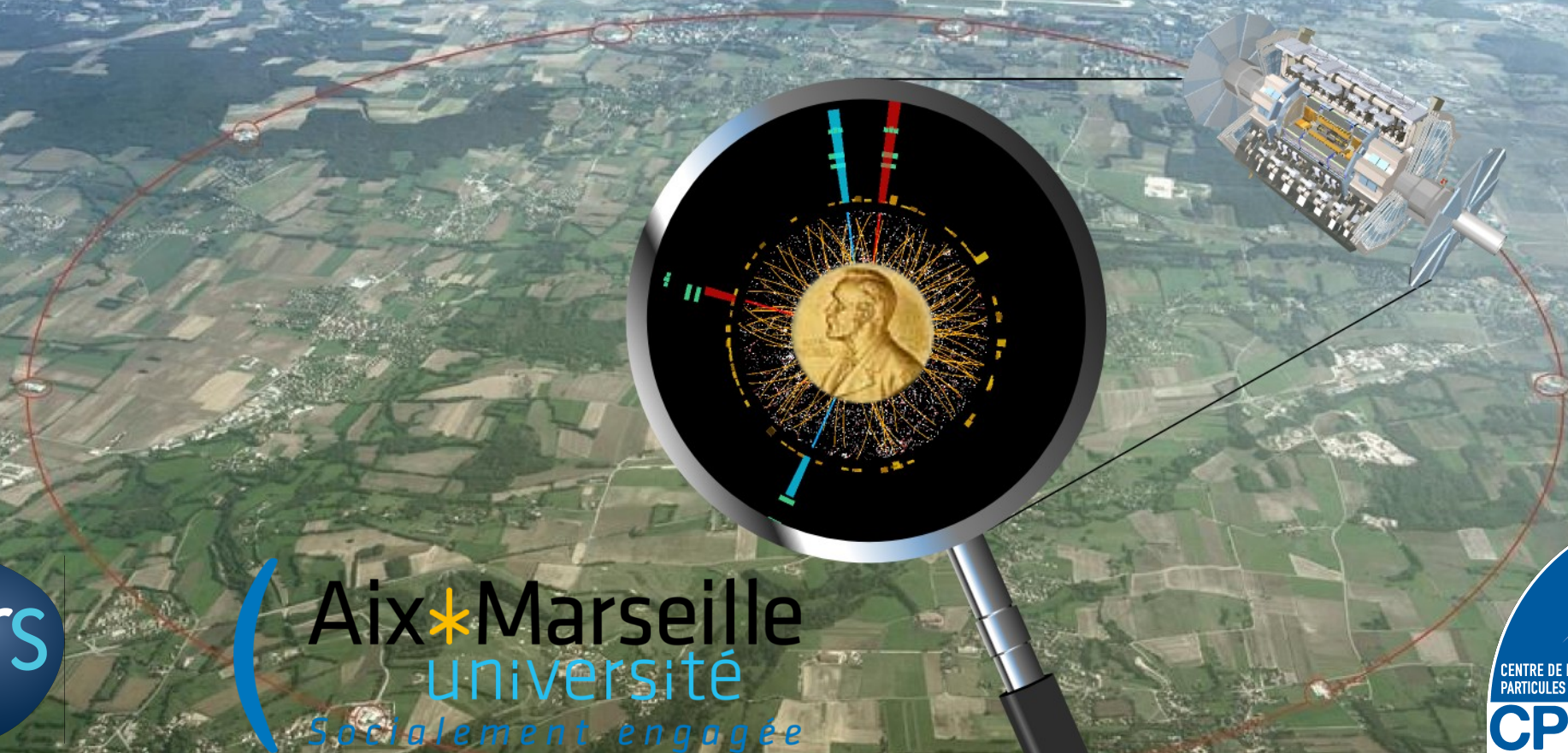
# ATLAS

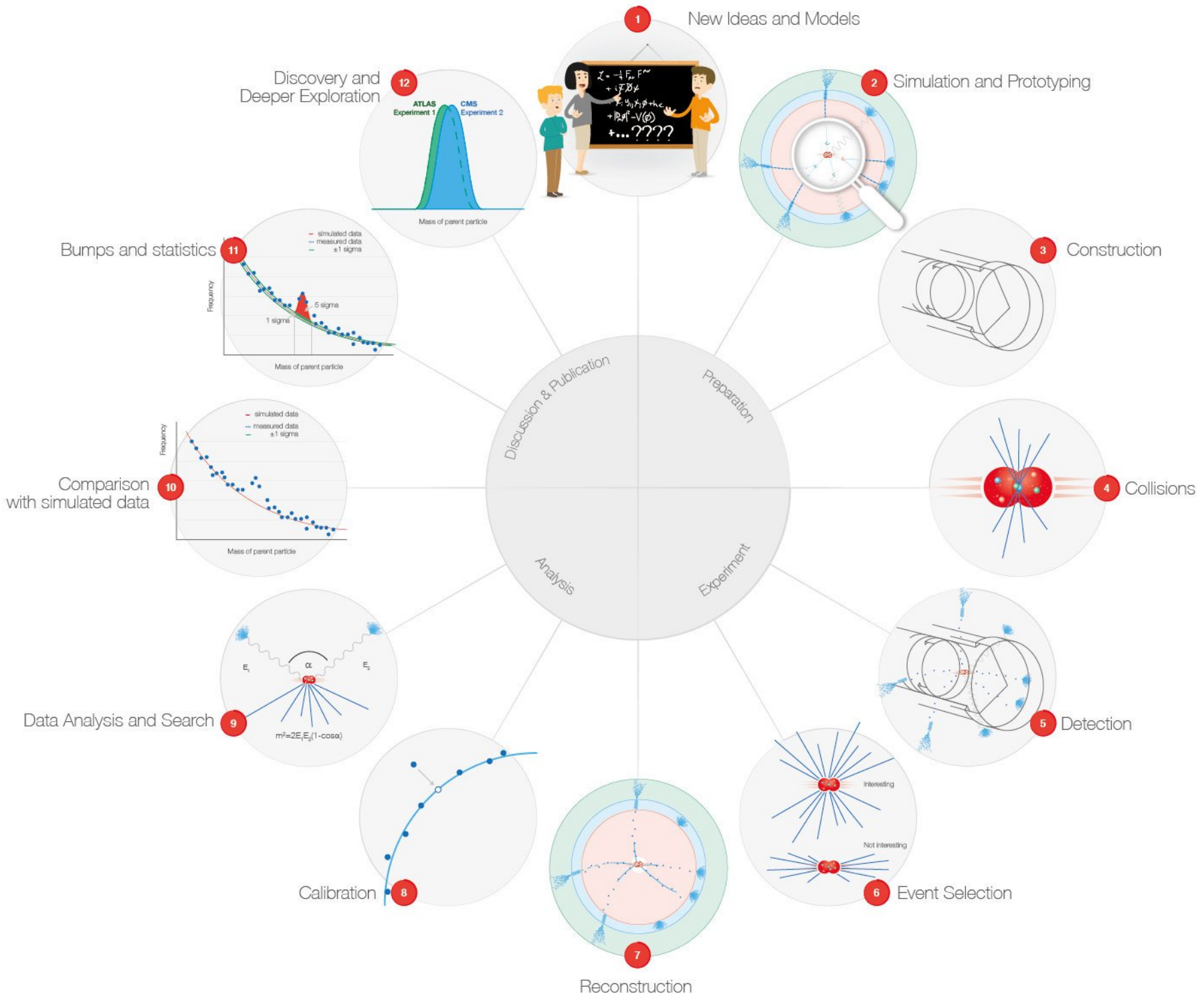
## Cycle de vie d'une expérience

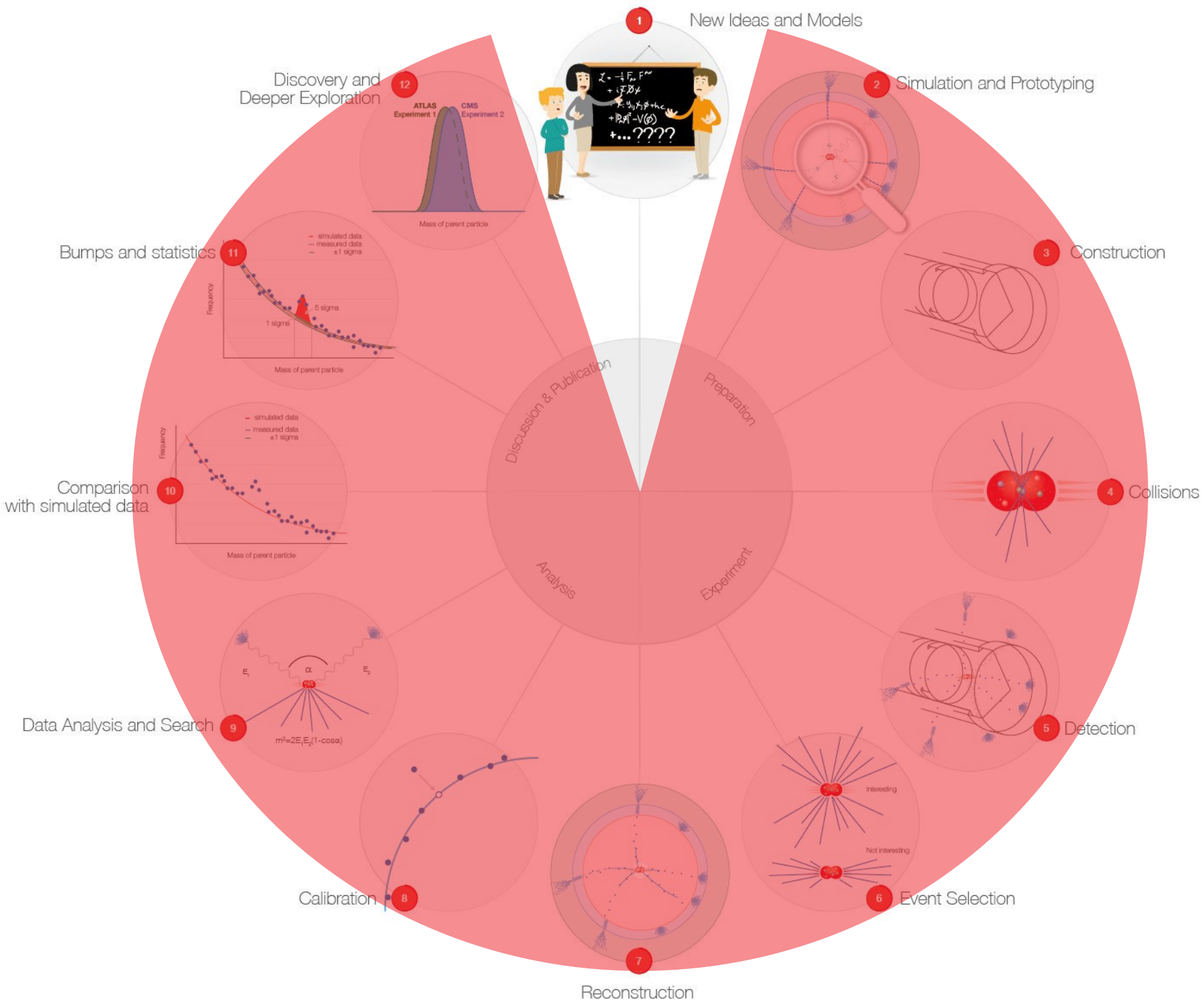
Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

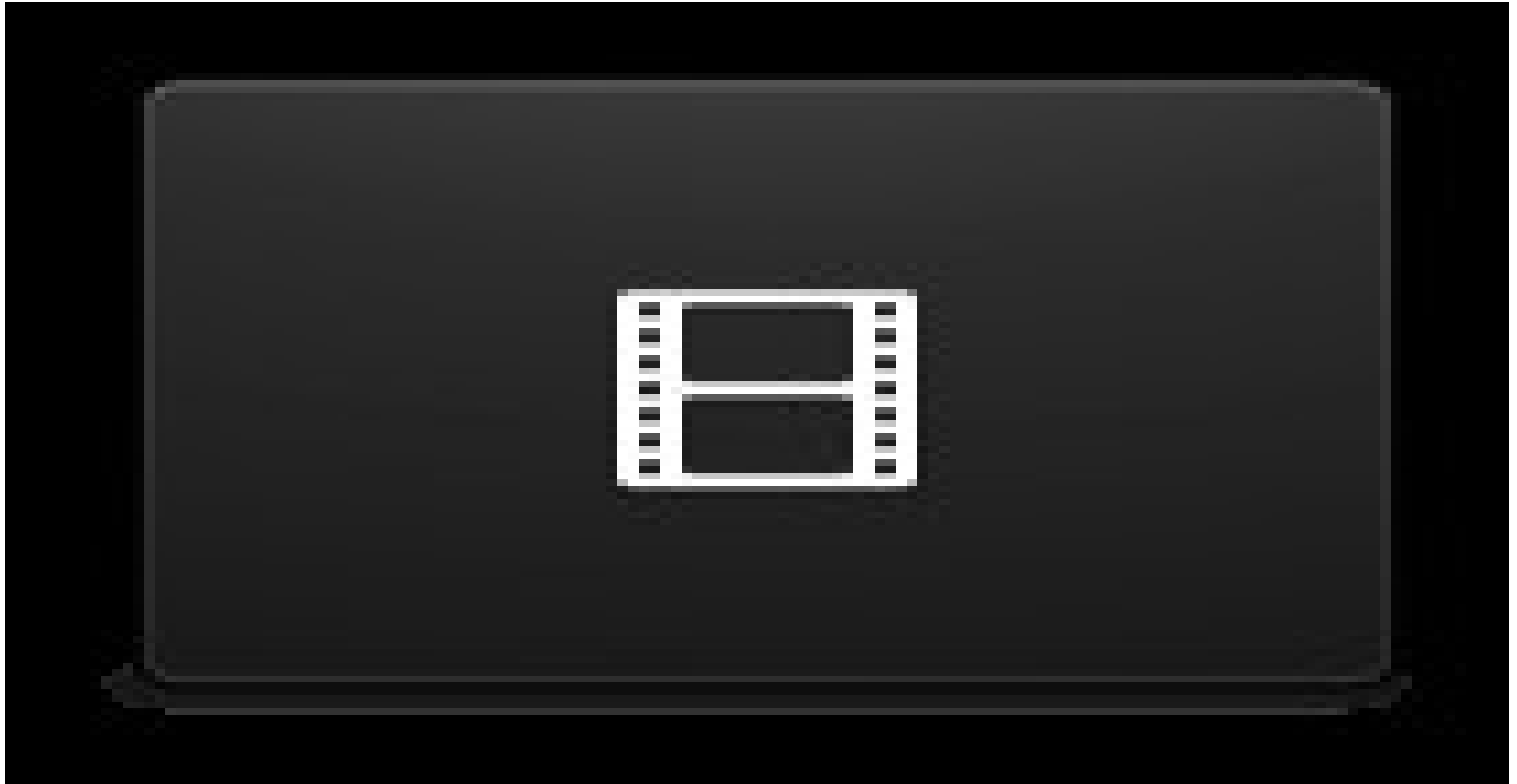
26 janvier 2022







# De l'infiniment grand vers l'infiniment petit



# La physique des particules

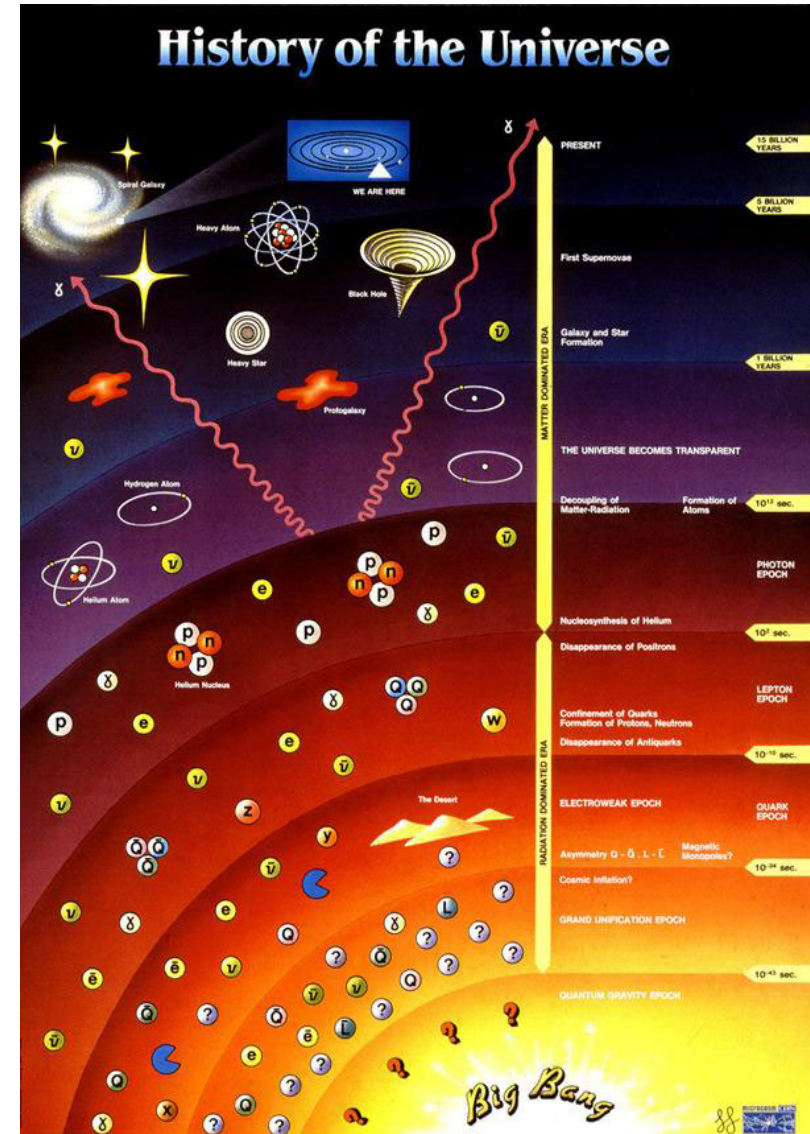
Étude des **constituants élémentaires** de la matière et de leurs **interactions**

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

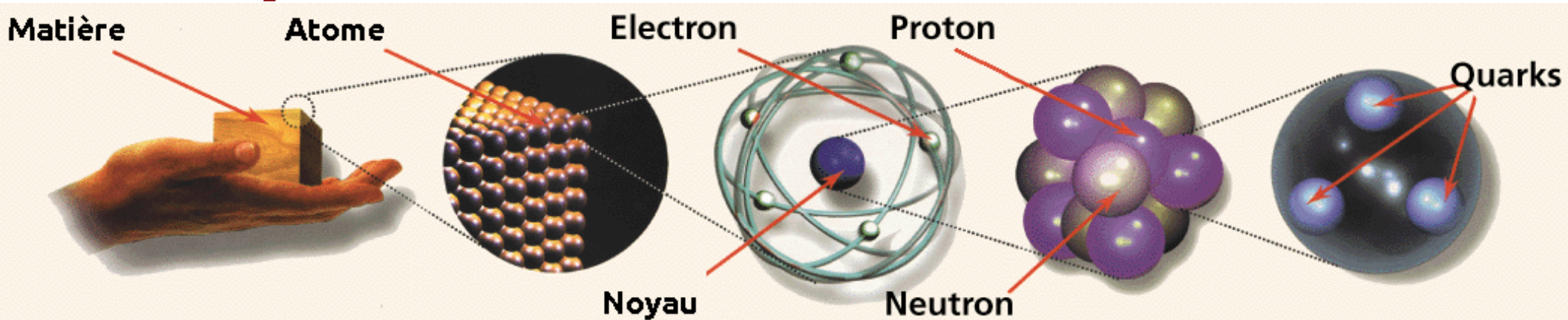
Présentes dans l'univers primordial, dense et chaud

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 ?



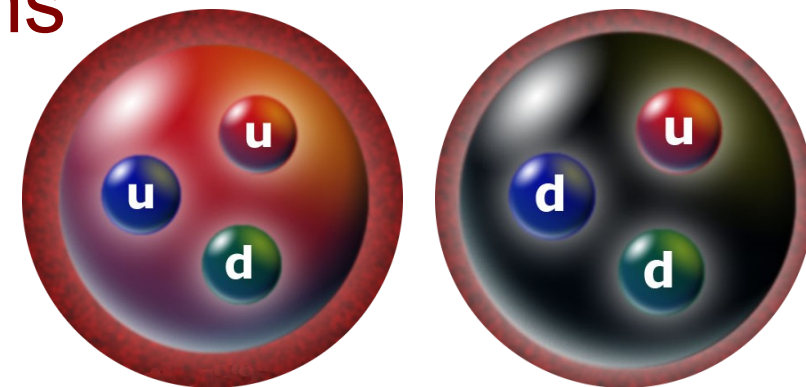
- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**

- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks

- Ils composent les noyaux

- Les électrons forment un nuage autour des noyaux

- Des **neutrinos** sont émis dans les réactions nucléaires au cœur des étoiles



# Le positron

- Équation du mouvement d'un électron

[1928, Dirac]

- ▶ mécanique quantique
- ▶ cas relativiste
- ▶ équation de Dirac avec 2 solutions
  - électron
  - positron

- Observation :

[1932, Anderson]

- enregistré dans une chambre de Wilson, une particule avec les mêmes caractéristiques que l'électron mais une charge électrique opposée

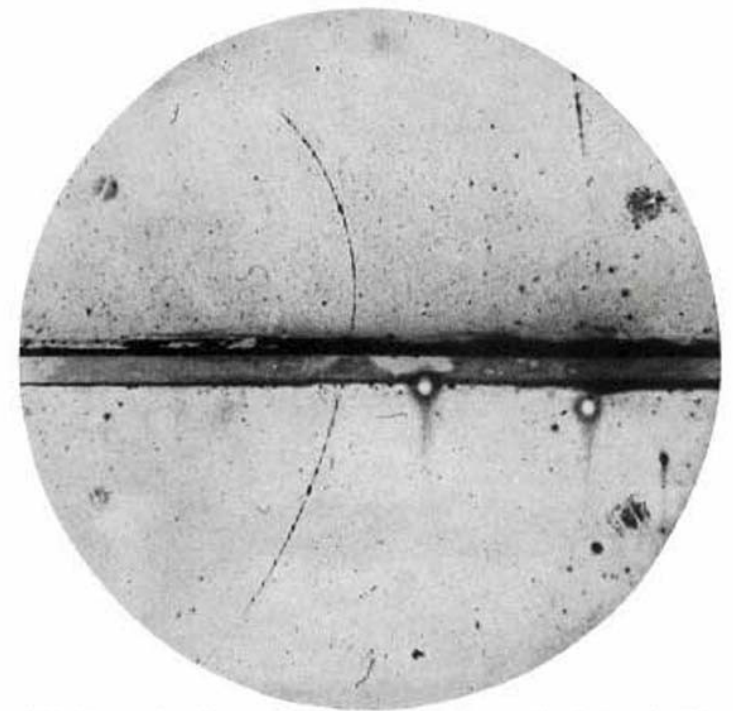
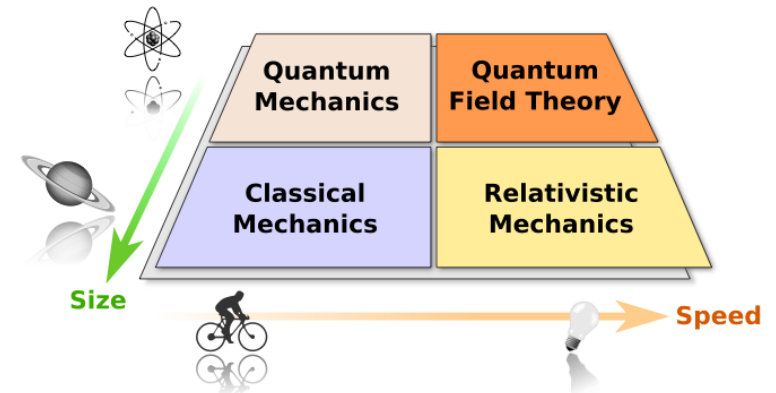
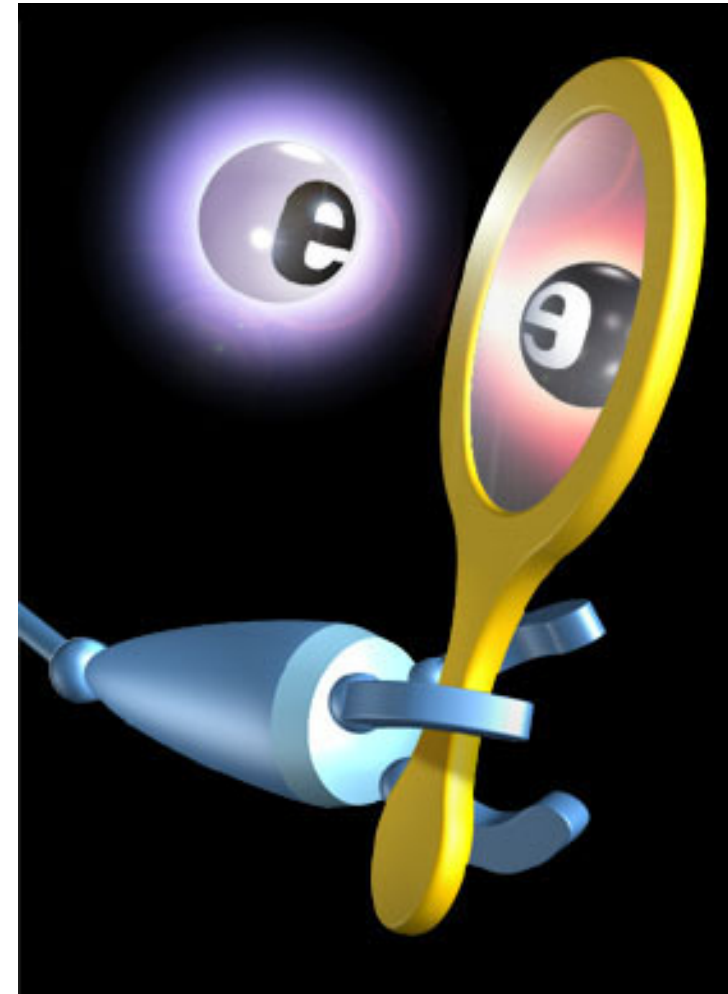


Fig. 1. A 65 million volt positron ( $H_D = 2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_D = 1.5 \times 10^6$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

# L'anti-matière

- La découverte de l'anti-électron marque la naissance de l'anti-matière
  - ▶ positron = anti-électron
- Généralisation : à chaque particule correspond une anti-particule :
  - ▶ de même masse
  - ▶ de même *spin* (moment angulaire interne)
  - ▶ de charge(s) opposée(s)
- L'anti-matière se comporte comme la matière (vue dans un miroir)
  - ▶ mais pas exactement
    - il existe une petite asymétrie
    - sujet d'étude très actif (et casse-tête théorique)

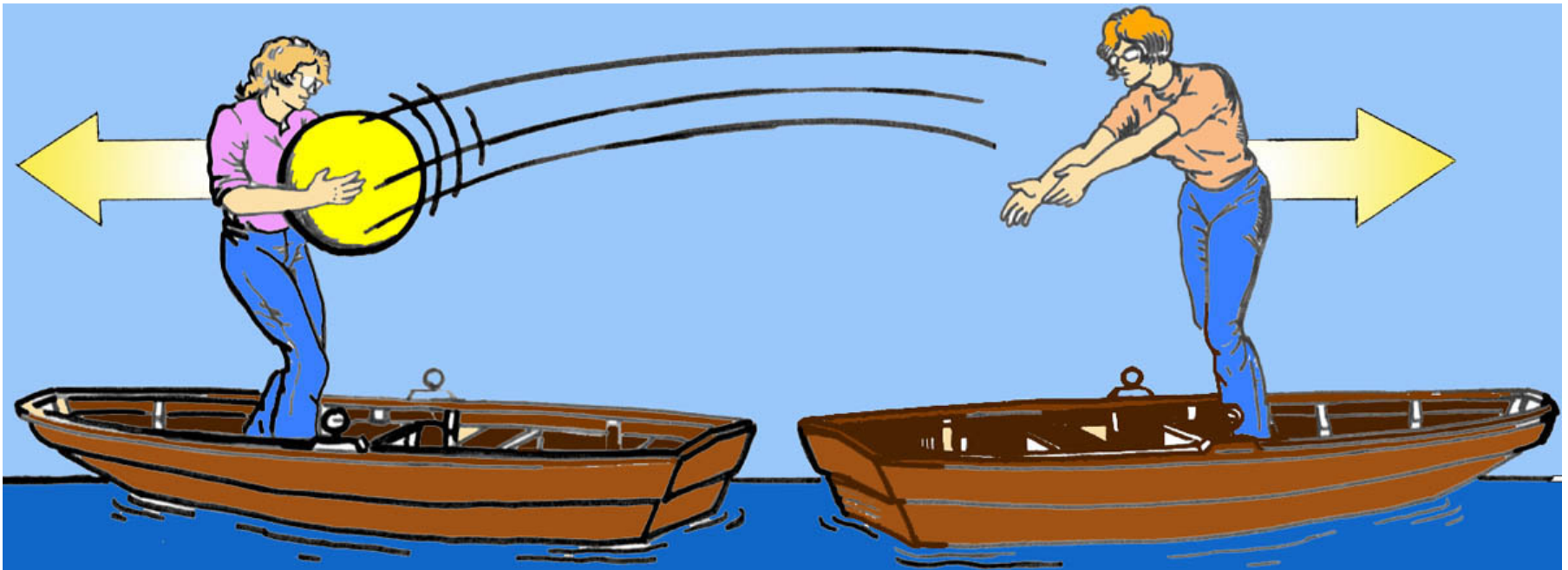


par convention : l'anti-particule de  $x$  est notée :  $\bar{x}$



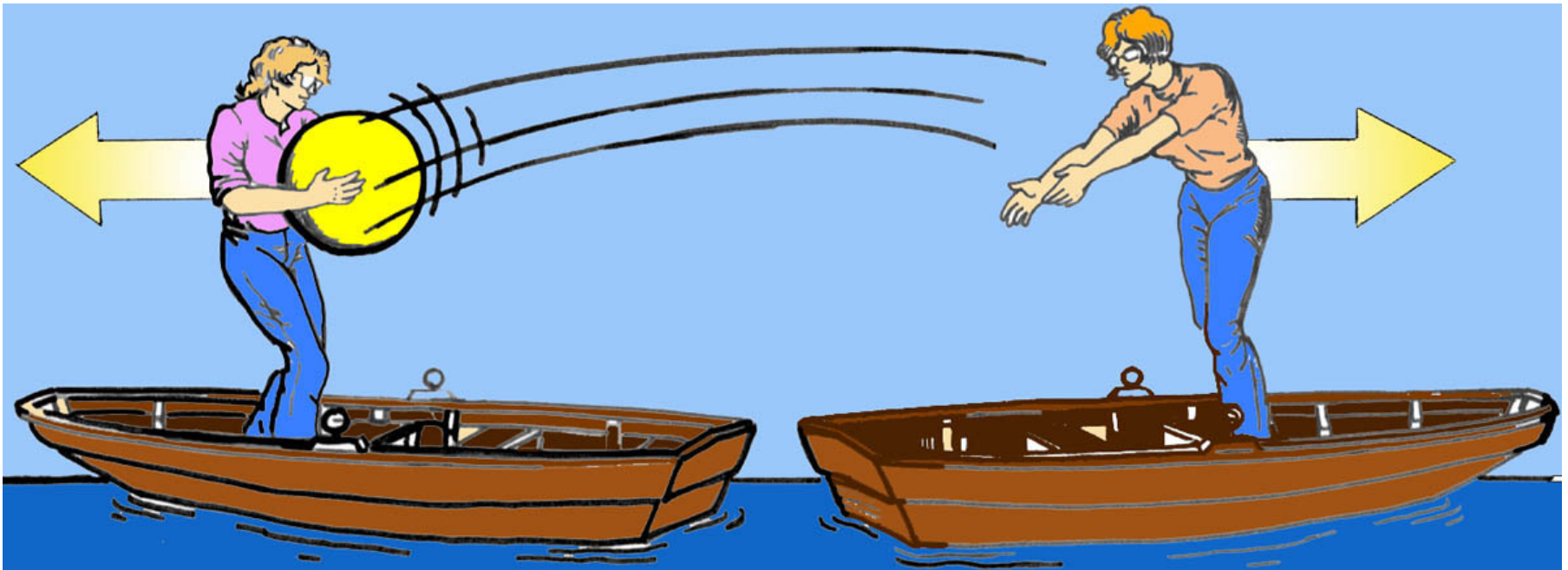
# Interaction fondamentale

Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)

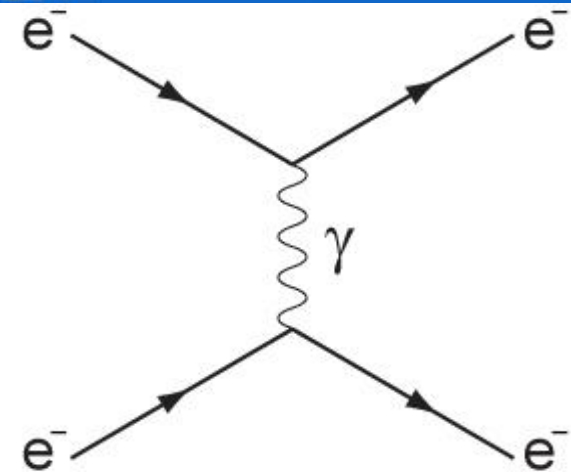


# Interaction fondamentale

Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)

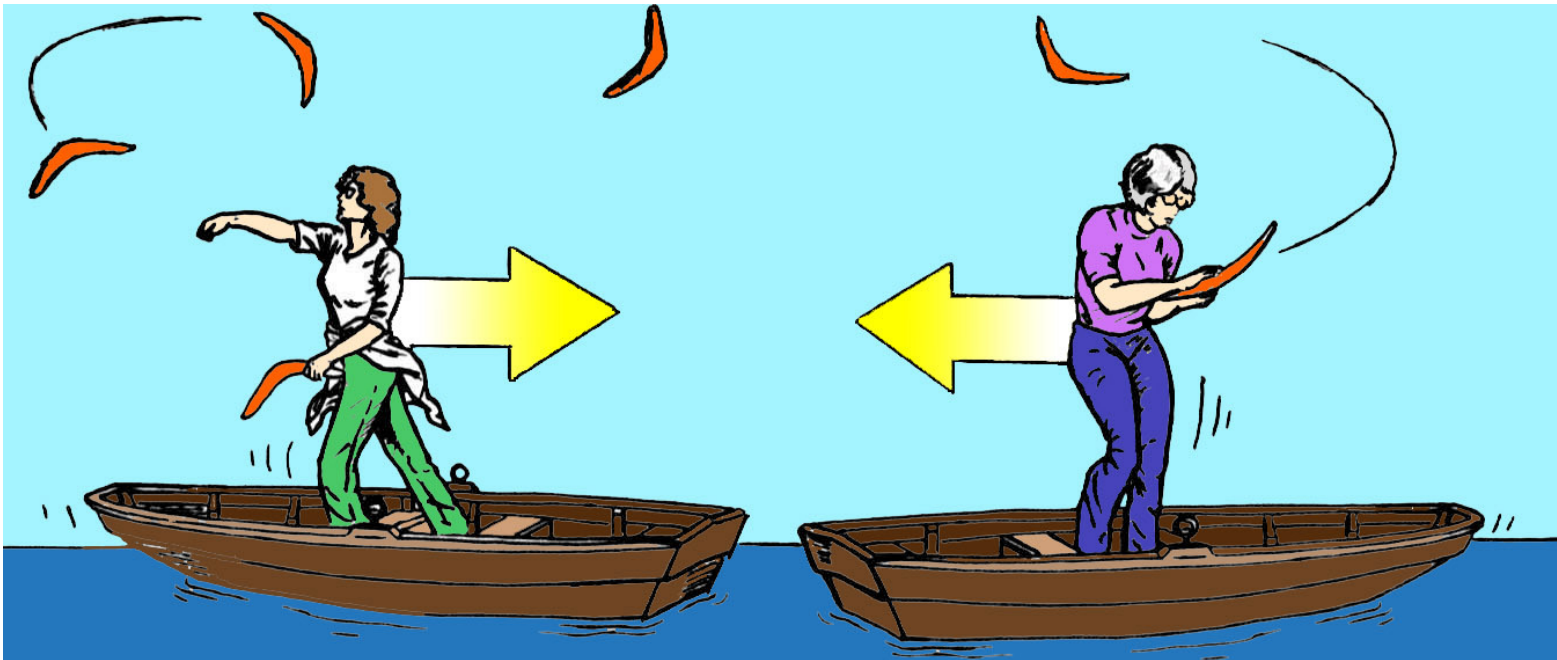


En physique des particules :

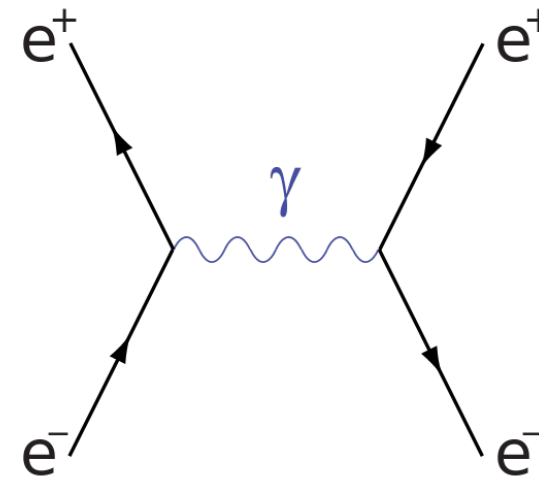


# Interaction fondamentale

Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)

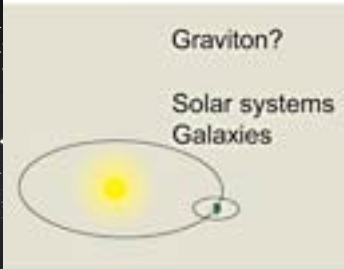


En physique des particules :



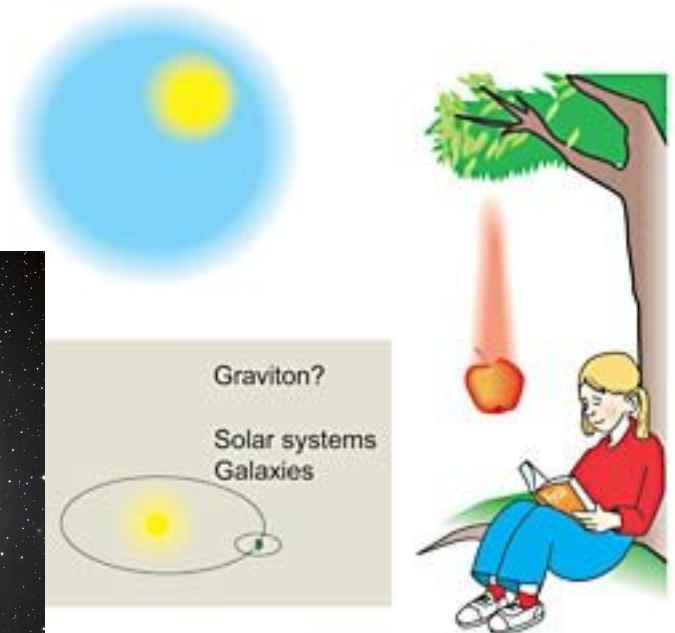
# Les forces

# Les forces

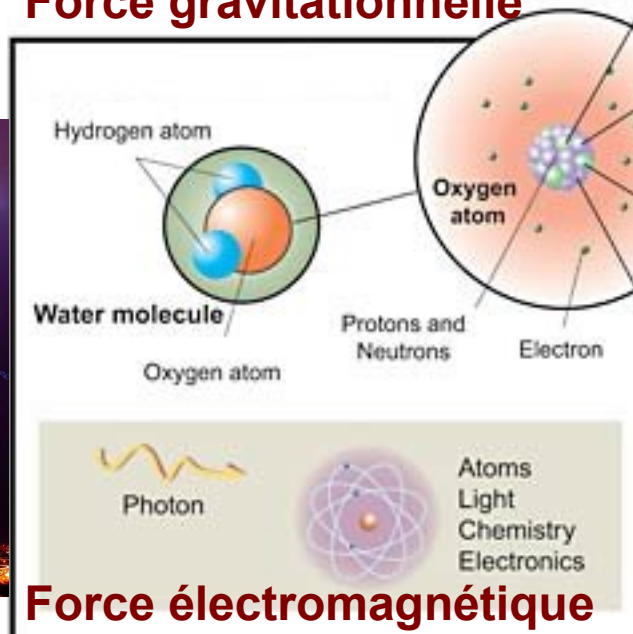


**Force gravitationnelle**

# Les forces

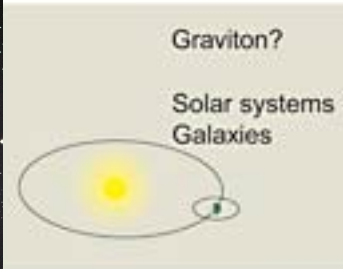
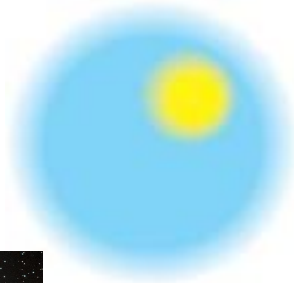
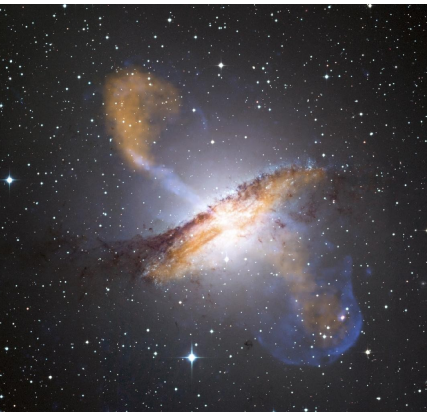


**Force gravitationnelle**

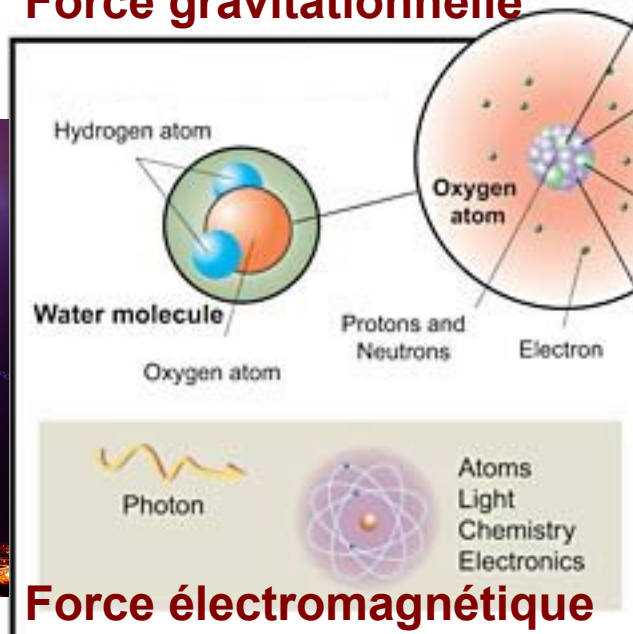
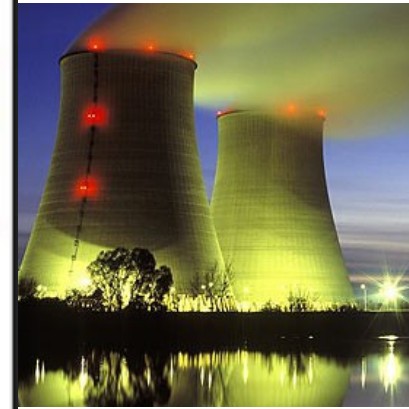
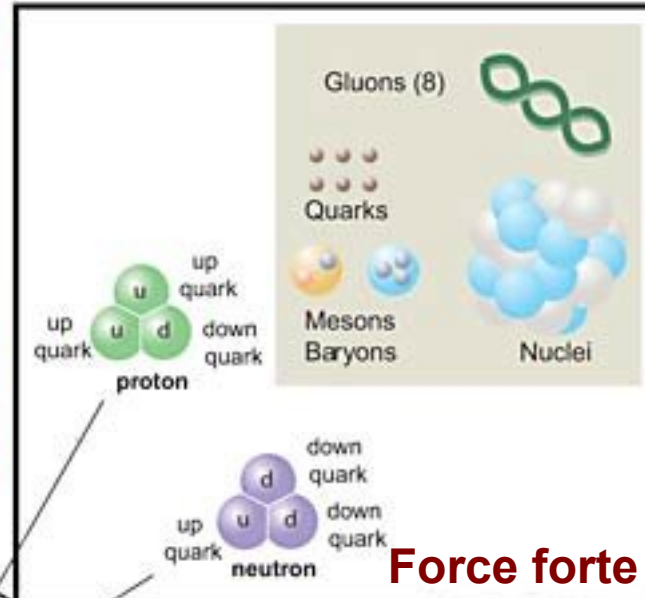


**Force électromagnétique**

# Les forces



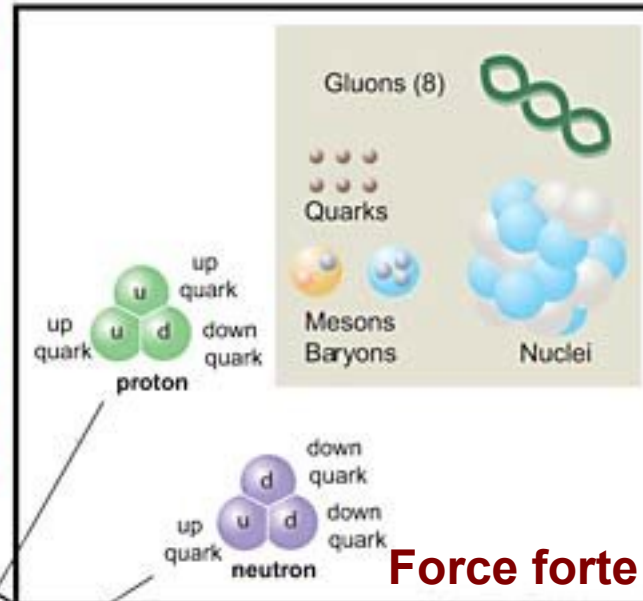
**Force gravitationnelle**



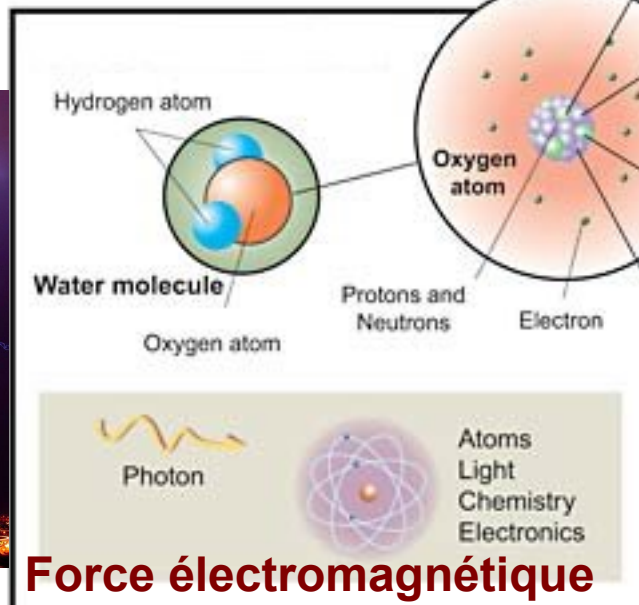
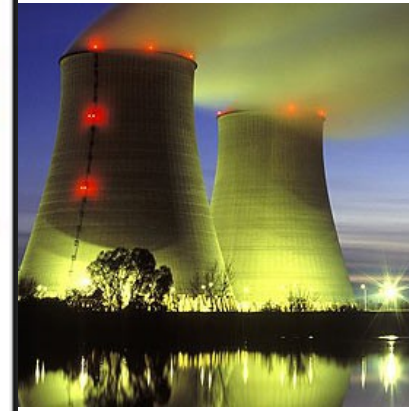
# Les forces



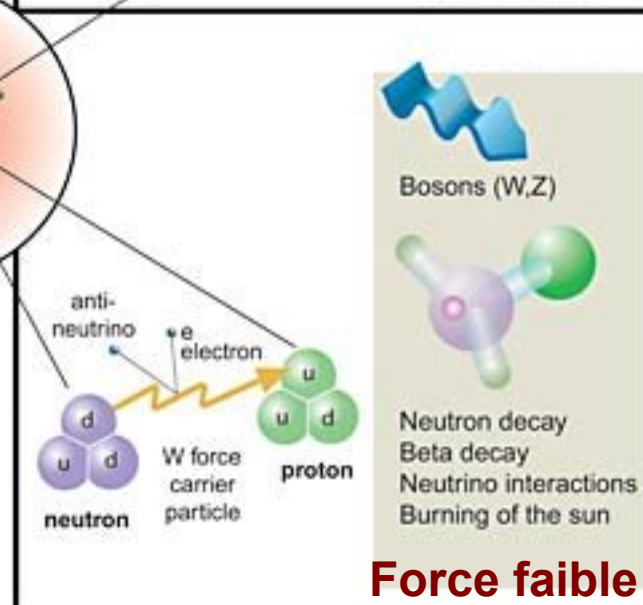
**Force gravitationnelle**



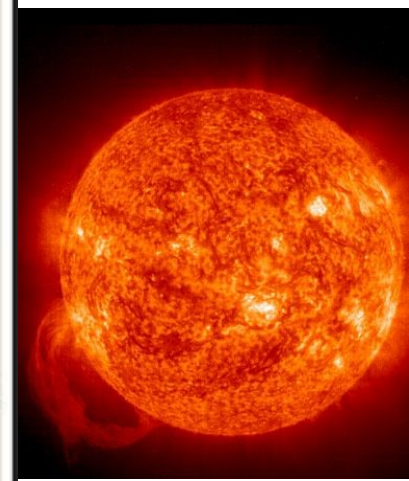
**Force forte**



**Force électromagnétique**



**Force faible**

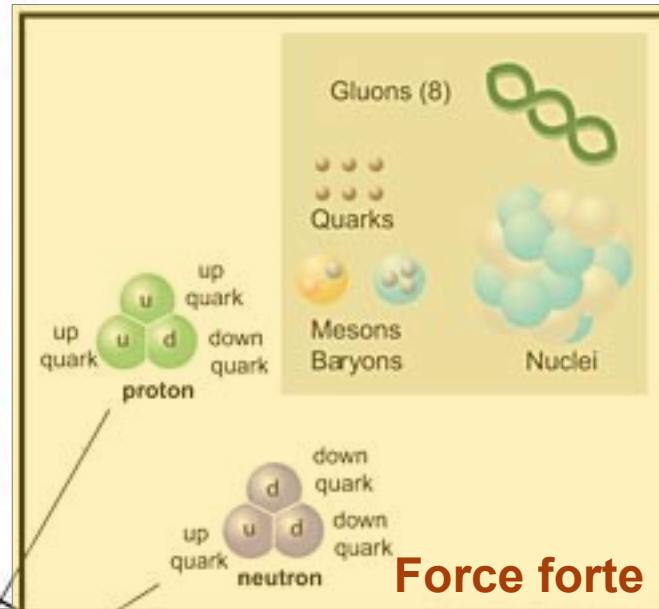




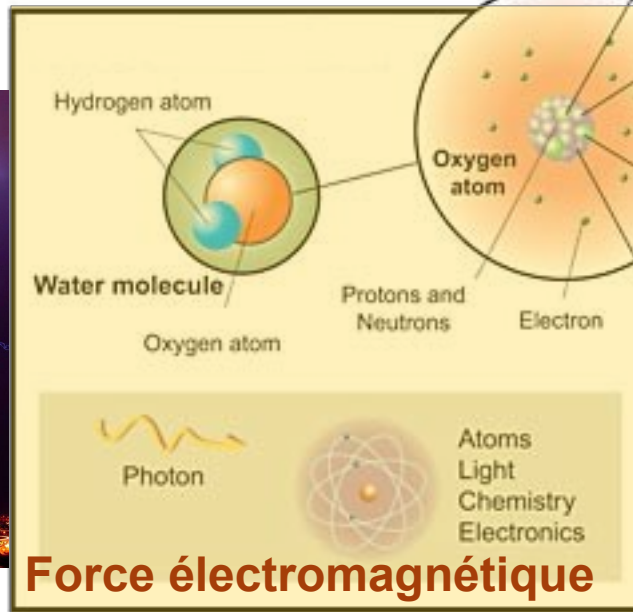
# Les forces



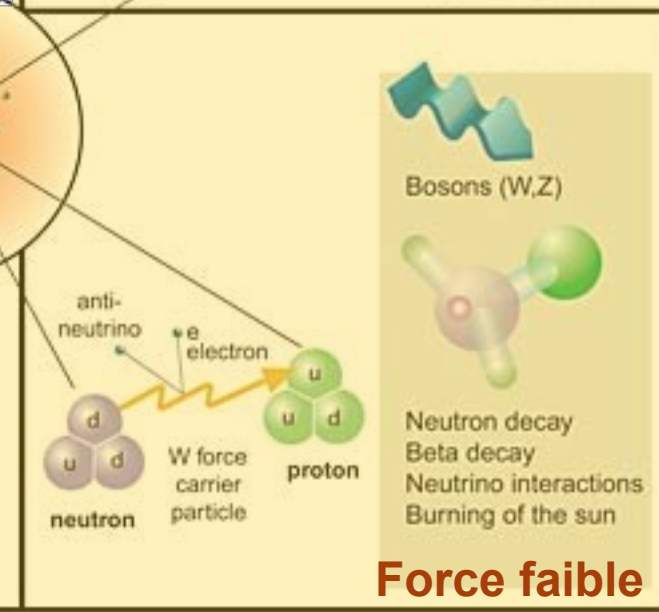
**Force gravitationnelle**



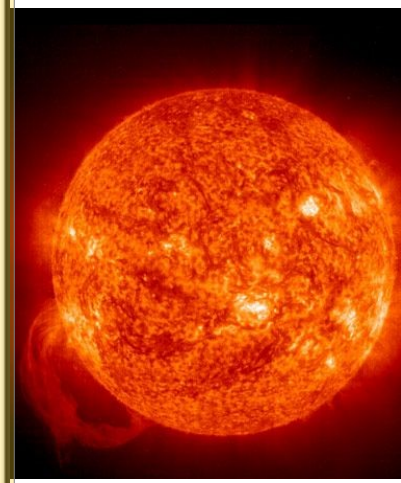
**Force forte**



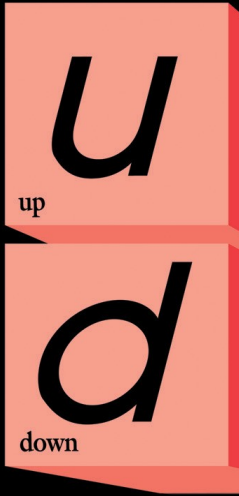
**Force électromagnétique**



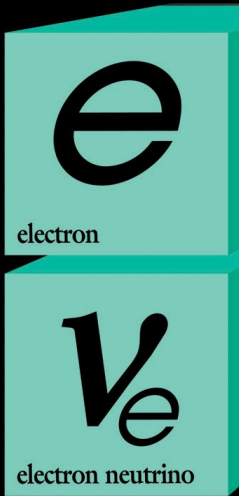
**Force faible**



# Quarks



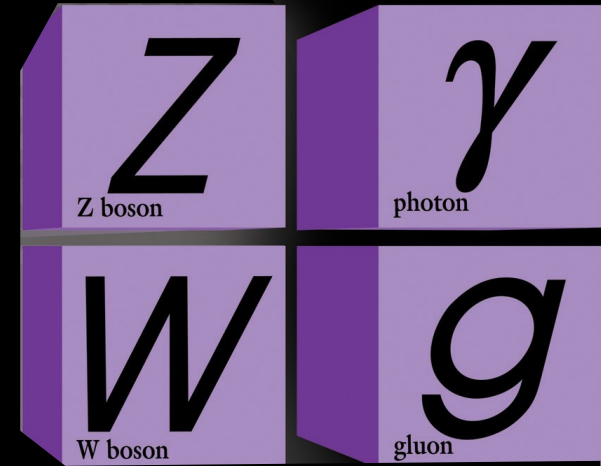
+ anti-matière



# Leptons

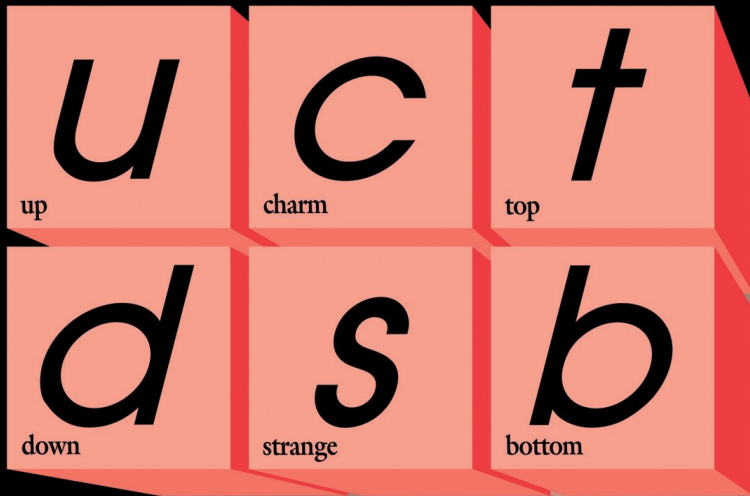
# Le modèle standard

# Forces



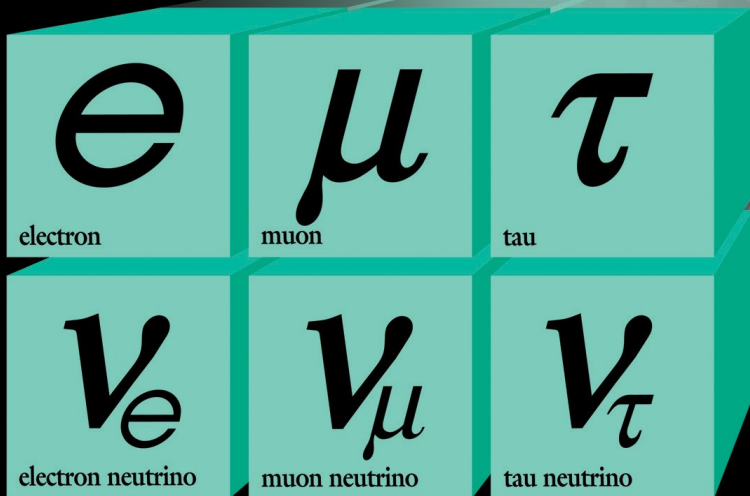
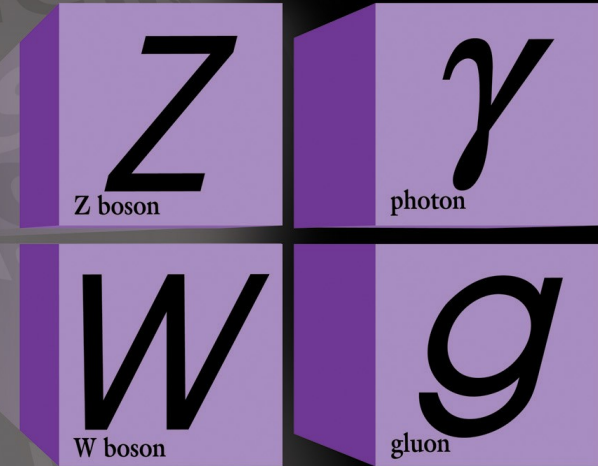
# Quarks

# Le modèle standard



+ anti-matière

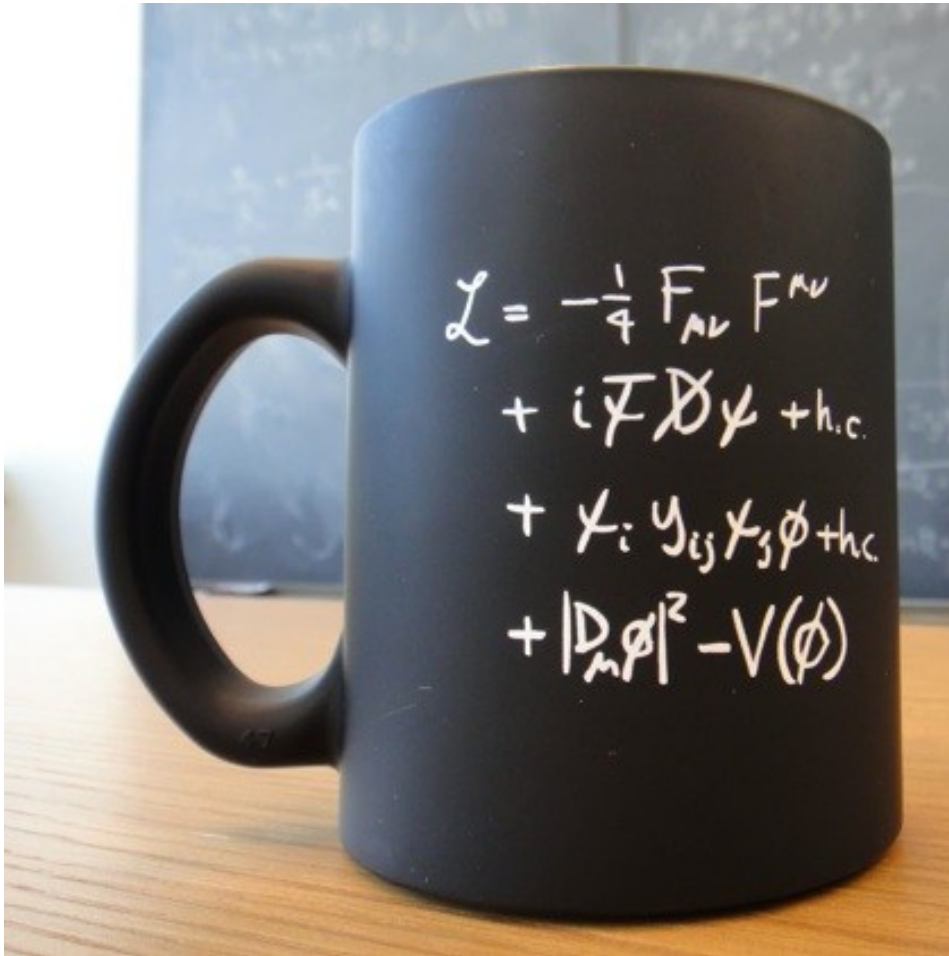
# Forces



# Leptons

# Le modèle standard

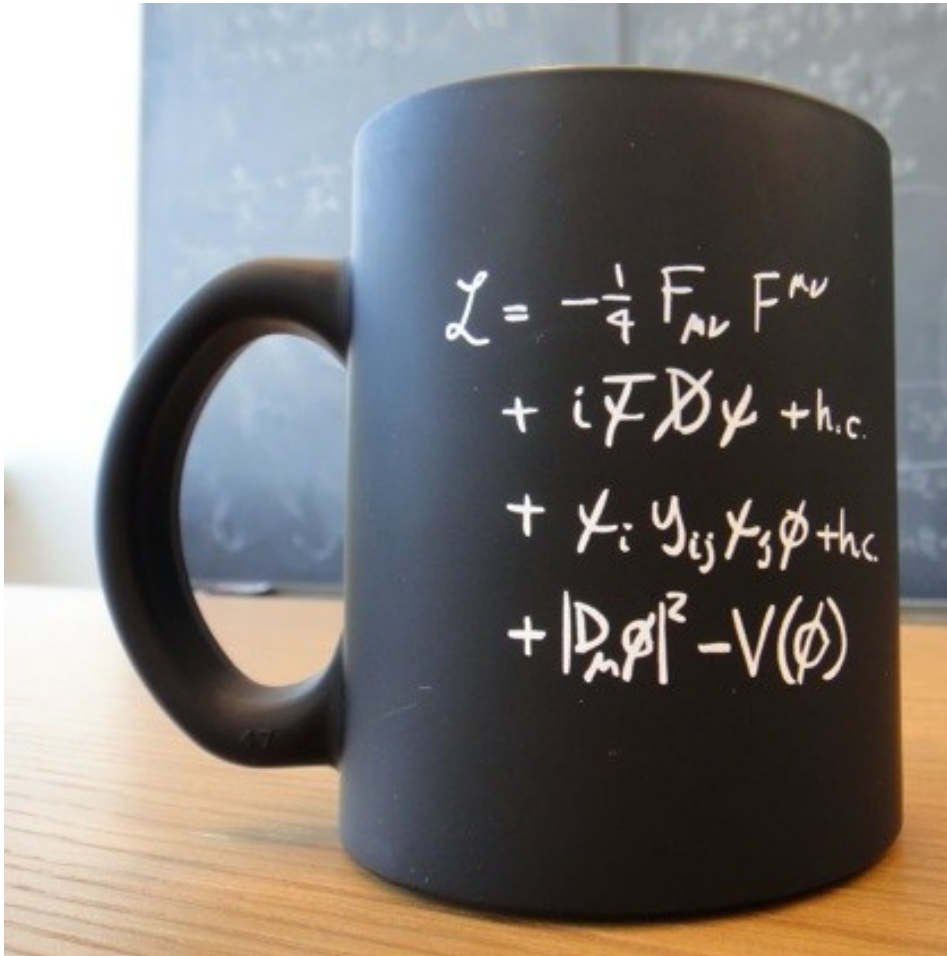
- Version synthétique



# Le modèle standard

- Version synthétique

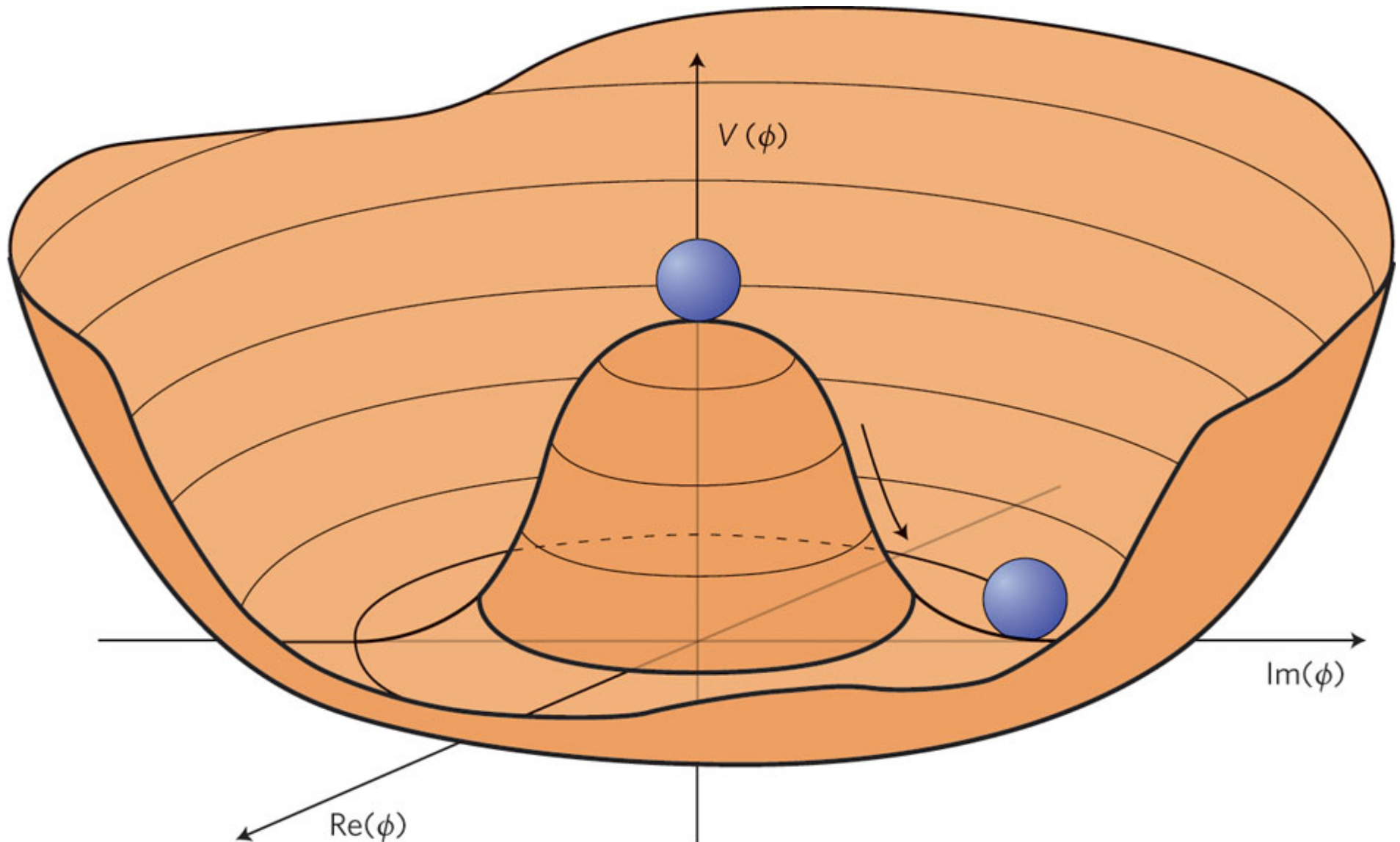
- Version développée...



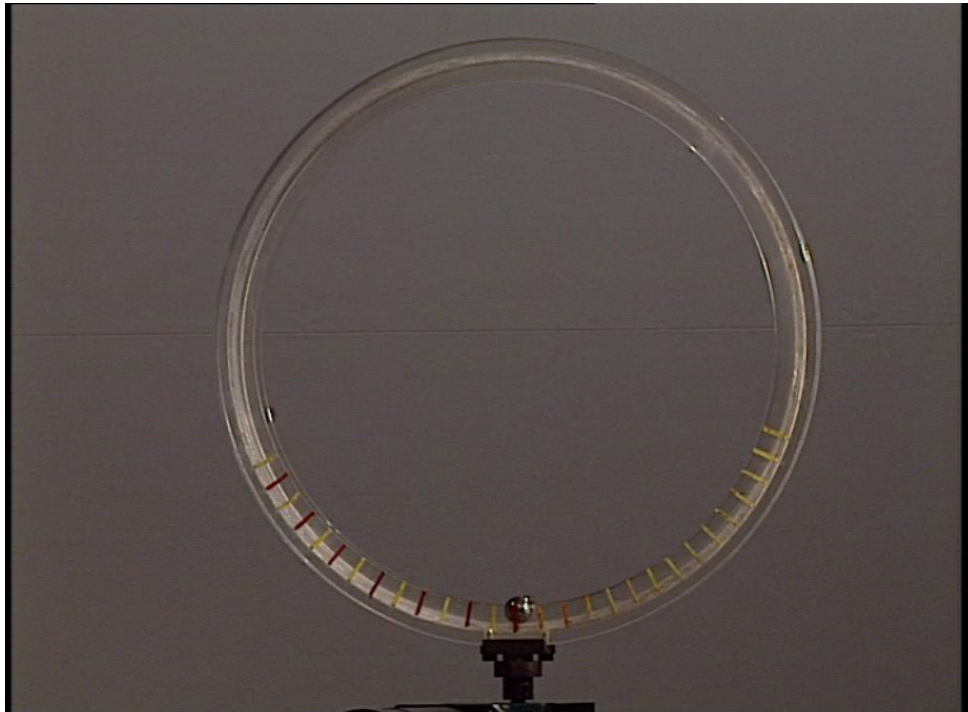
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \\
 & \frac{1}{2} \partial_\mu \mathbf{H} \partial_\mu \mathbf{H} - \frac{1}{2} m_h^2 \mathbf{H}^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} \mathbf{H} + \frac{1}{2} (\mathbf{H}^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & i g c_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\
 & Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - i g s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\
 & A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \\
 & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
 & Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g \alpha [\mathbf{H}^3 + \\
 & \mathbf{H} \phi^0 \phi^0 + 2\mathbf{H} \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [\mathbf{H}^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + \\
 & 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4\mathbf{H}^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 \mathbf{H}^2] - g M W_\mu^+ W_\mu^- \mathbf{H} - \\
 & \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \mathbf{H} - \frac{1}{2} i g [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2} g [W_\mu^+ (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \mathbf{H}) - W_\mu^- (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \mathbf{H})] + \\
 & \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu \mathbf{H}) - i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} i g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} i g^2 s_w A_\mu \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + i g s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{i g}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda k} d_k^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} [\mathbf{H} (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \gamma^5) d_k^\lambda) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_k^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 + \gamma^5) u_k^\lambda) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_k^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{i g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + i g c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ \mathbf{H} + \bar{X}^- X^- \mathbf{H} + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 \mathbf{H}] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & i g M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} i g M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

# Brisure spontanée de la symétrie électrofaible

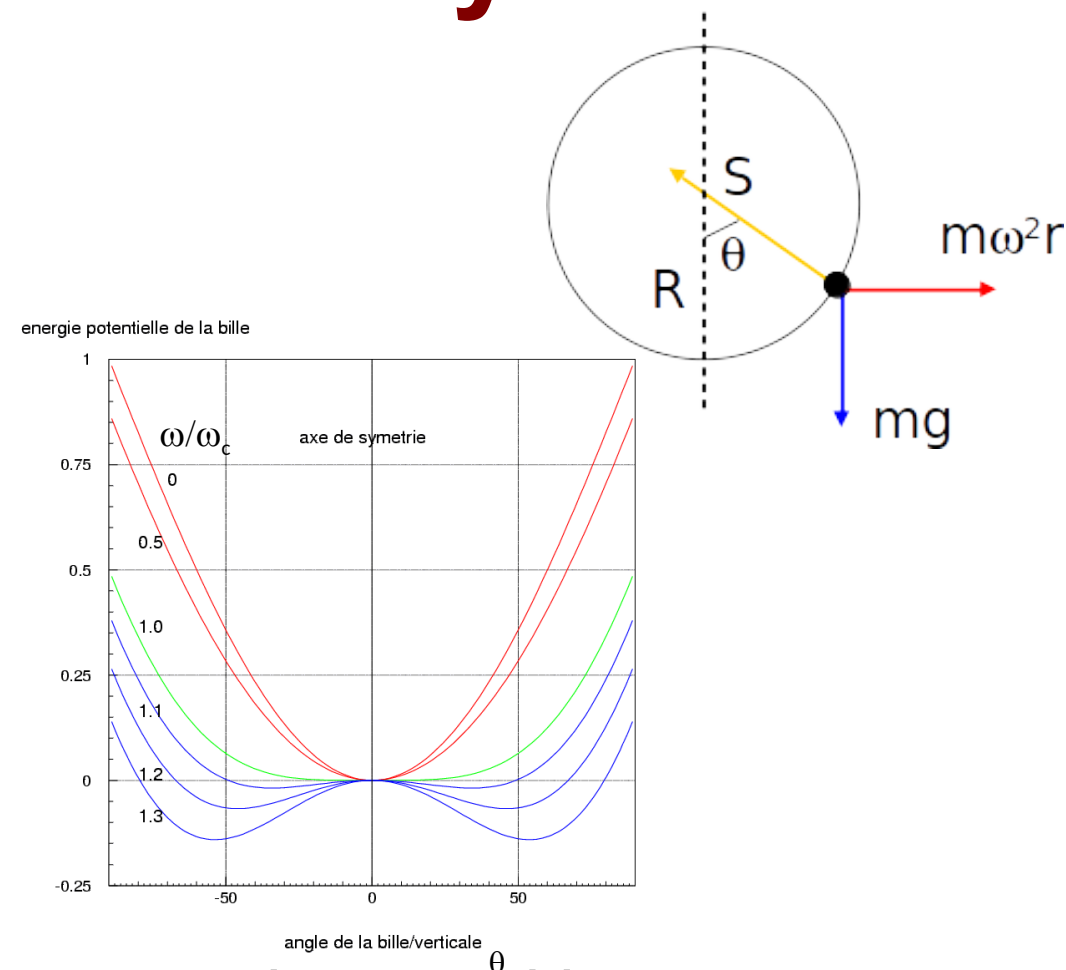
Le potentiel de Higgs : le « chapeau mexicain »



# Brisure spontanée de symétrie



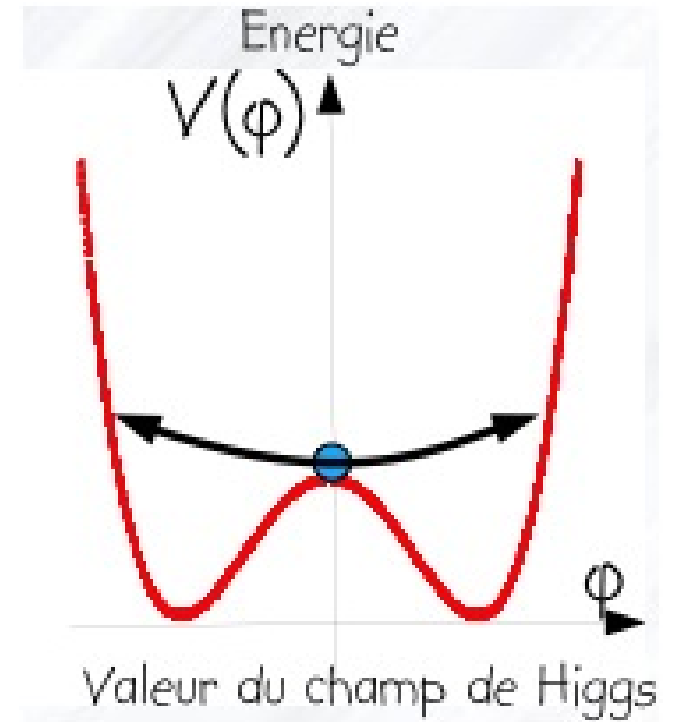
© M. Davier



- vitesse angulaire de rotation  $\omega \Rightarrow$  vitesse critique  $\omega_c$ 
  - ▶ 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

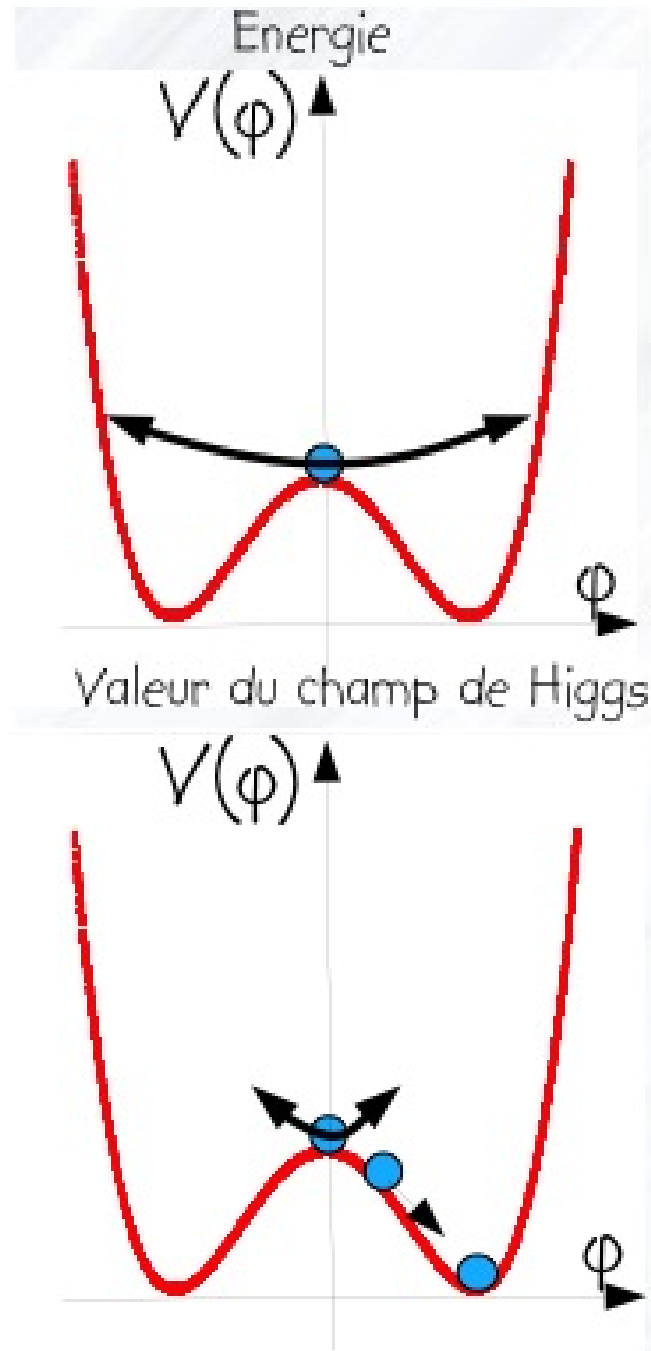
- A haute température, juste après le Big Bang :
  - ▶ champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - ▶ les particules restent sans masse



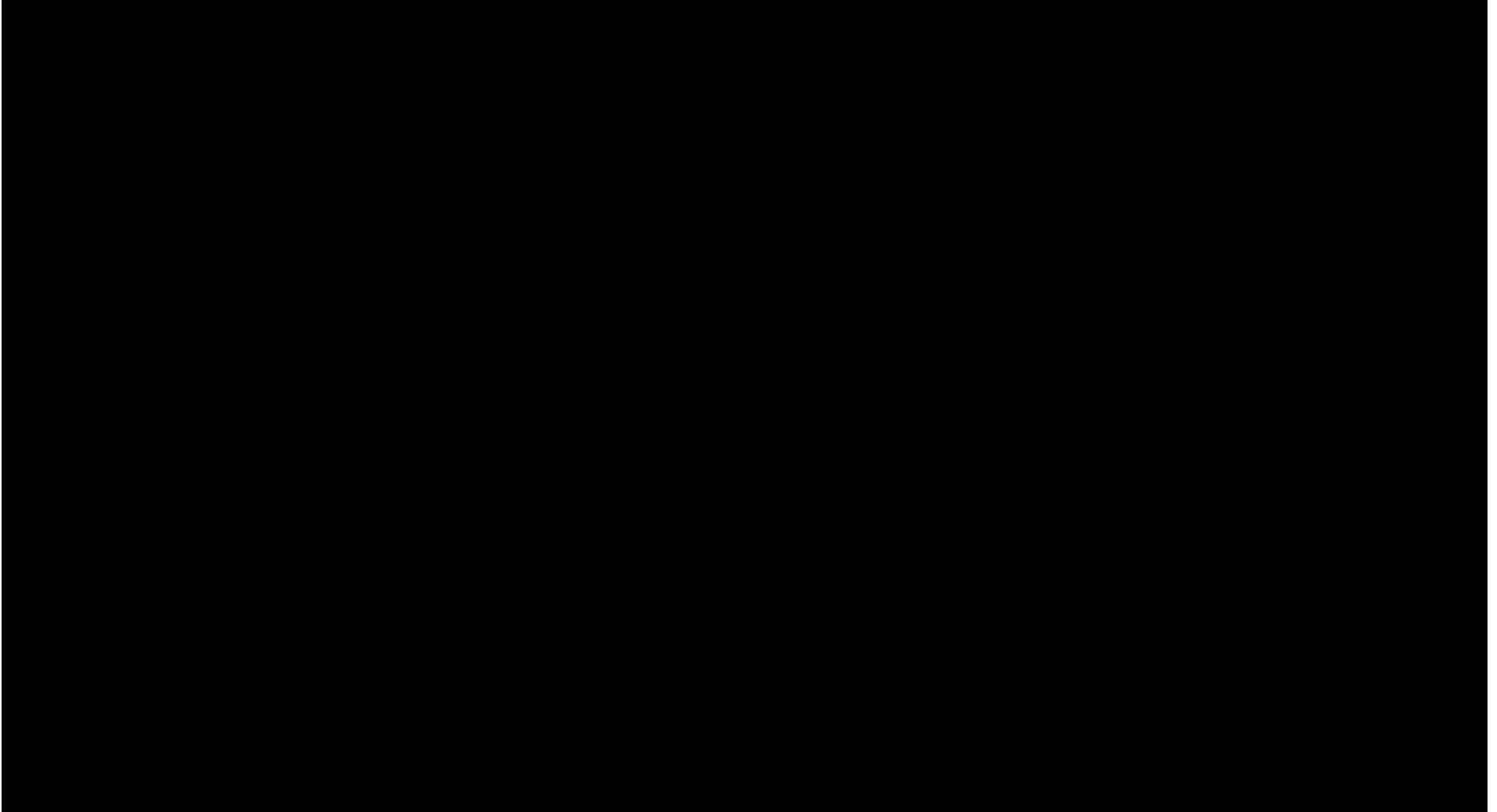


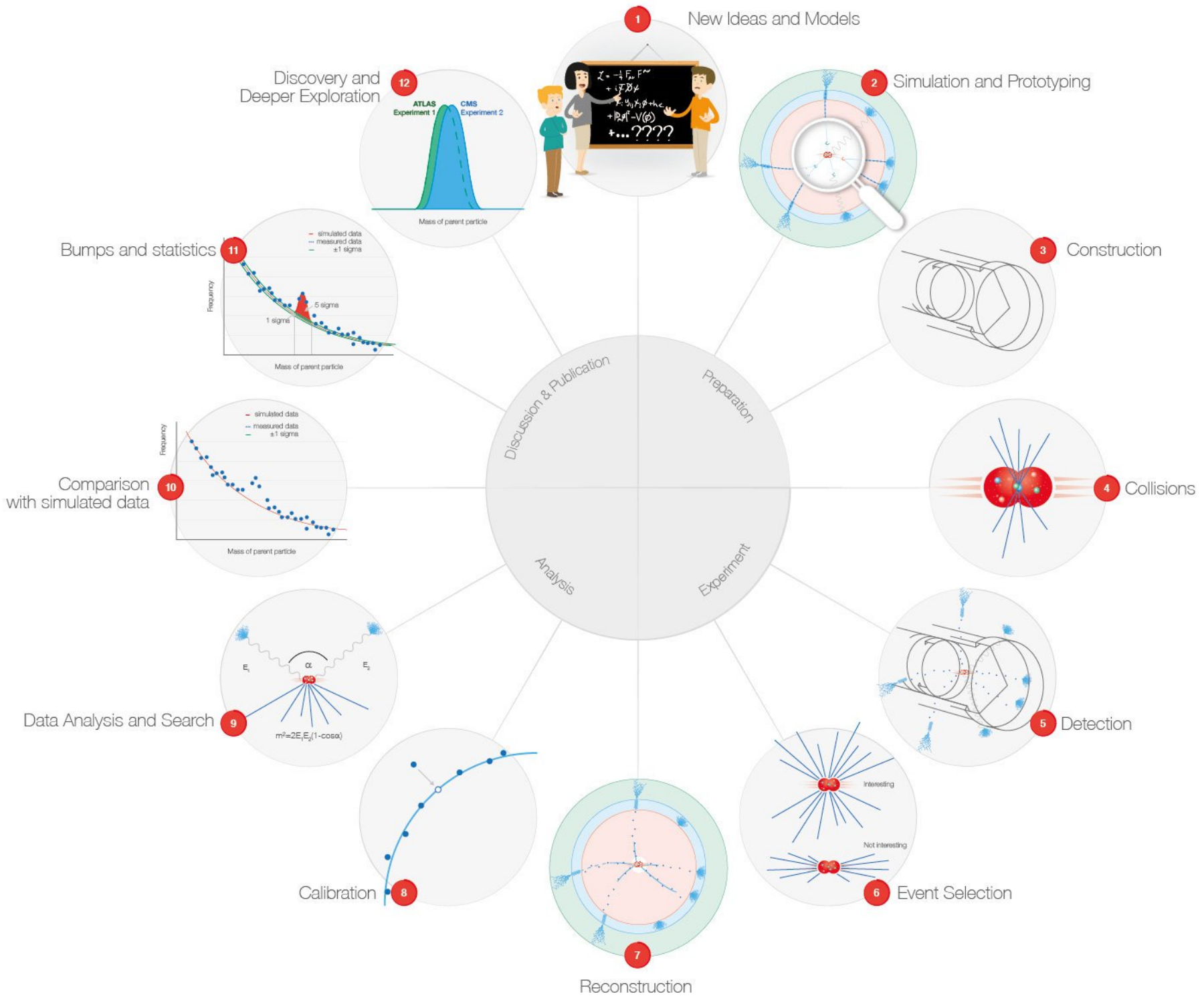
# Brisure de la symétrie électrofaible

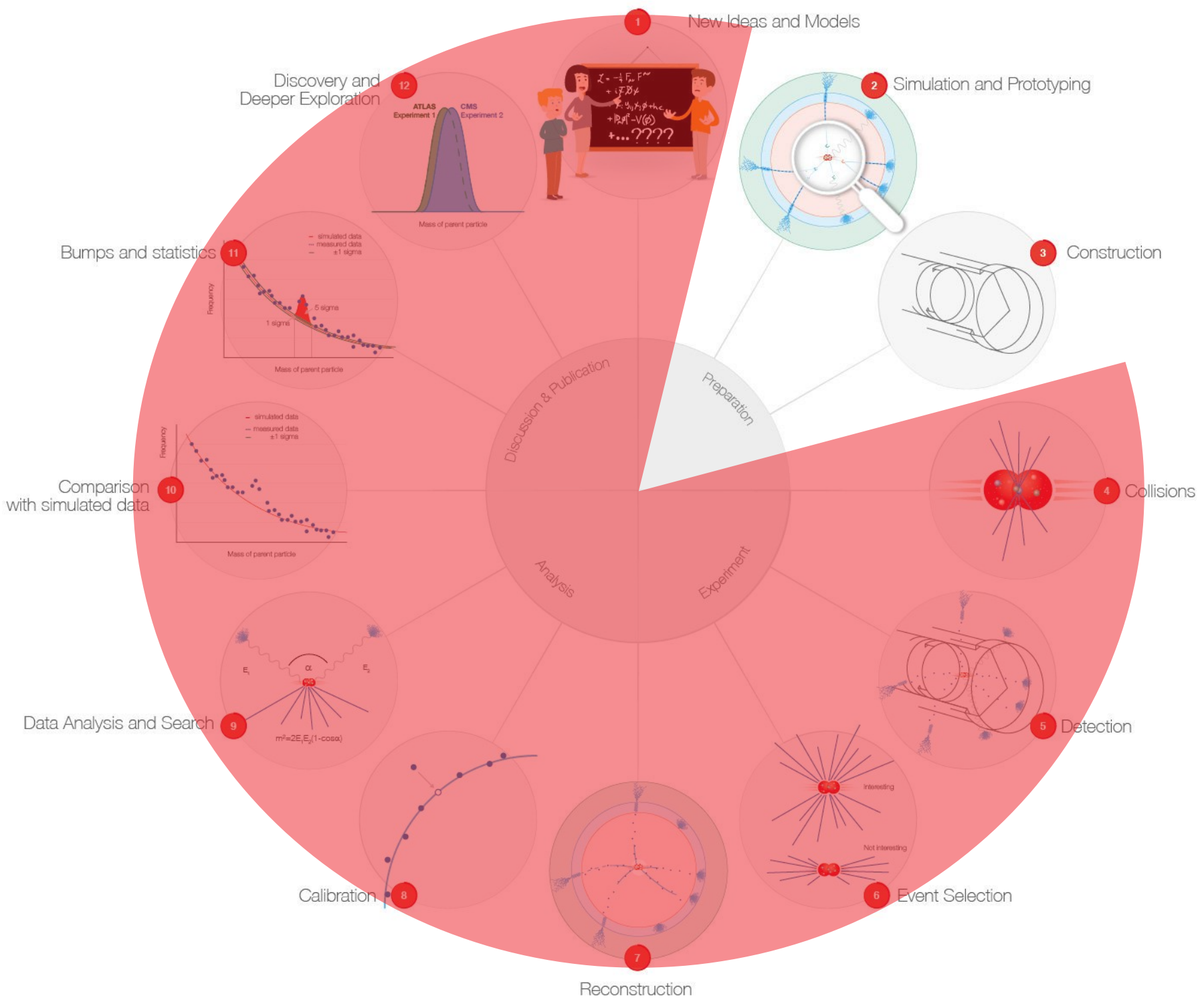
- A haute température, juste après le Big Bang :
  - ▶ champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - ▶ les particules restent sans masse
- Réduction de la température ( $10^{-12}$  s après le Big Bang) :
  - ▶ brisure de symétrie
  - ▶ champ non nul
  - ▶ les particules élémentaires acquièrent une masse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



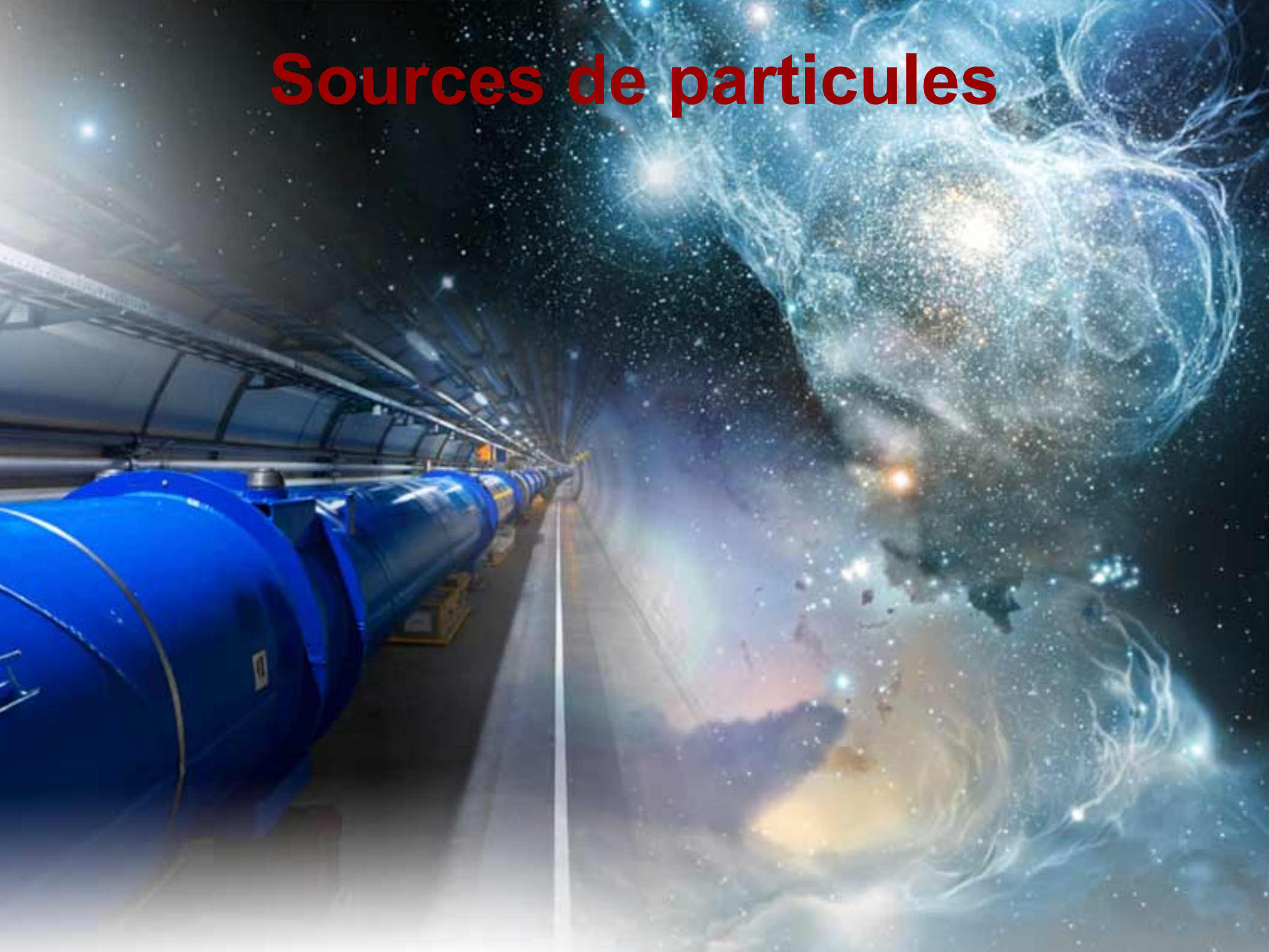
# Interactions avec le boson de Higgs







# Sources de particules



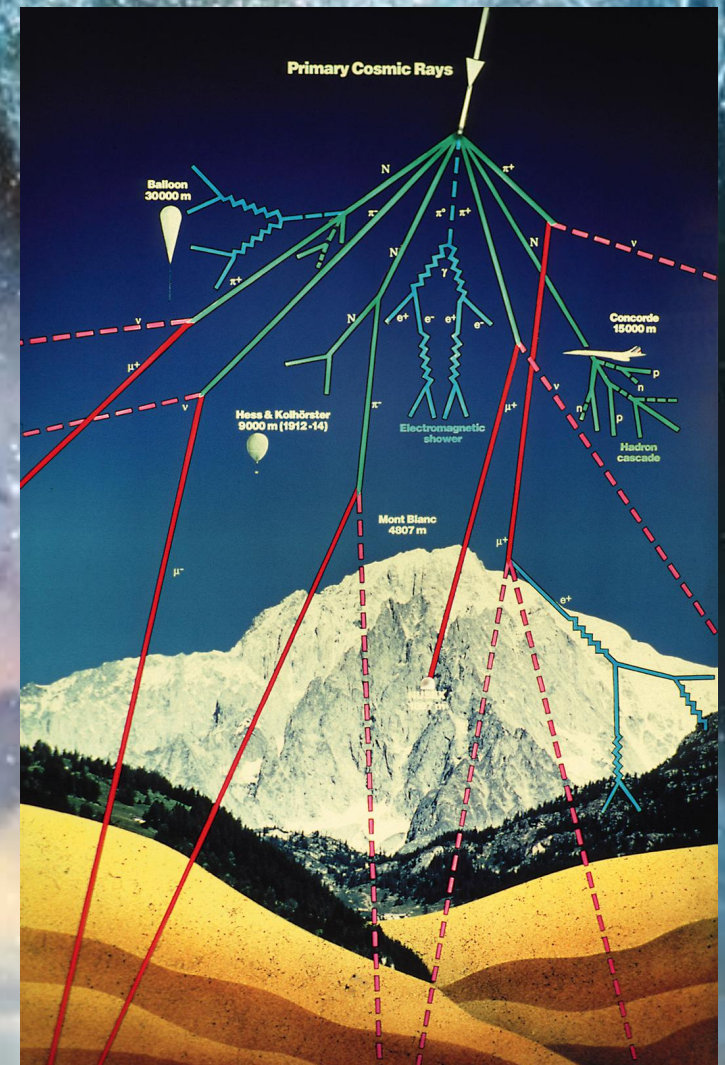
# Sources de particules

**L'Univers et les  
rayons cosmiques**  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)



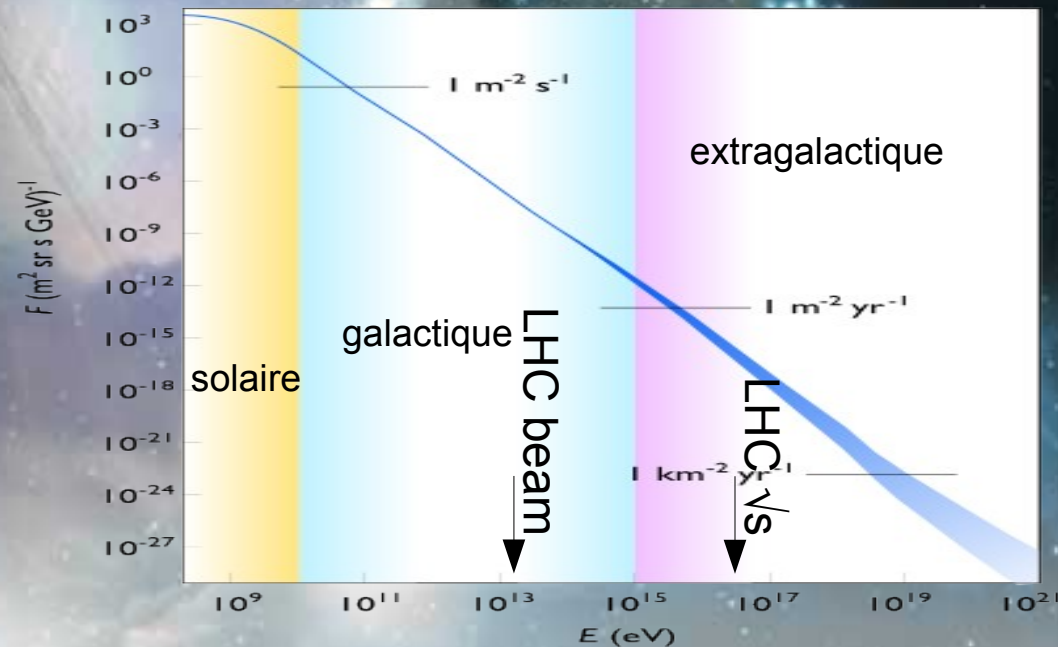
# Sources de particules

## L'Univers et les rayons cosmiques



# Sources de particules

L'Univers et les  
rayons cosmiques  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)





# Sources de particules

**L'Univers et les  
rayons cosmiques**  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)

**Les accélérateurs  
de particules**  
(protons, photons,  
électrons, muons,  
pions, kaons, etc)



# 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)

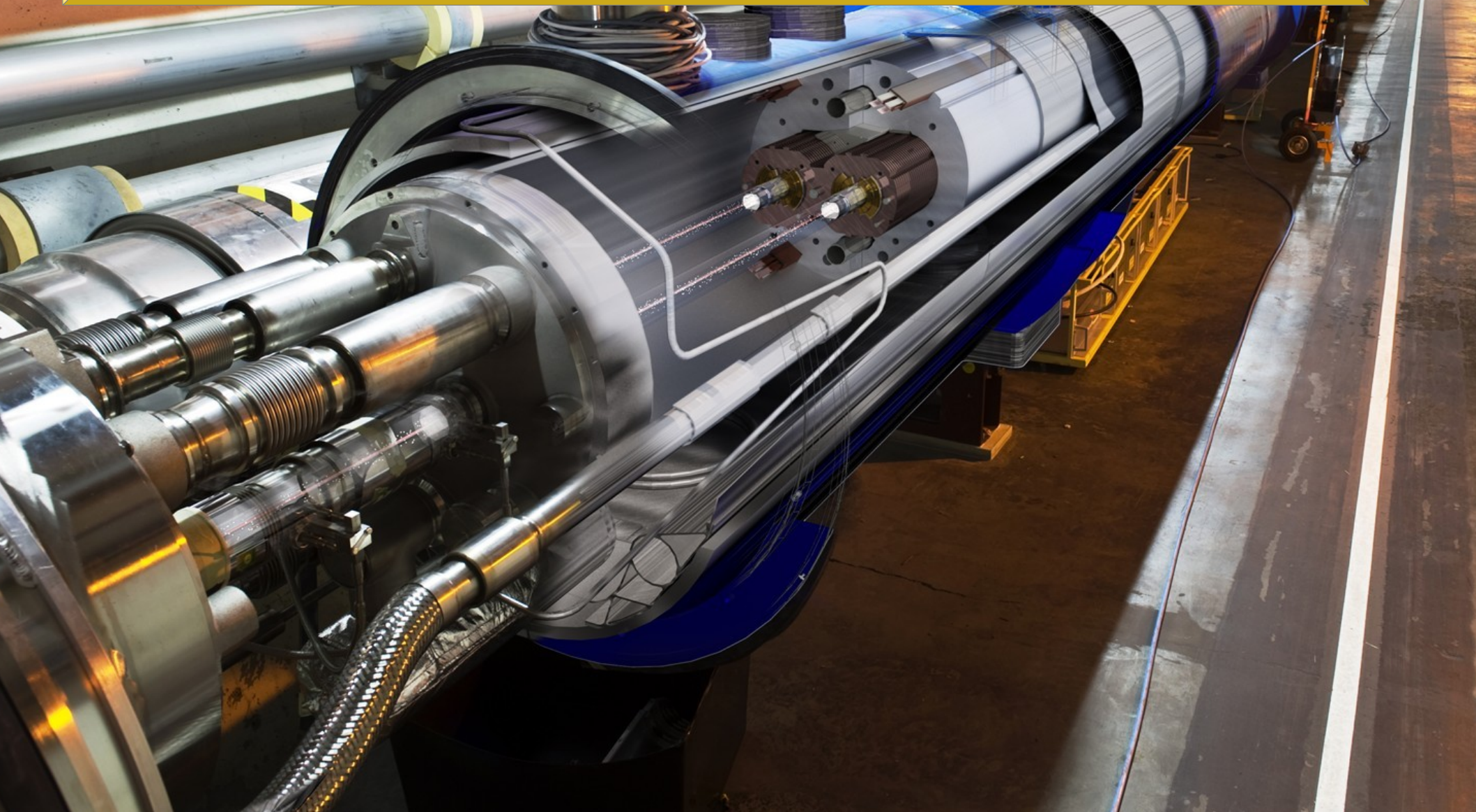


# Le LHC : la machine à superlatifs



# 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 !

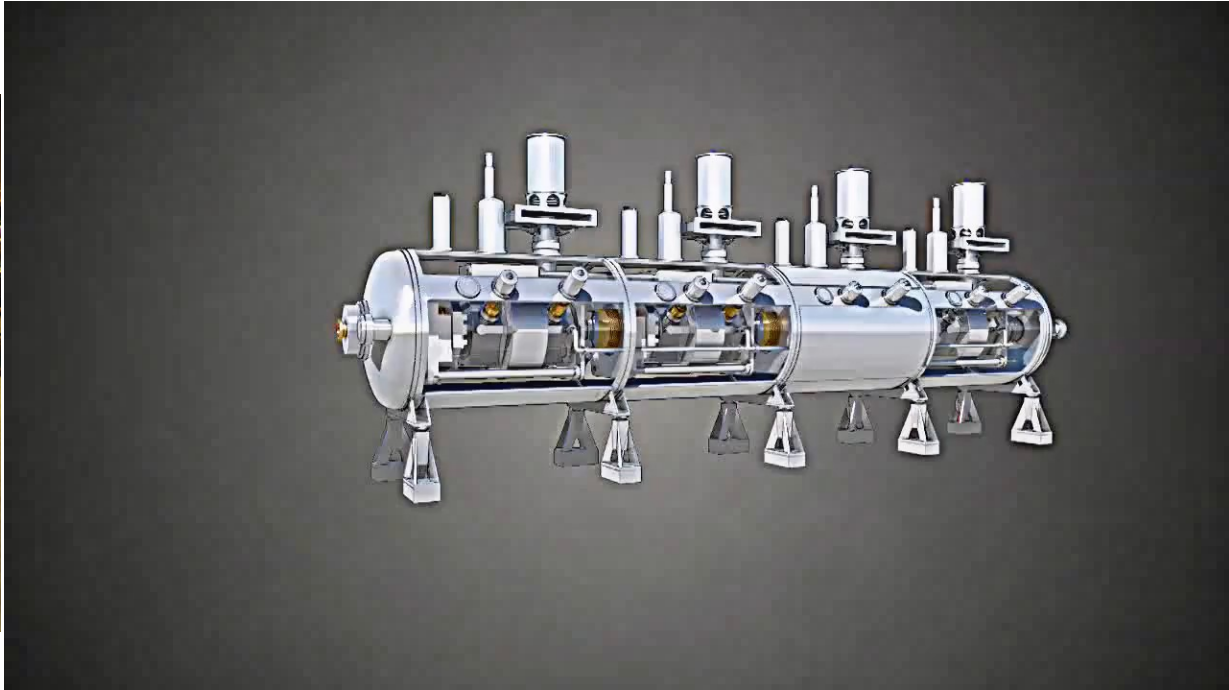
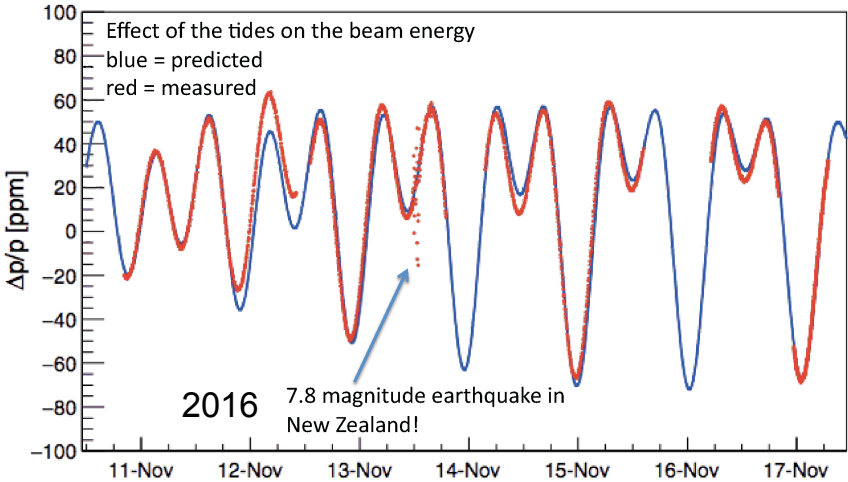
► Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.

# Le LHC : la machine à superlatifs



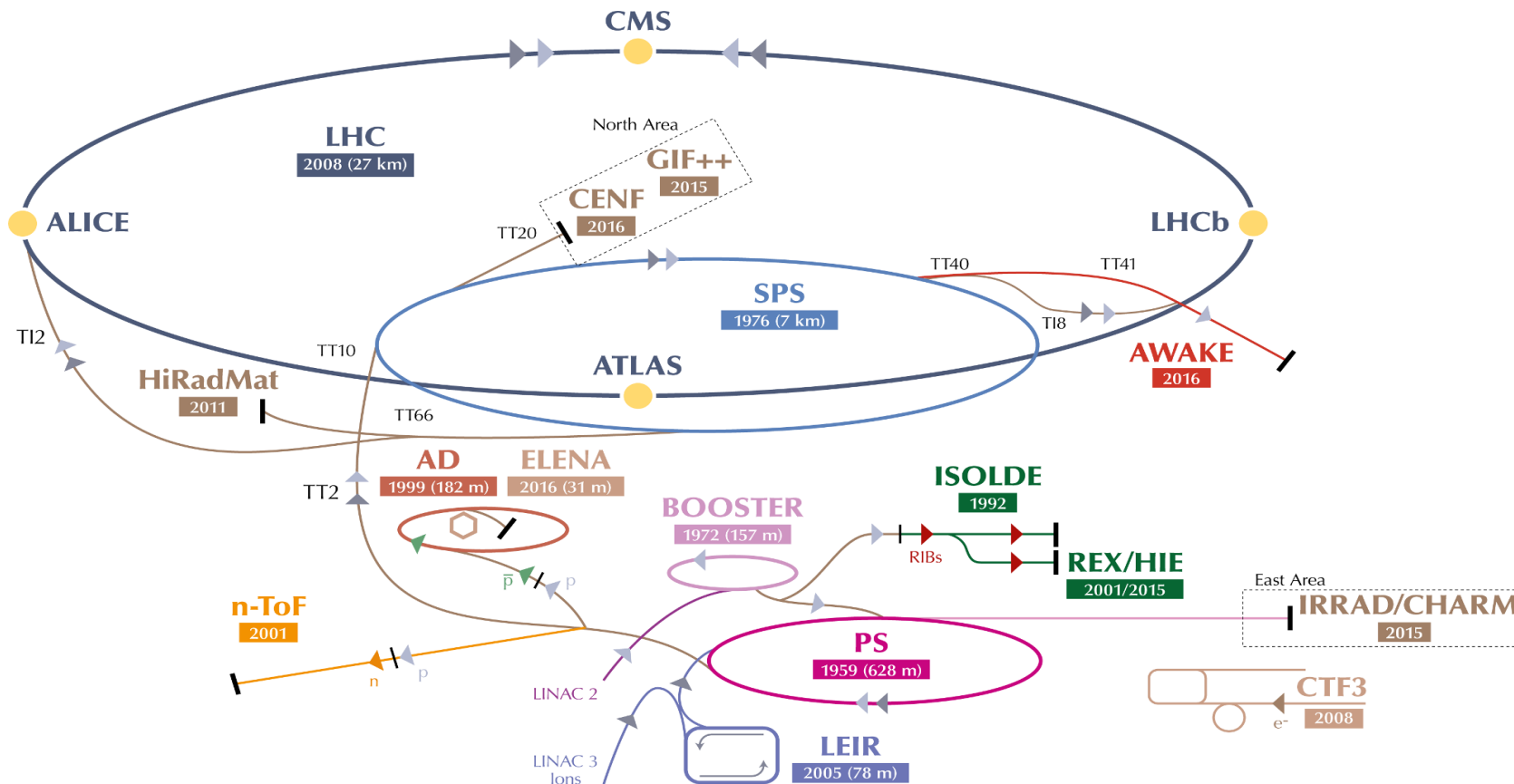
Consommation électrique :  
Tous les foyers du canton de Genève

# Aimants et cavités





# Le CERN : les accélérateurs



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

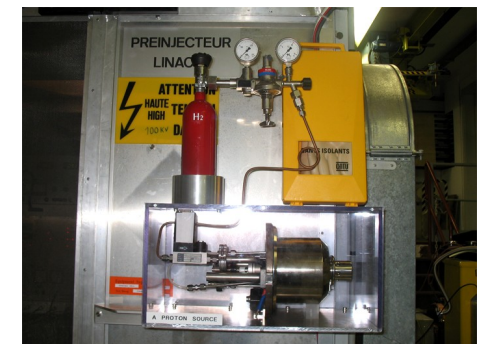
LHC Large Hadron Collider    SPS Super Proton Synchrotron    PS Proton Synchrotron    AD Antiproton Decelerator    CTF3 Clic Test Facility

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
35 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
	Juin 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
	Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
	2029-2041	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 pays
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

35 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
Juin 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
2029-2041	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
35 ans d'exploitation	Septembre 2008	Mise en service
	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
	Juin 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
	Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
	2029-2041	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



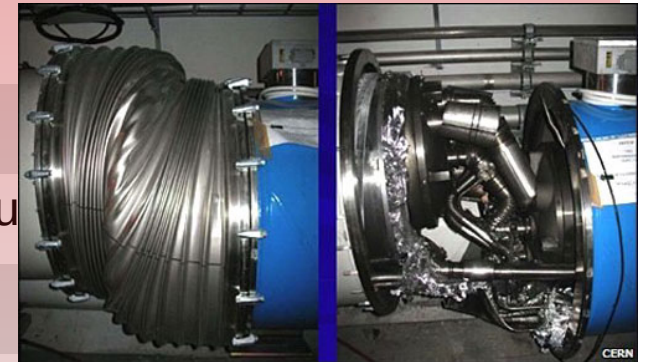
# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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

35 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
Juin 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
2029-2041	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

35 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions
Fin 2012	Fin des collisions
Printemps 2015	Redémarrage à
Fin 2018	Fin du Run 2
Juin 2022	Début du Run 3
Fin 2025	Fin des collisions
2029-2041	Phase à haute l



# 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
35 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
	Juin 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
	Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
2029-2041	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)	



# Le CERN



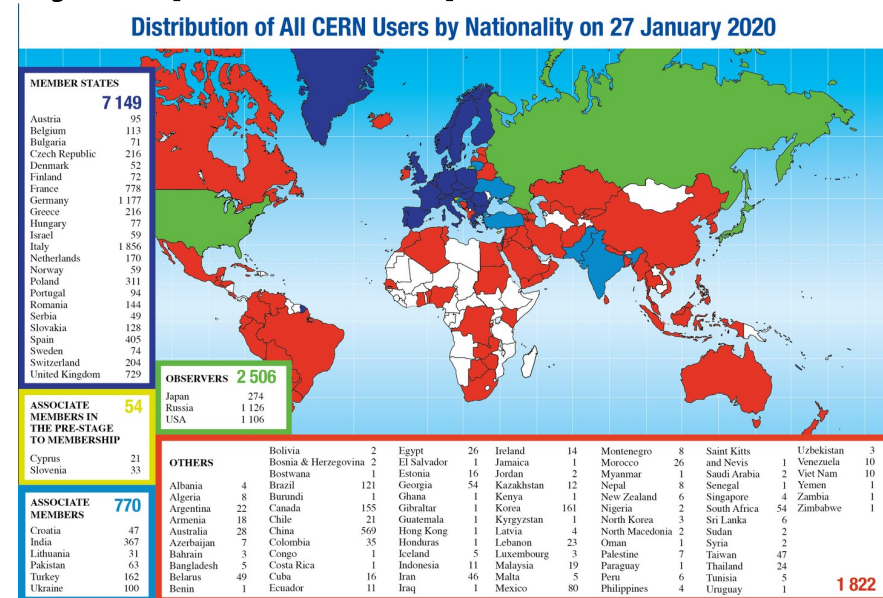
*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*

Le laboratoire européen pour la physique des particules

- organisation internationale
- créé en 1954
- 23 état membres
- Emploie ~2500 personnes
- ~12 000 utilisateurs

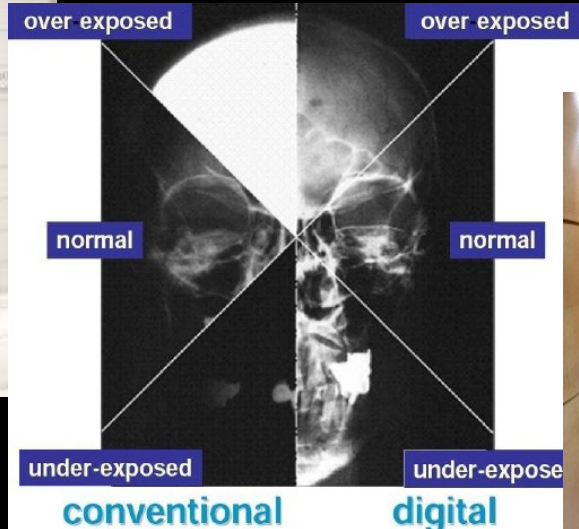
- 500 instituts, 80 pays

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

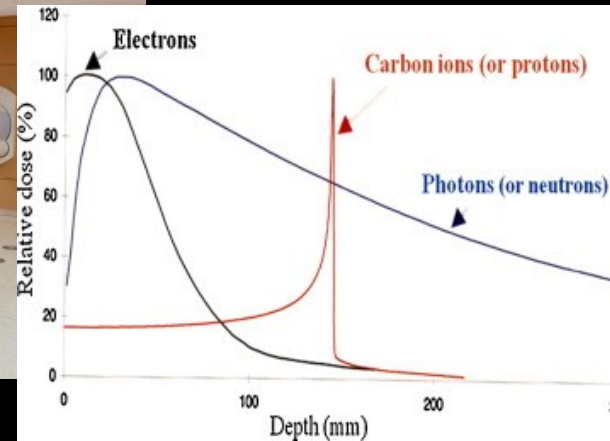
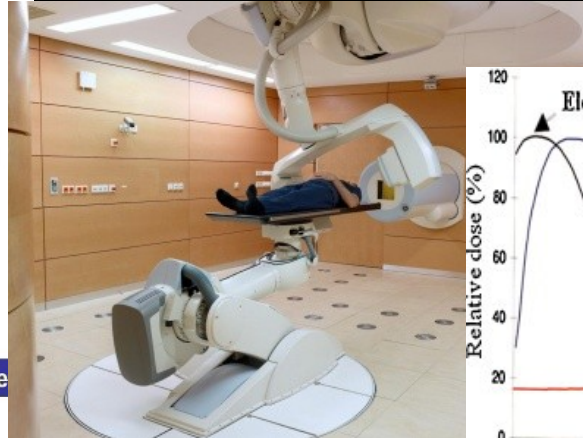




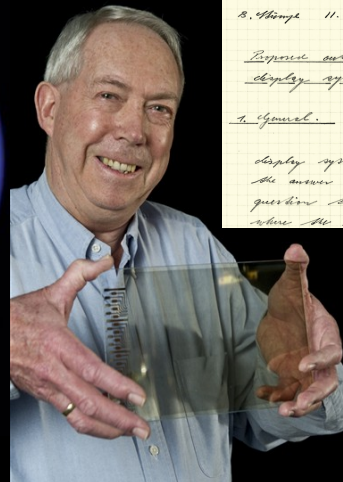
# A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



Running jobs: 246791  
Transfer rate: 13.98 GiB/sec

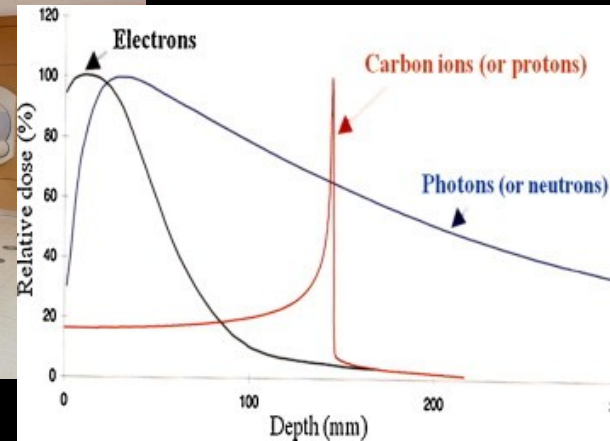
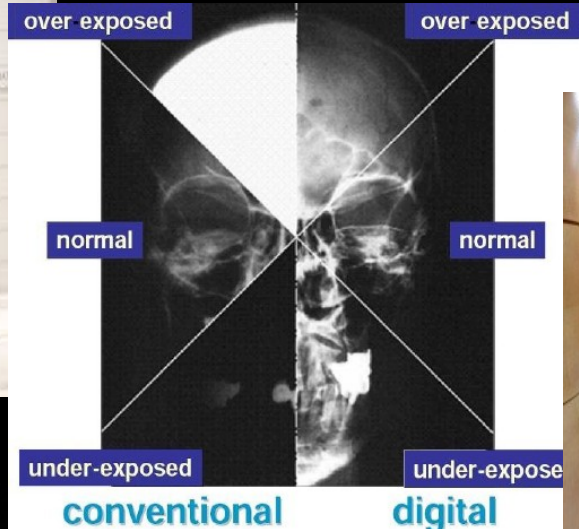


Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO  
© 2012 Google  
US Dept of State Geographer  
© 2009 GeoBasis-DE/BKG

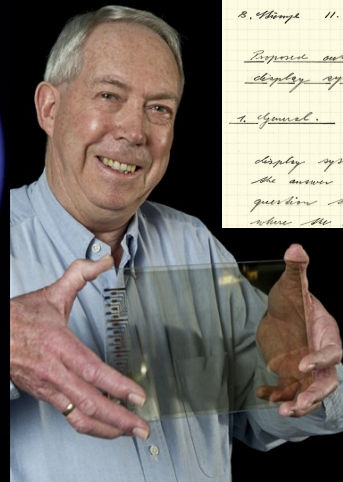


B. Thompson 11.03.1972 Page 7.  
Propose outline for a fast interactive computer display system \*  
1. General:  
nearly all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to

# A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



Running jobs: 246791  
Transfer rate: 13.98 GiB/sec

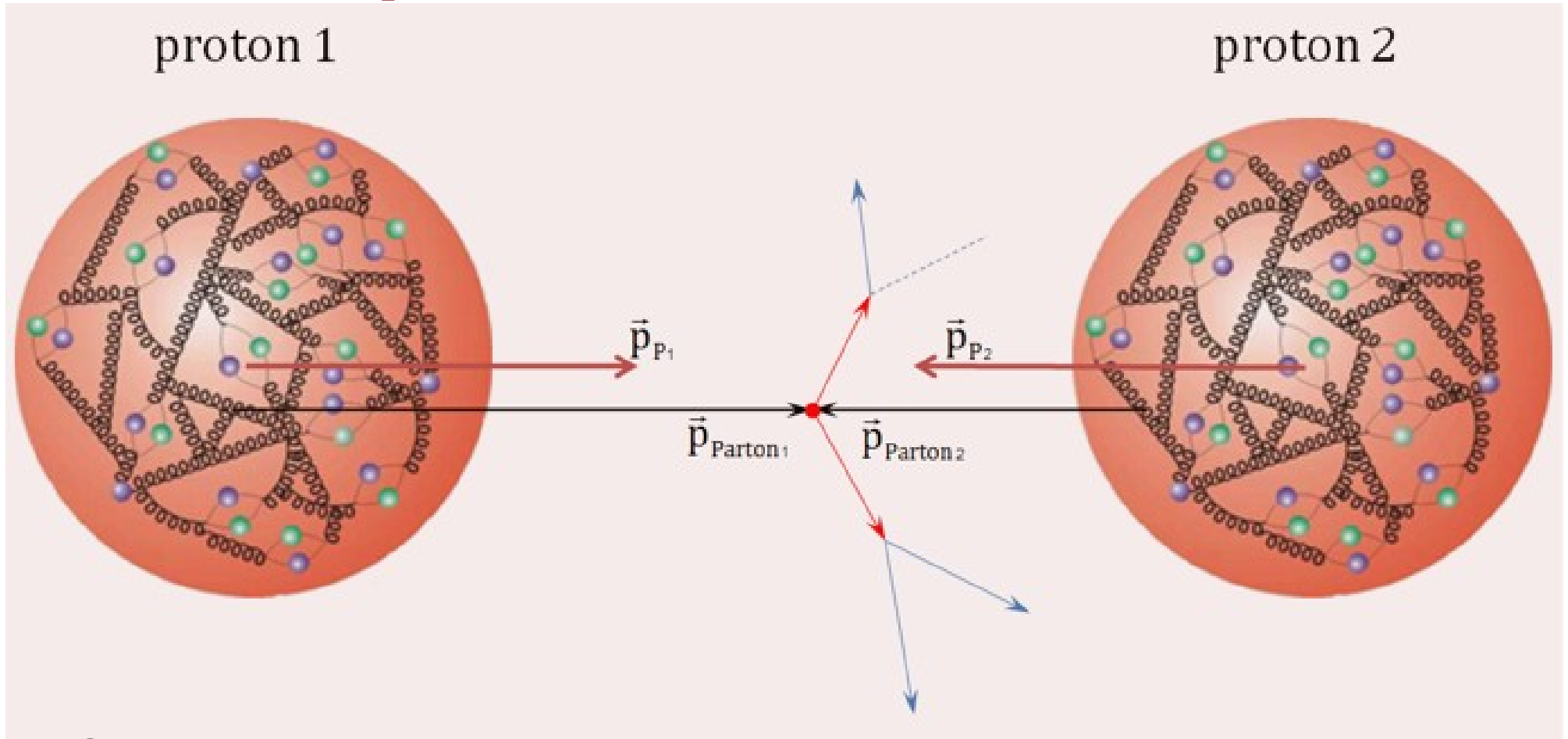


B. Thompson 11.03.1972 PAGE 7.  
Propose outline for a fast interactive computer display system\*  
1. General: *essentially all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to*

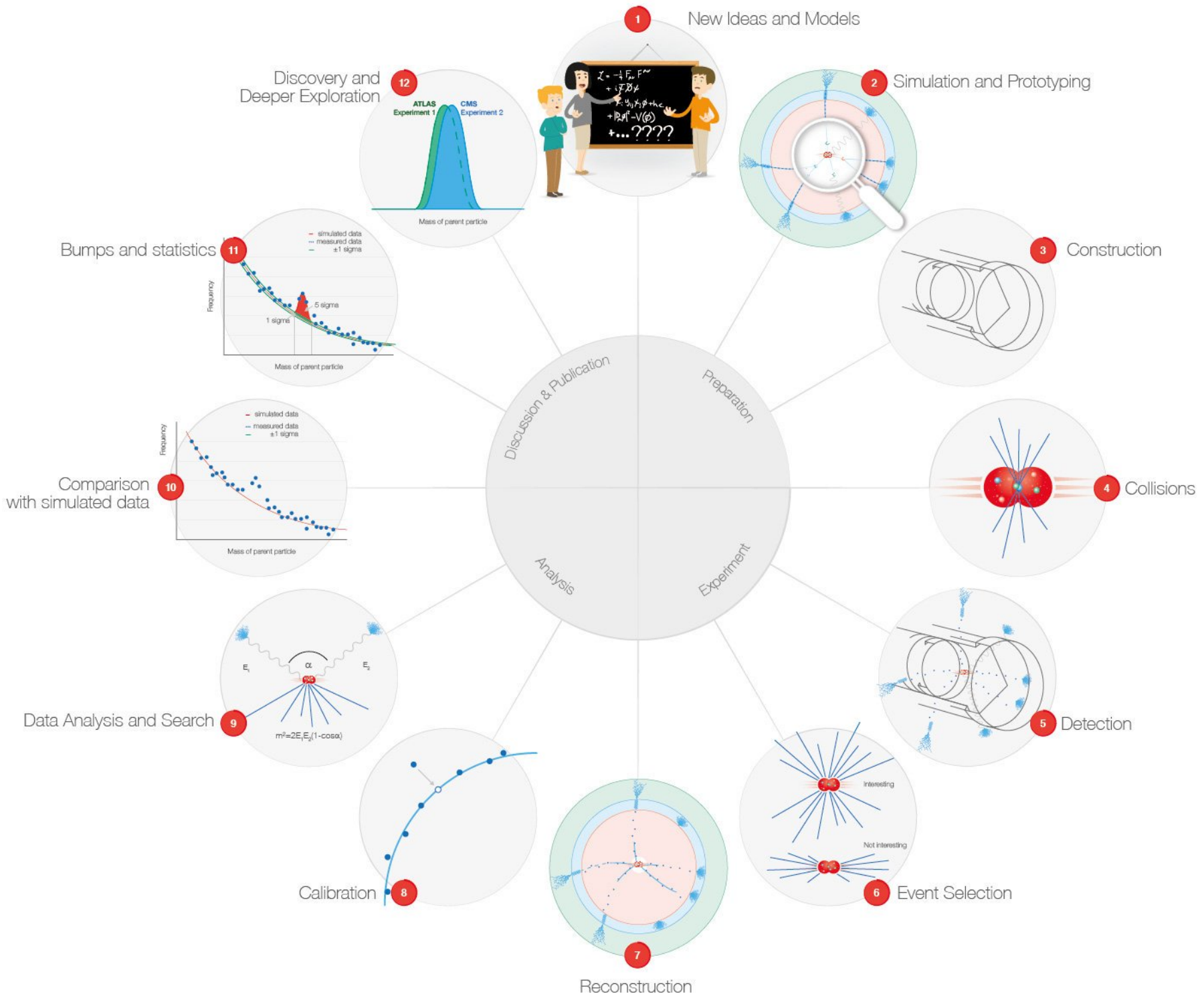


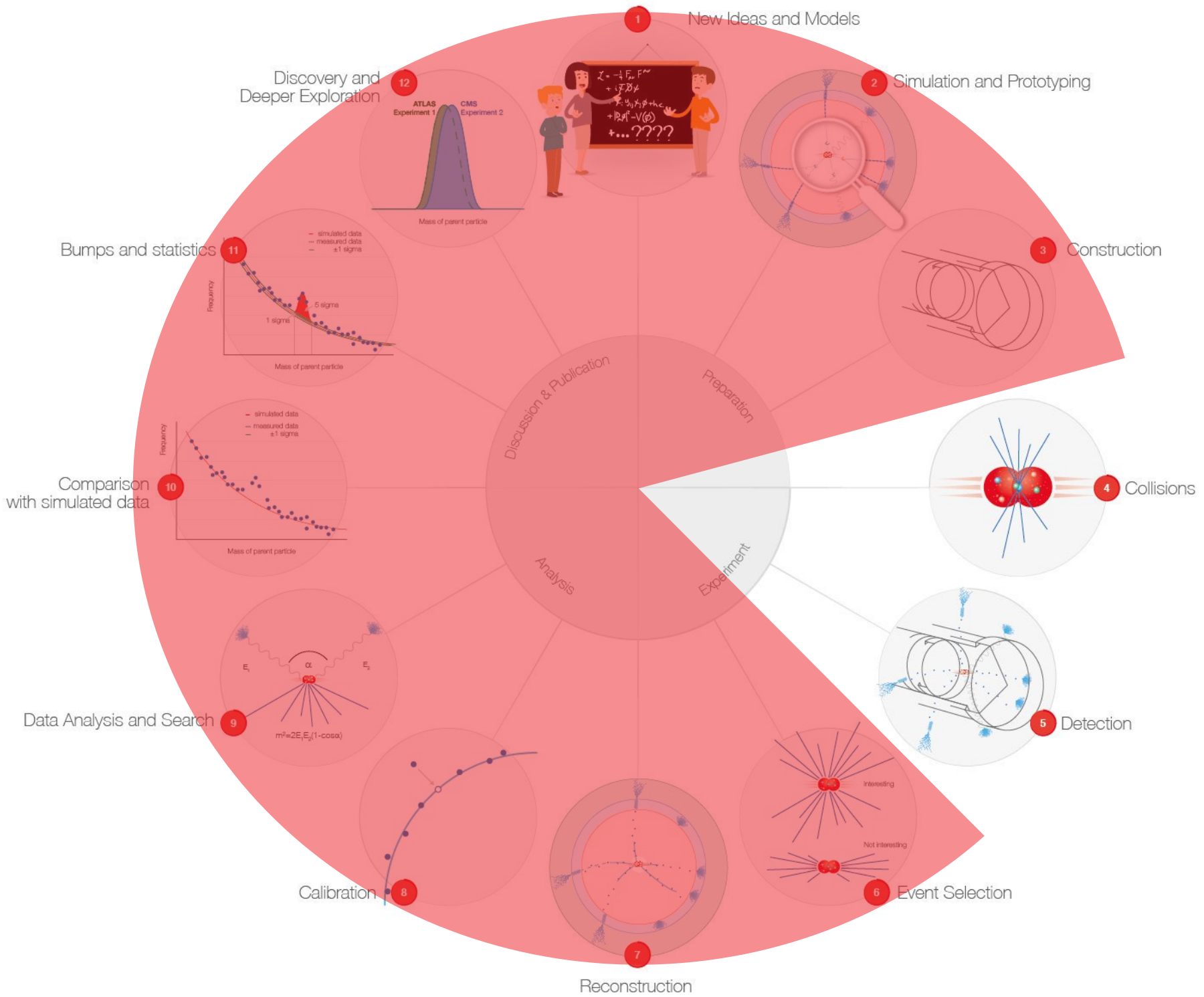
► Le Web a été inventé au CERN !

# Deux protons se rencontrent...

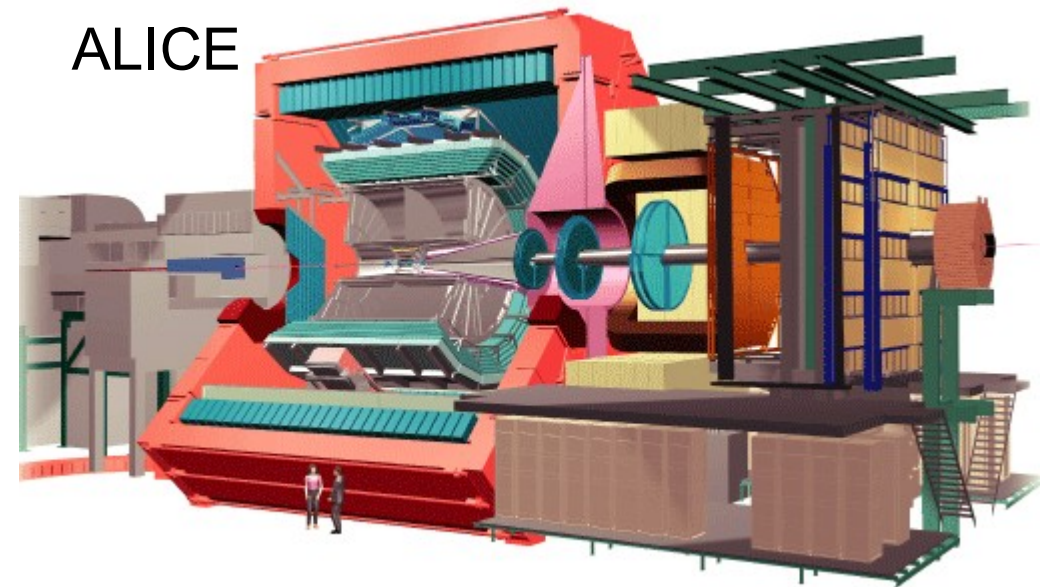
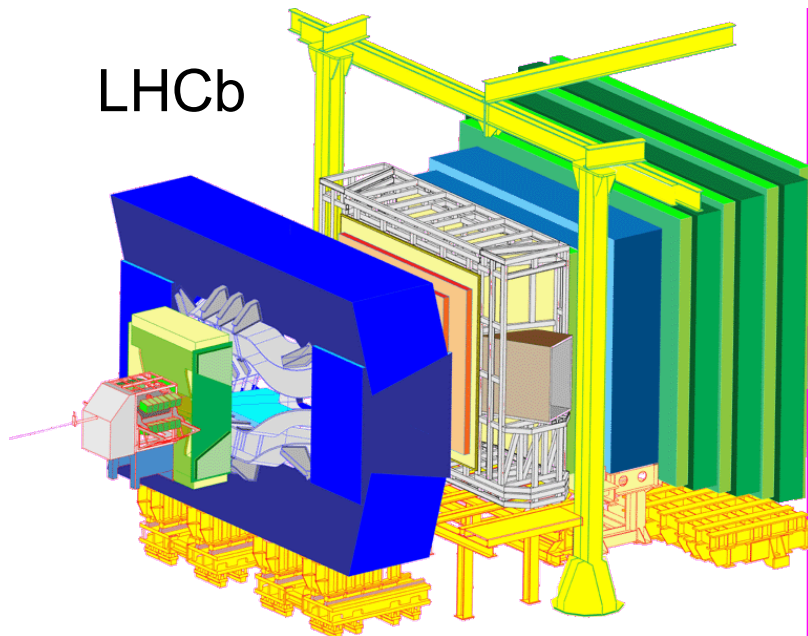
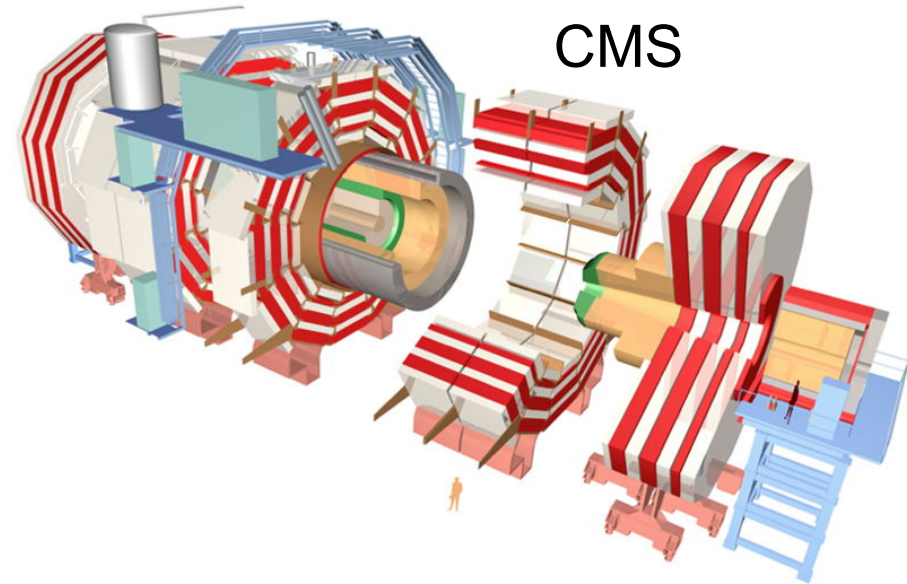
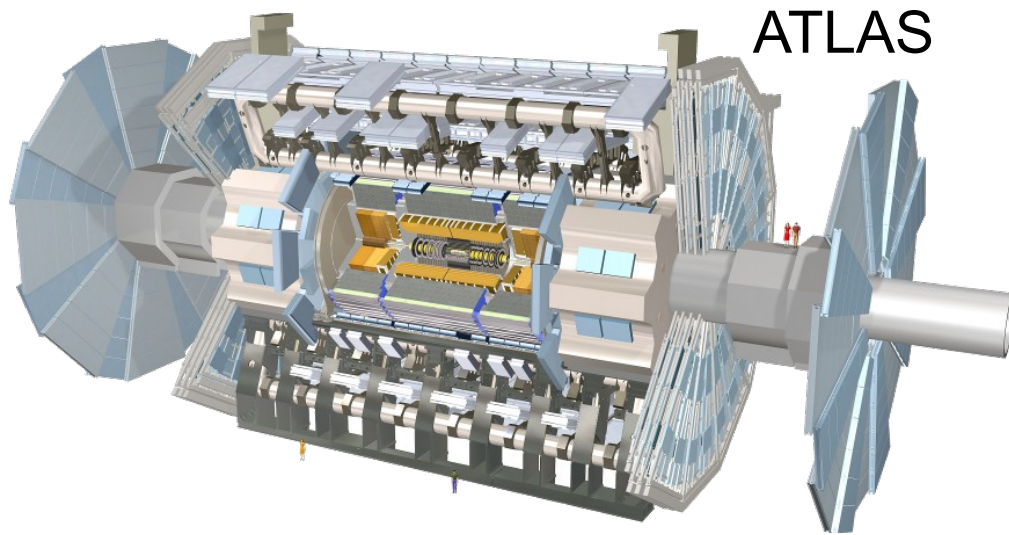


- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

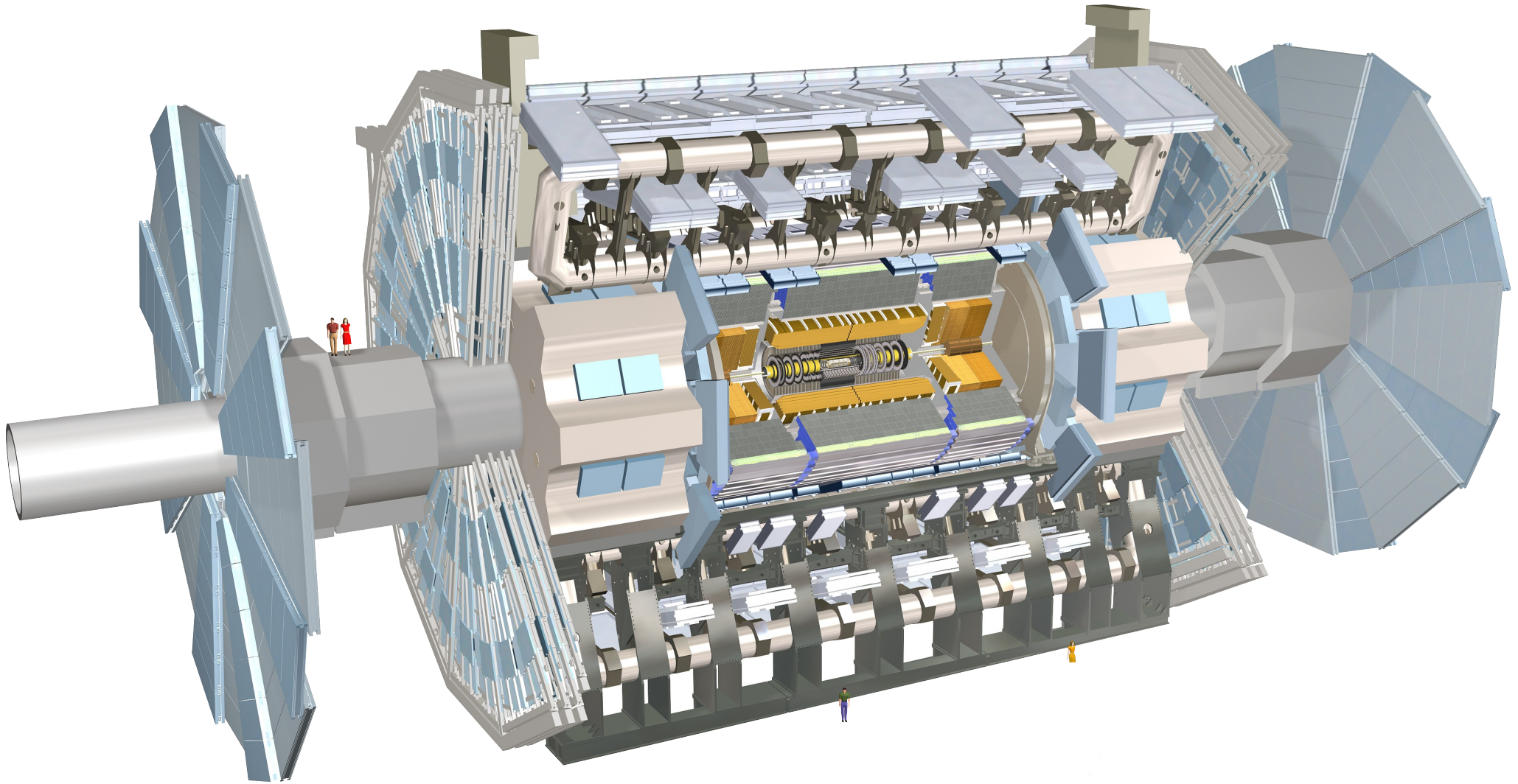




# Les détecteurs géants du LHC



# Le détecteur ATLAS



# La collaboration ATLAS

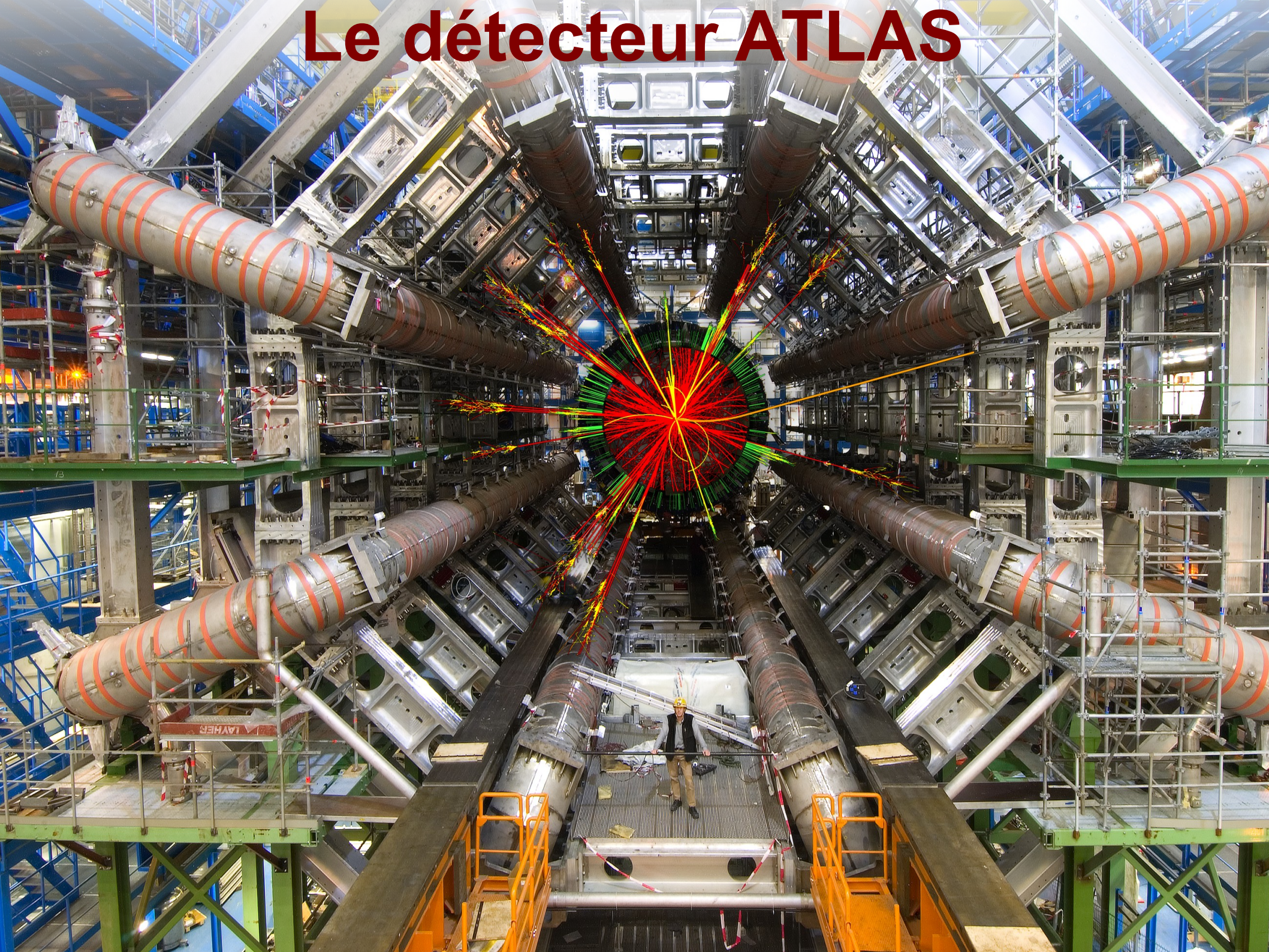


40 pays  
236 instituts  
2900 scientifiques  
<https://atlas.cern>



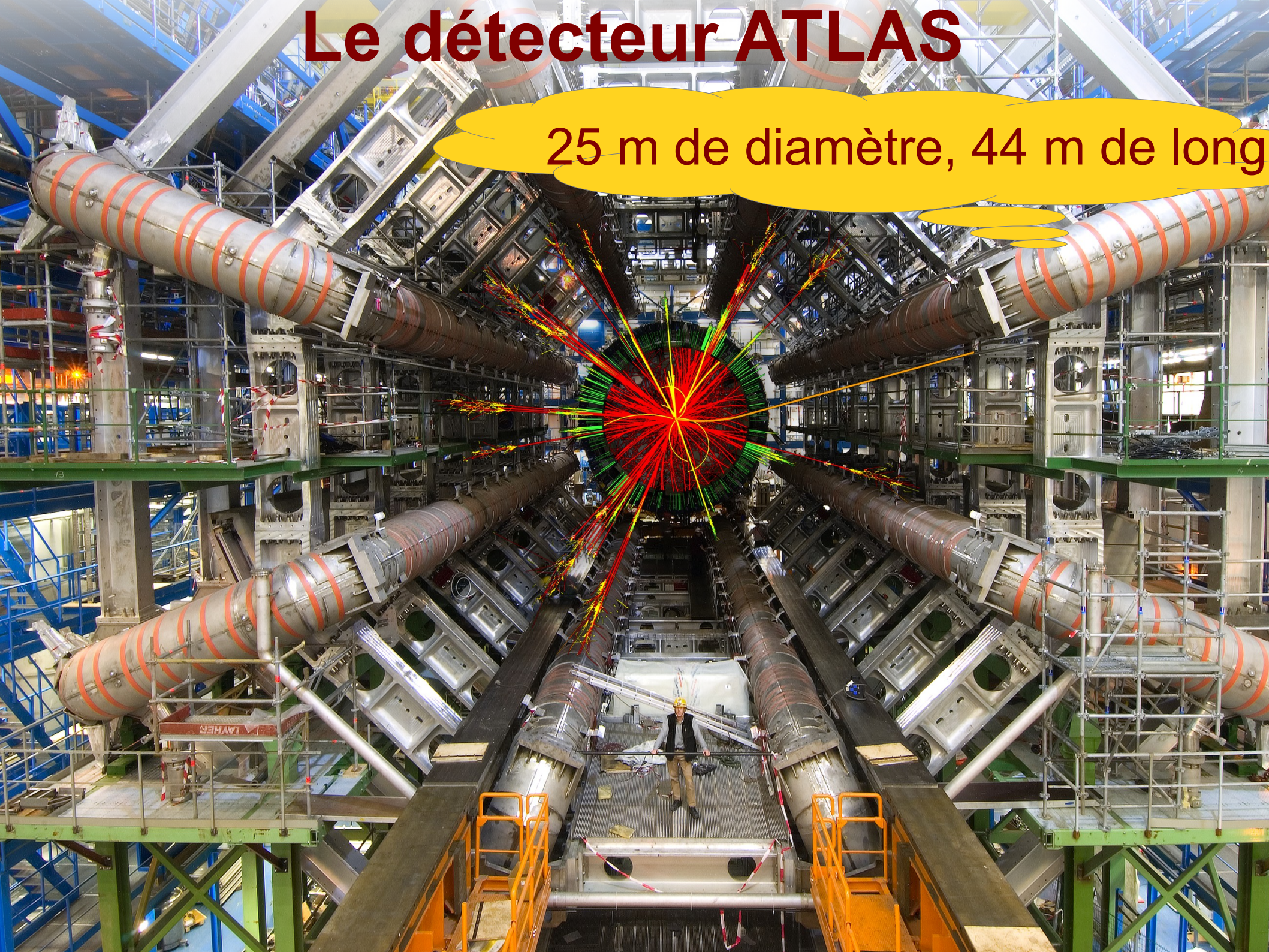


# Le détecteur ATLAS



# Le détecteur ATLAS

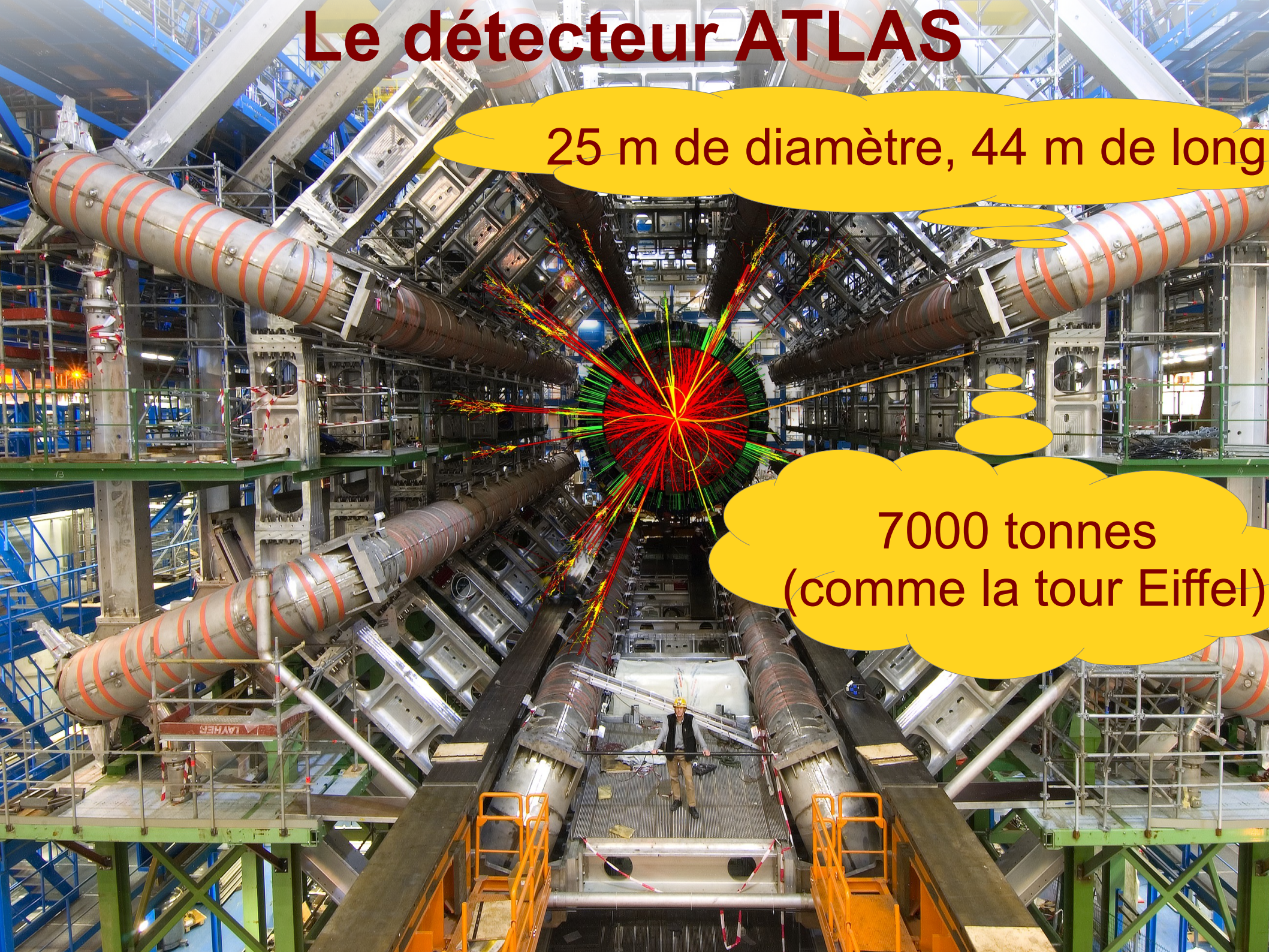
25 m de diamètre, 44 m de long



# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

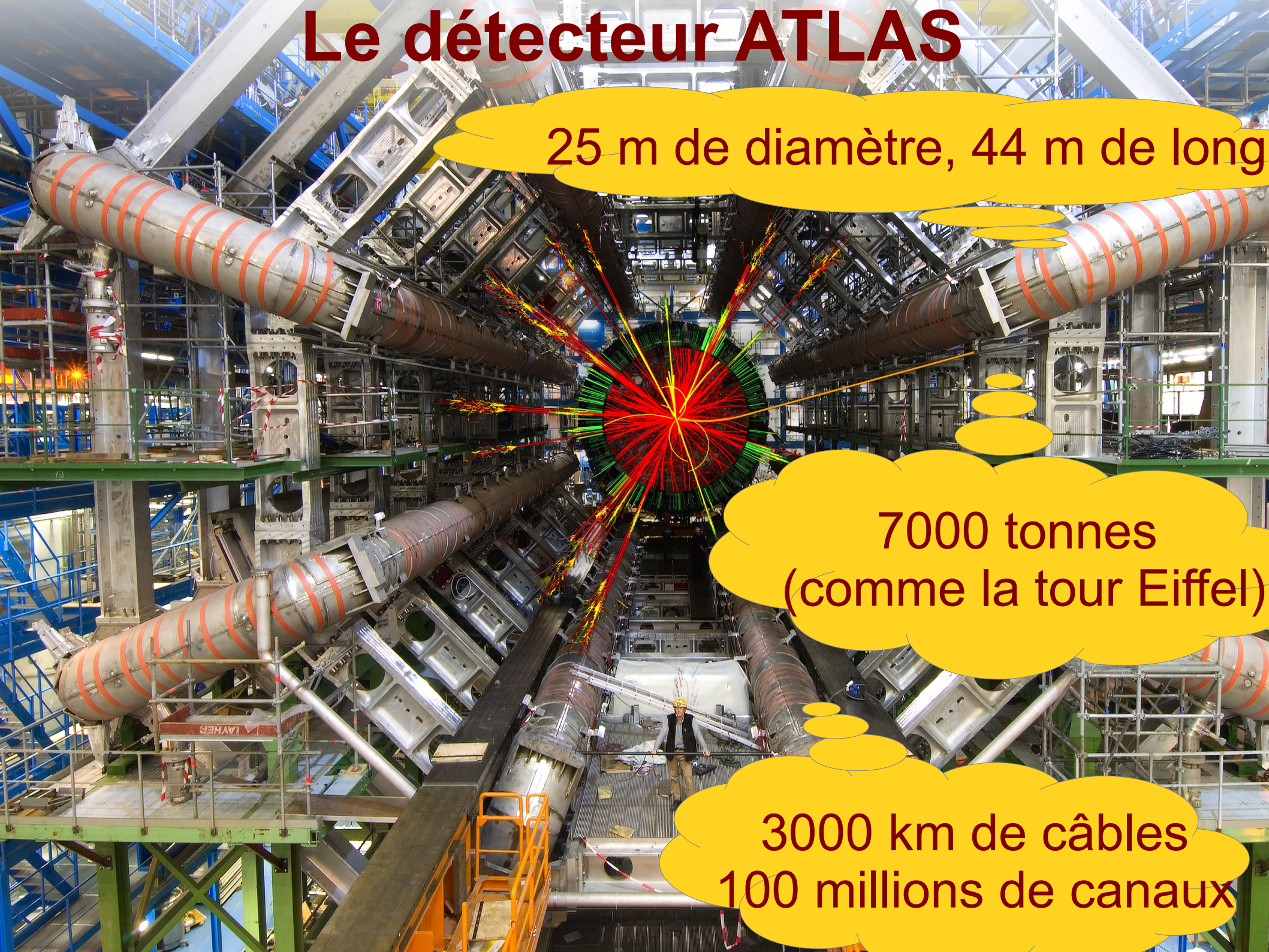


# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles  
100 millions de canaux



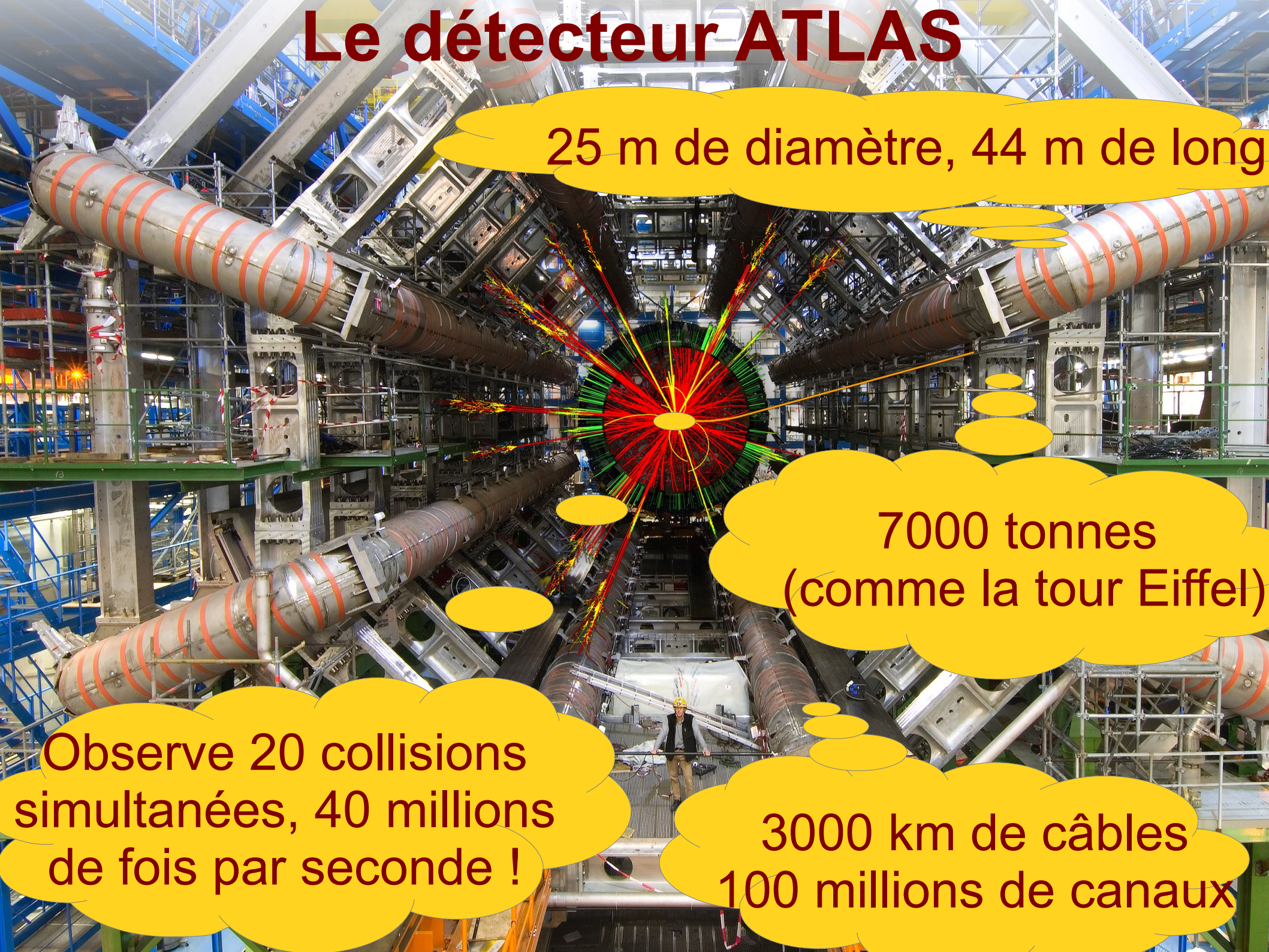
# Le détecteur ATLAS

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

The image shows the interior of the ATLAS detector tunnel. The tunnel is long and narrow, with a central calorimeter structure. A worker in a yellow hard hat and safety vest is visible in the distance, providing a sense of scale. The tunnel is lined with various pipes, cables, and structural elements. The lighting is bright, highlighting the metallic surfaces and the complex machinery.

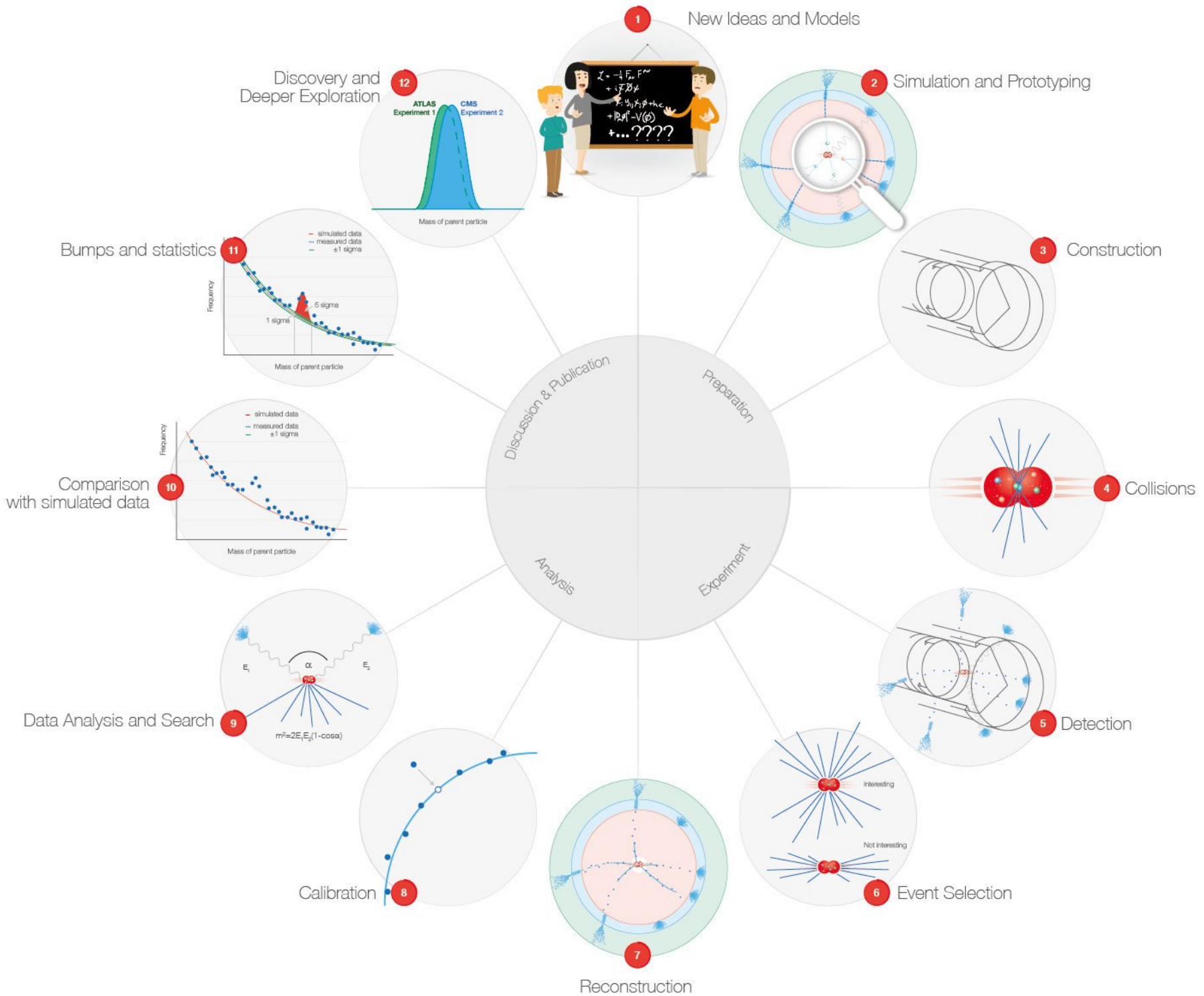
25 m de diamètre, 44 m de long

En France :  
8 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



1 New Ideas and Models

2 Simulation and Prototyping

3 Construction

4 Collisions

5 Detection

6 Event Selection

7 Reconstruction

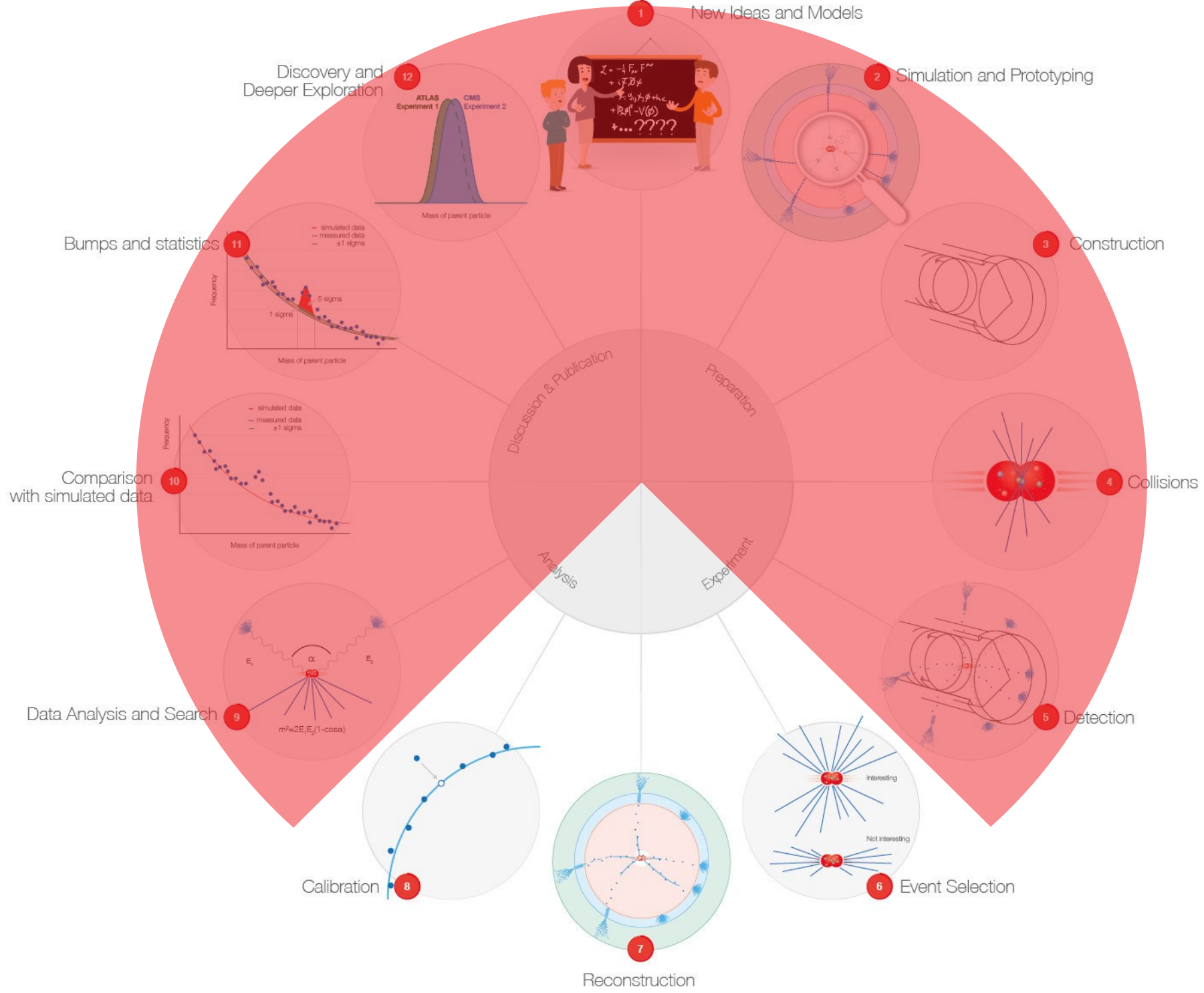
8 Calibration

9 Data Analysis and Search

10 Comparison with simulated data

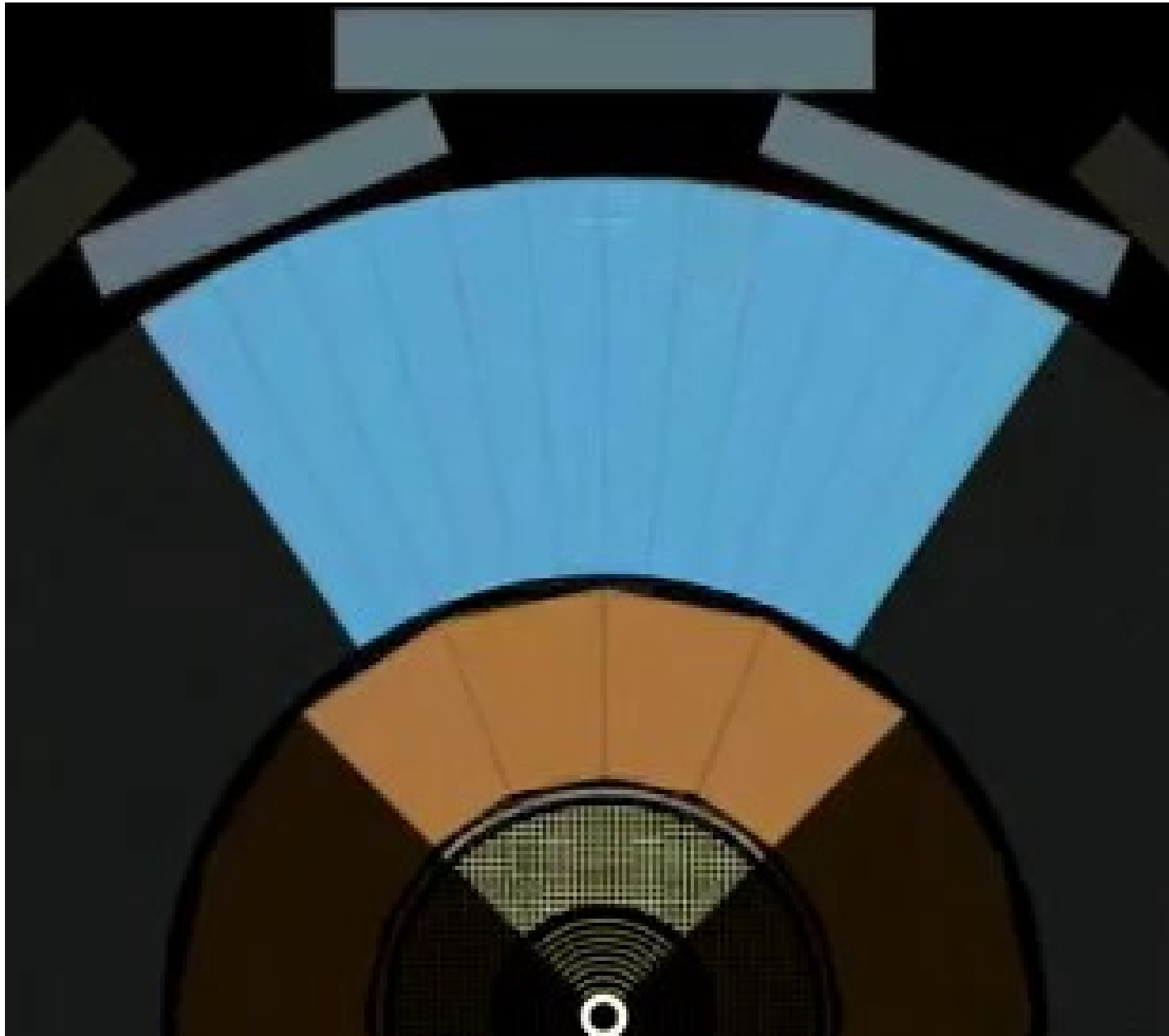
11 Bumps and statistics

12 Discovery and Deeper Exploration





# Interaction des particules avec le détecteur



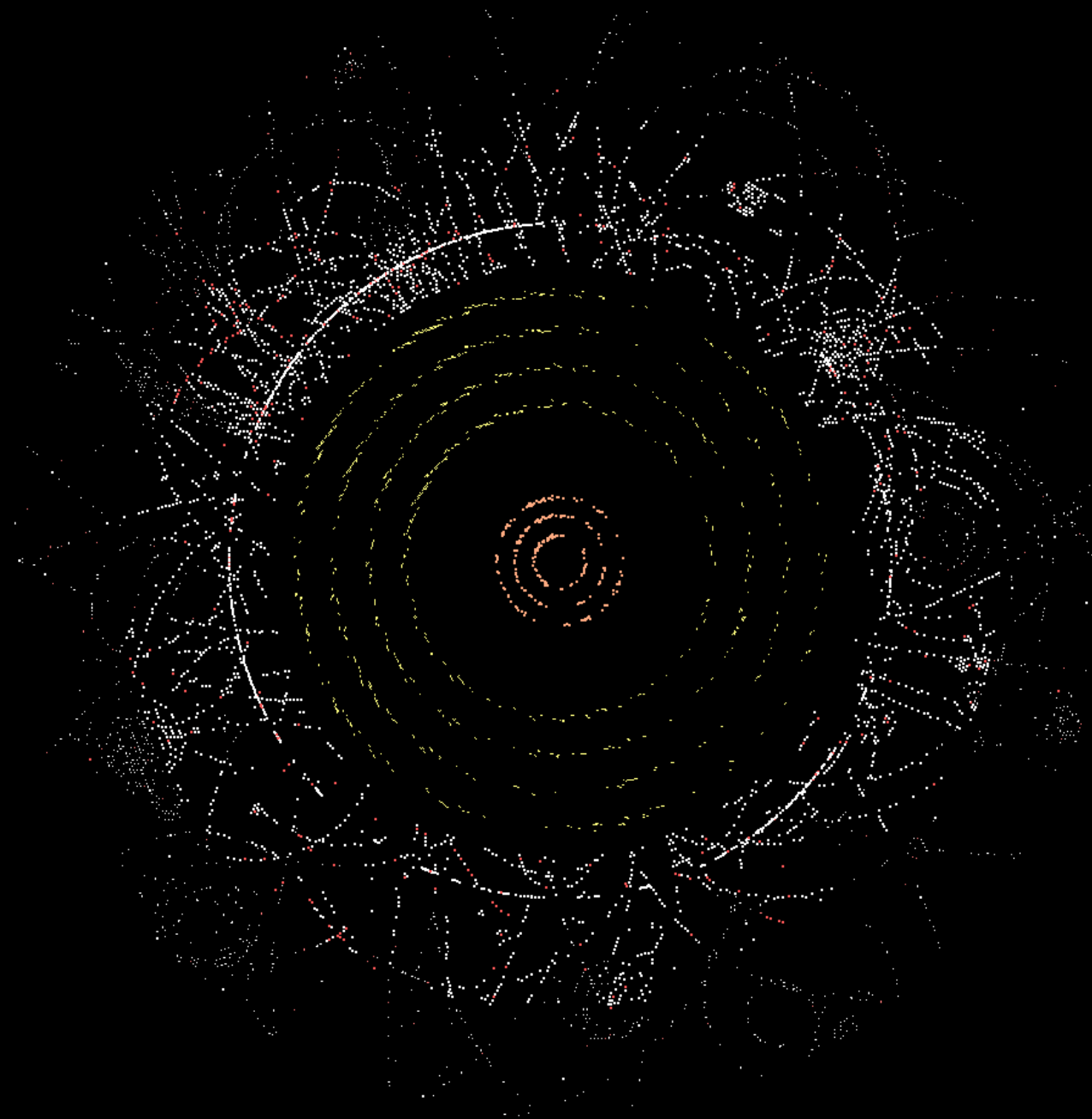
# Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



© CERN

- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m<sup>2</sup> de silicium

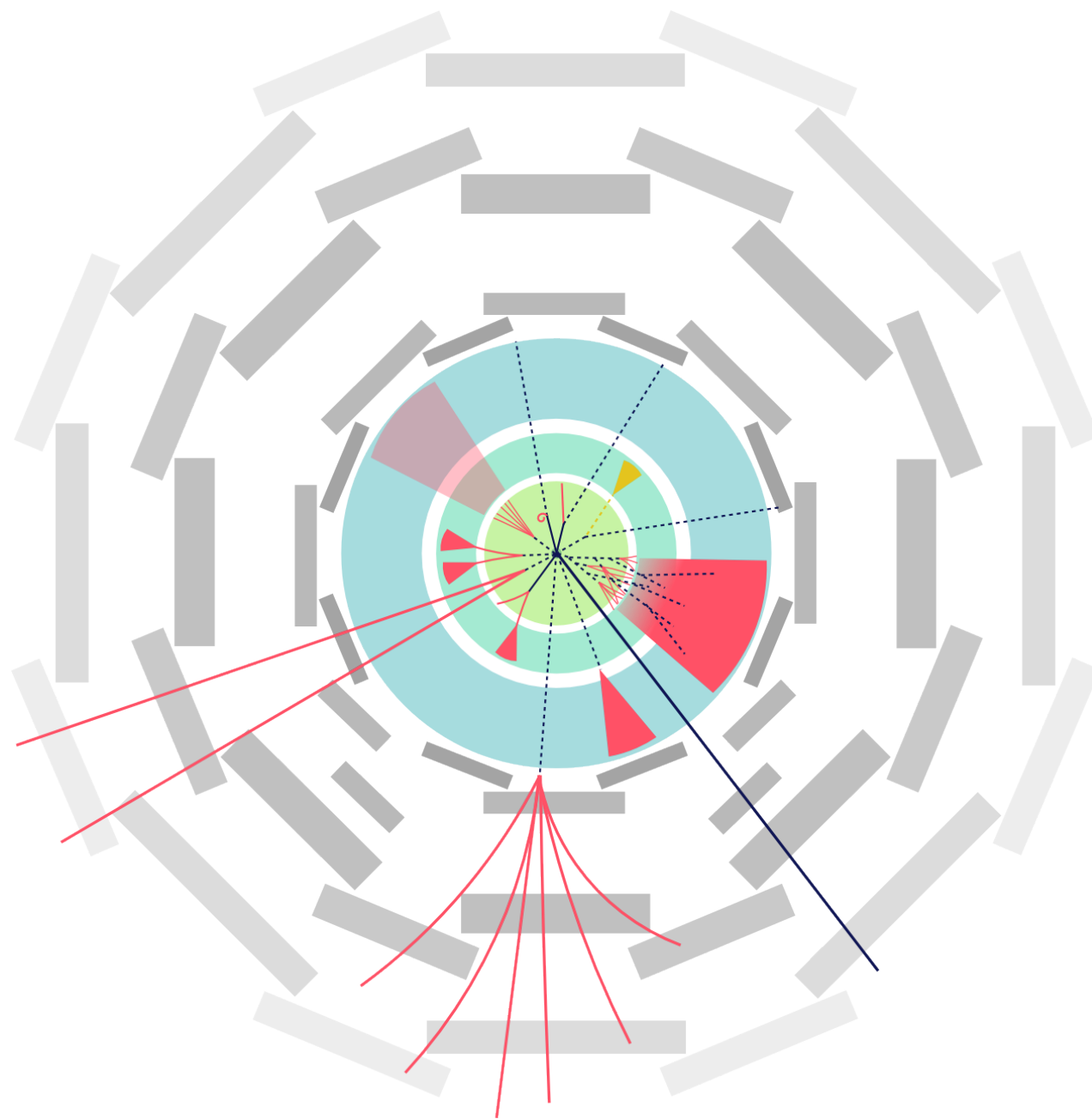
# Passage des particules

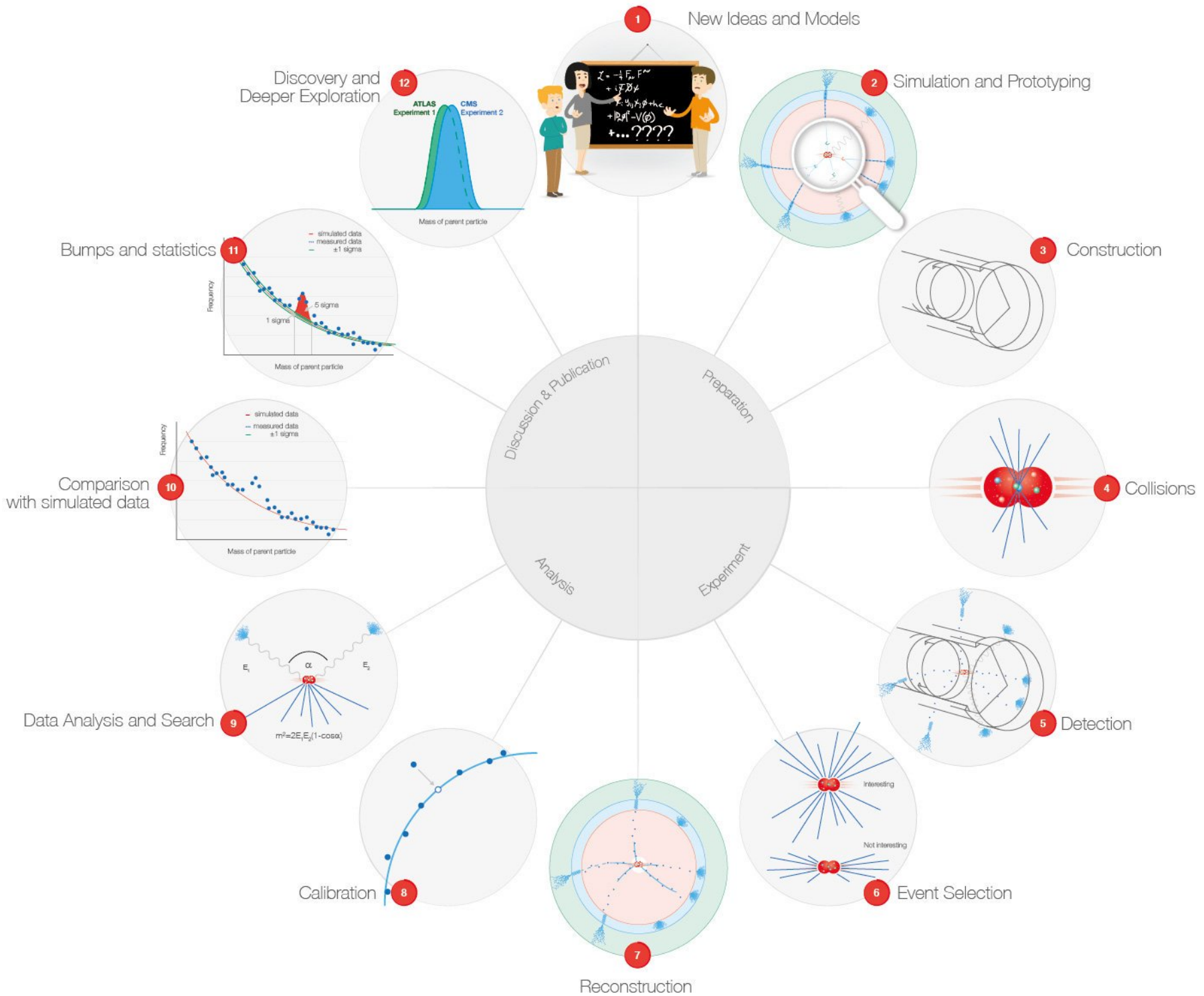


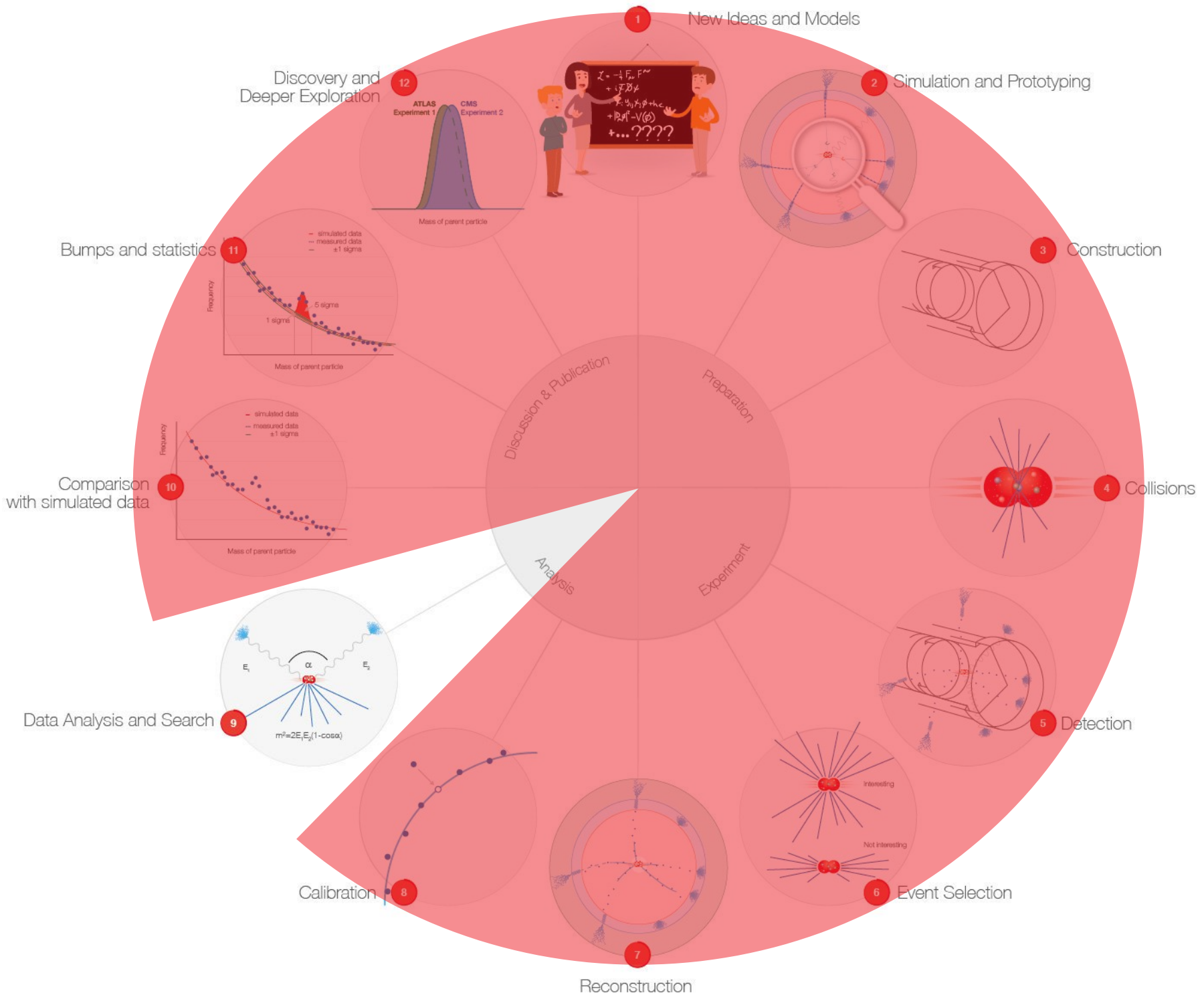
# Reconstruction des trajectoires



# Variété d'objets



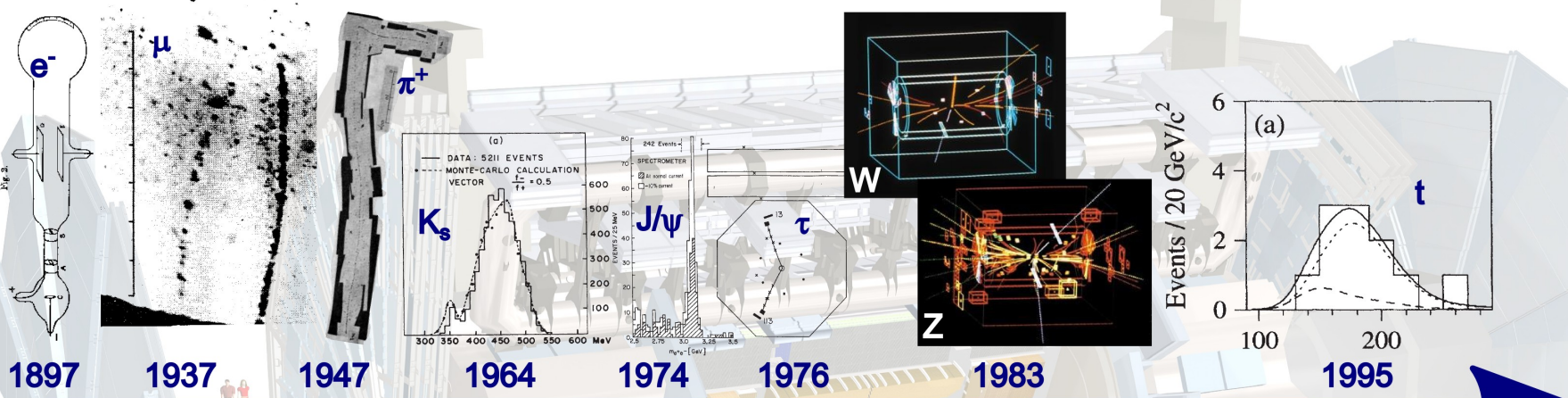




# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

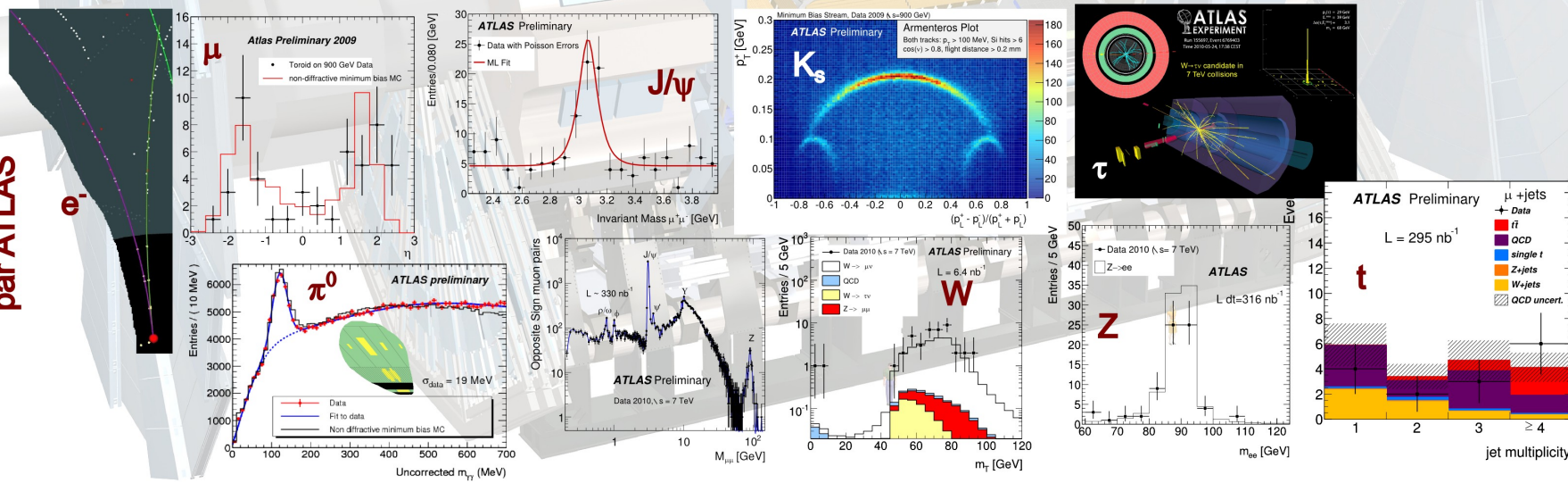
Découverte historique



déc 2009

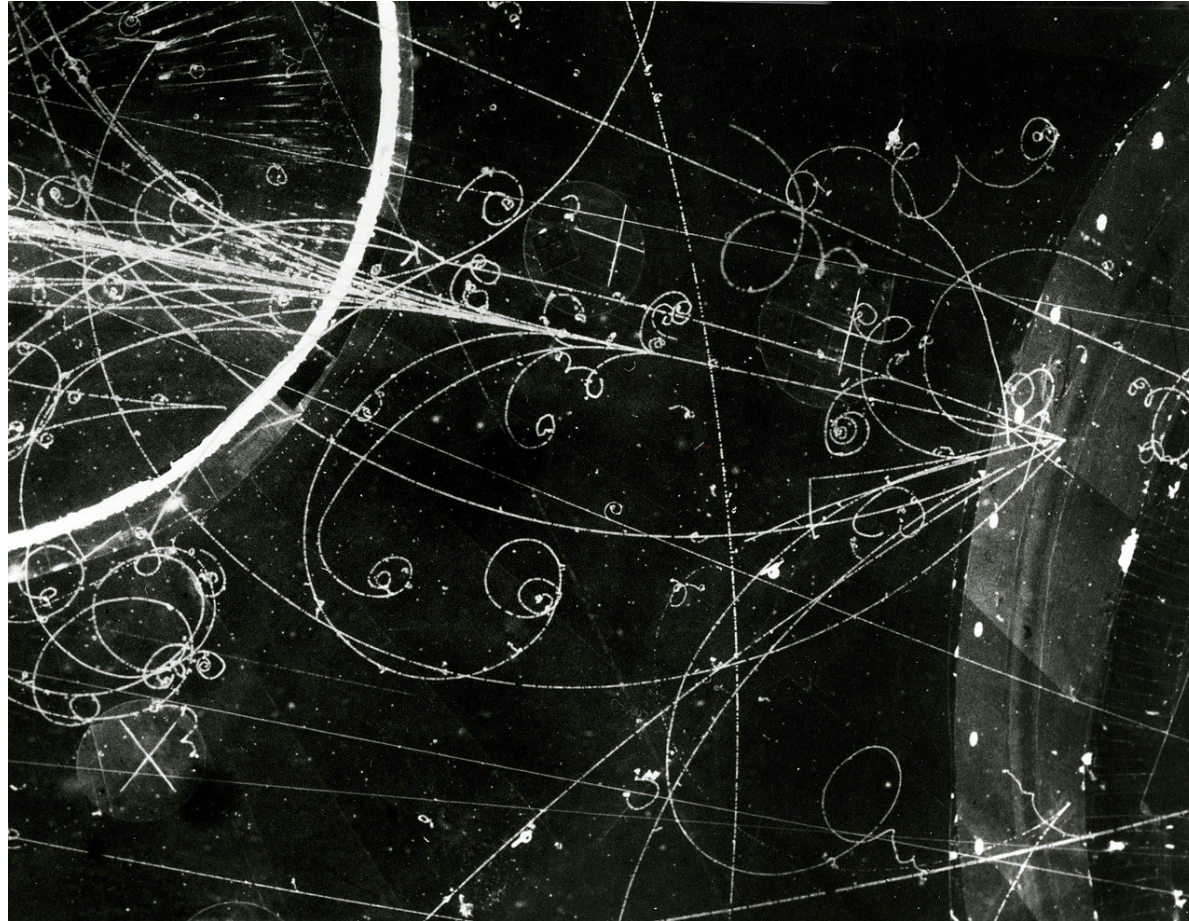
août 2010

Redécouverte par ATLAS

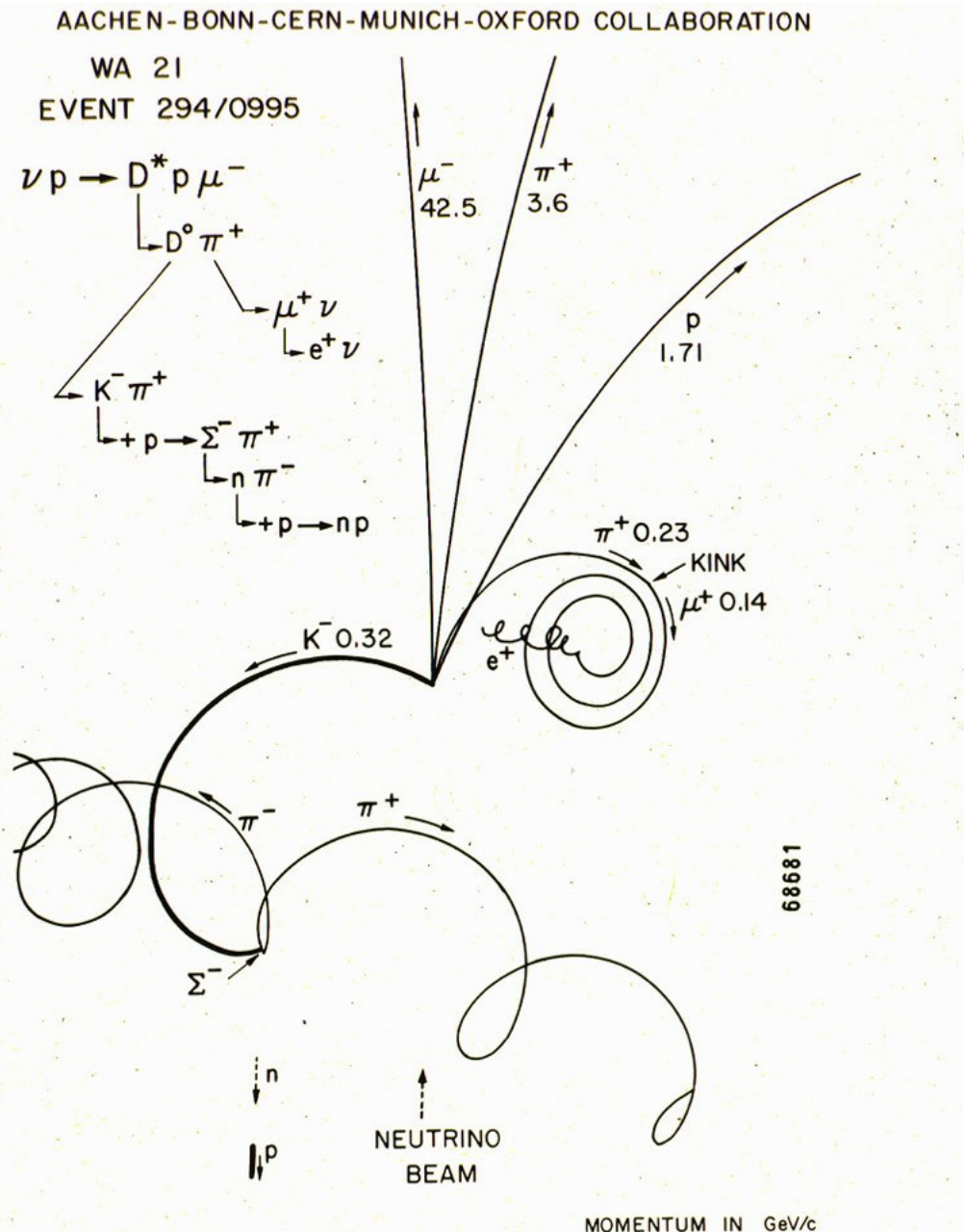
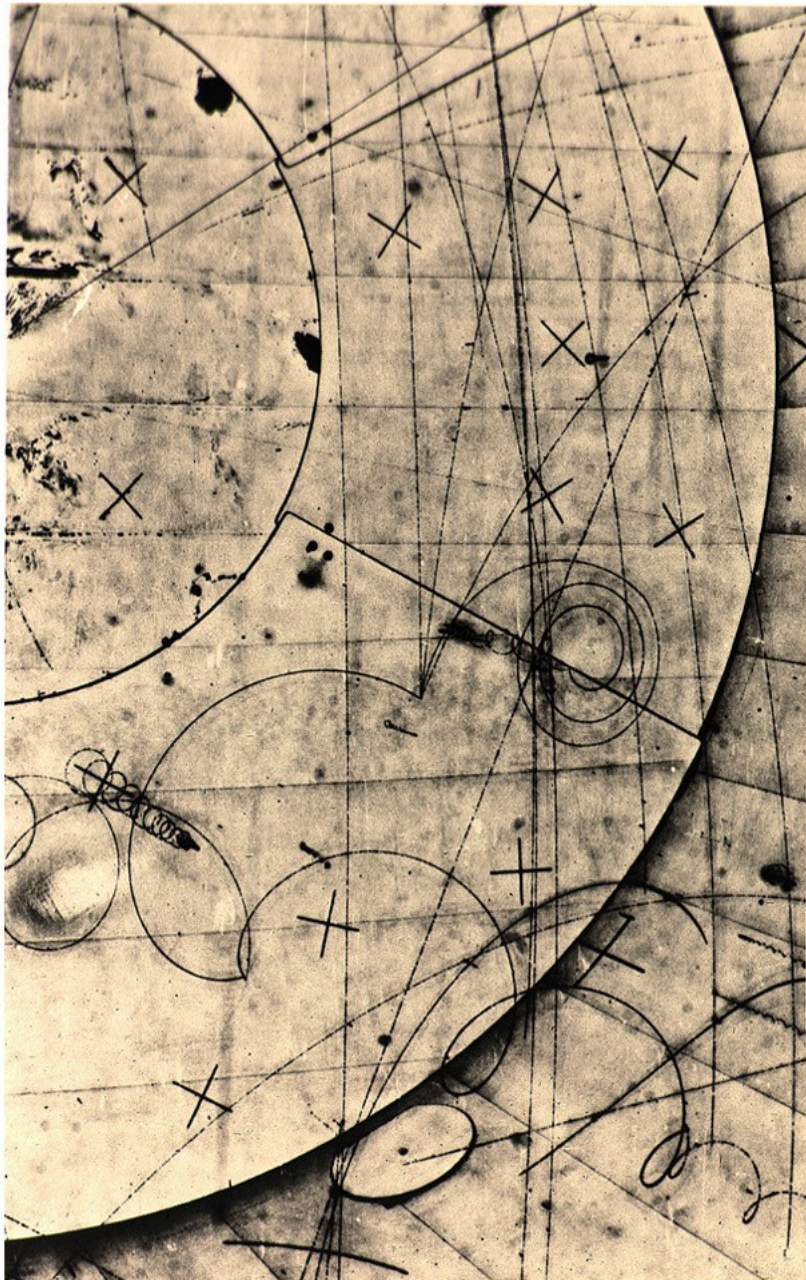




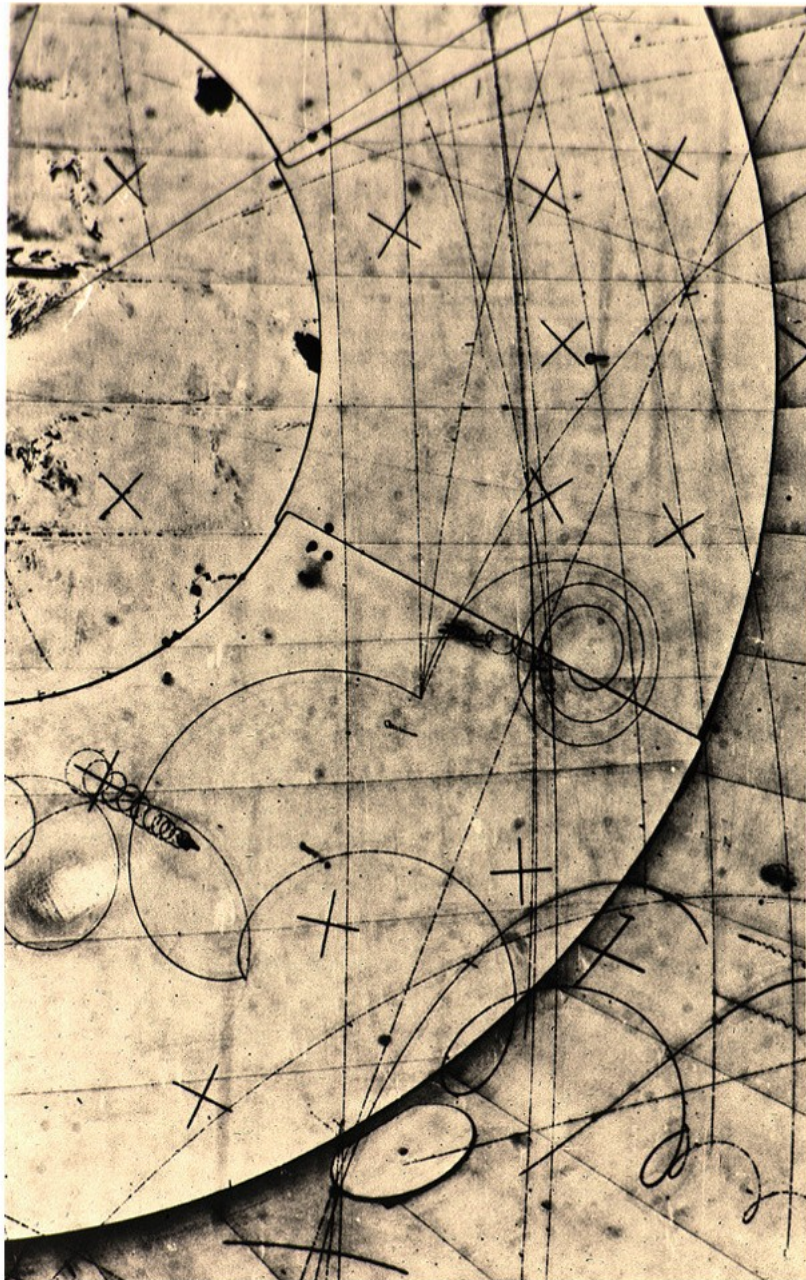
# « Vraies » photographies



# « Vraies » photographies



# « Vraies » photographies



AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION

EVE  
 $\nu p$



KINK

.14



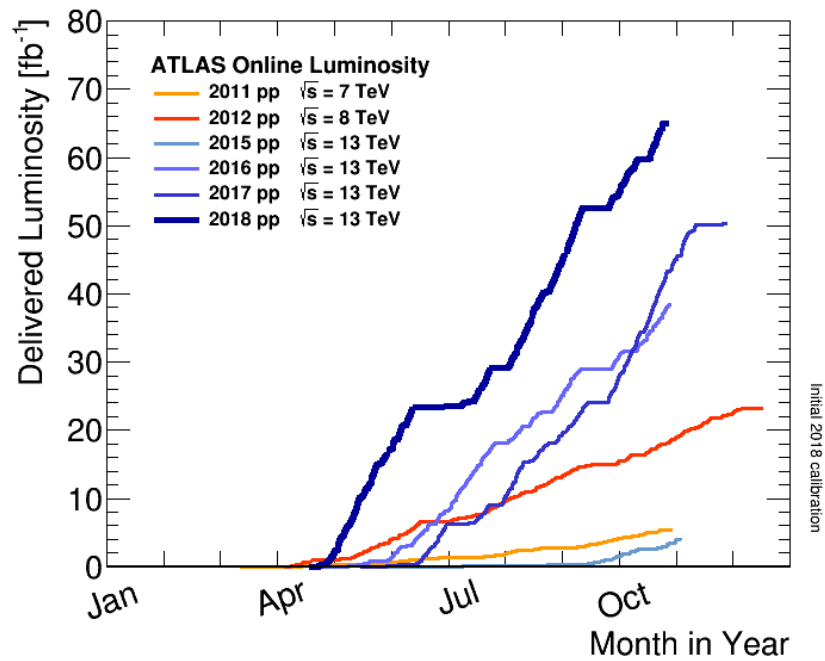
68681

$n$   
 $p$

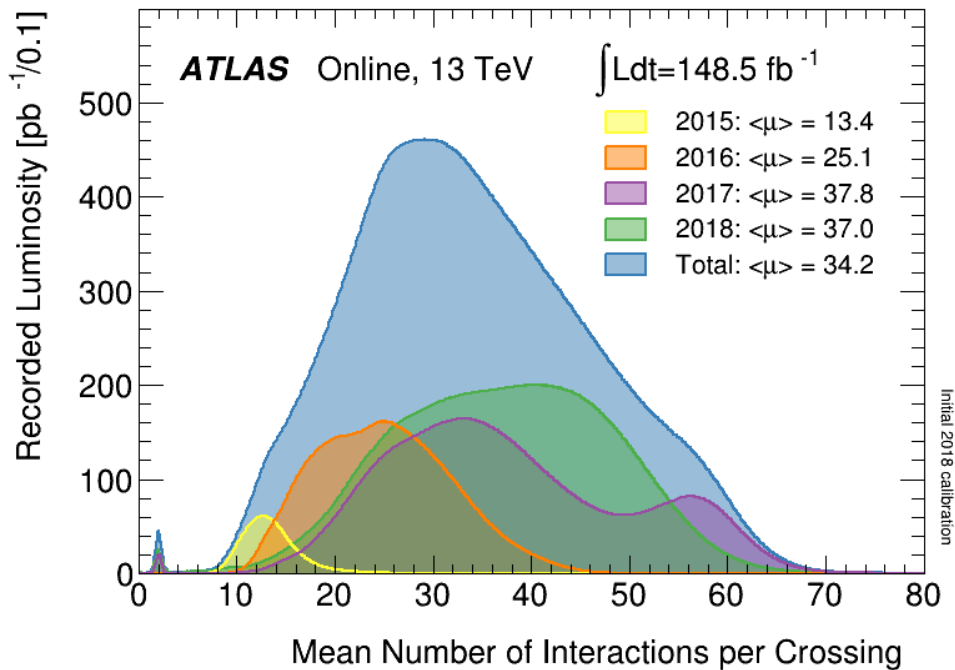
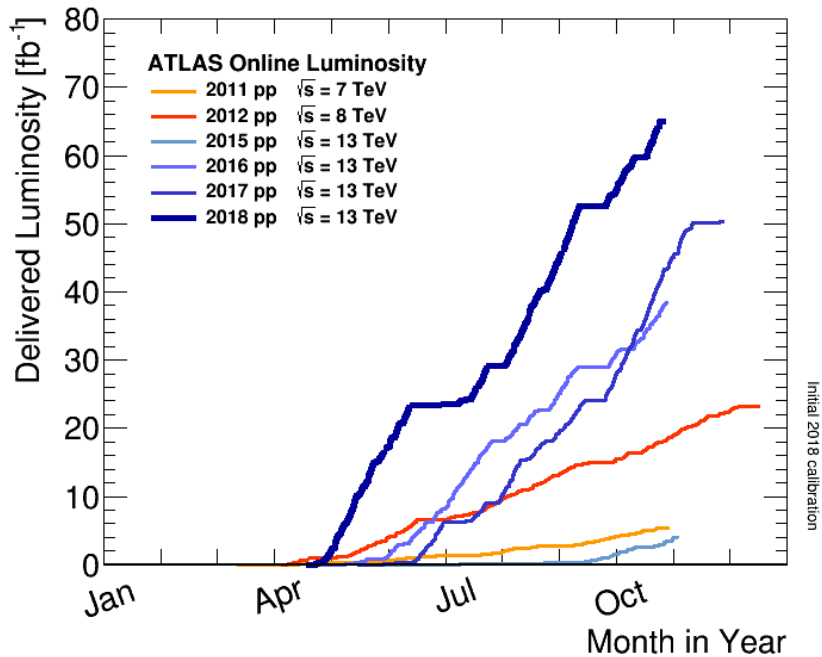
NEUTRINO  
BEAM

MOMENTUM IN GeV/c

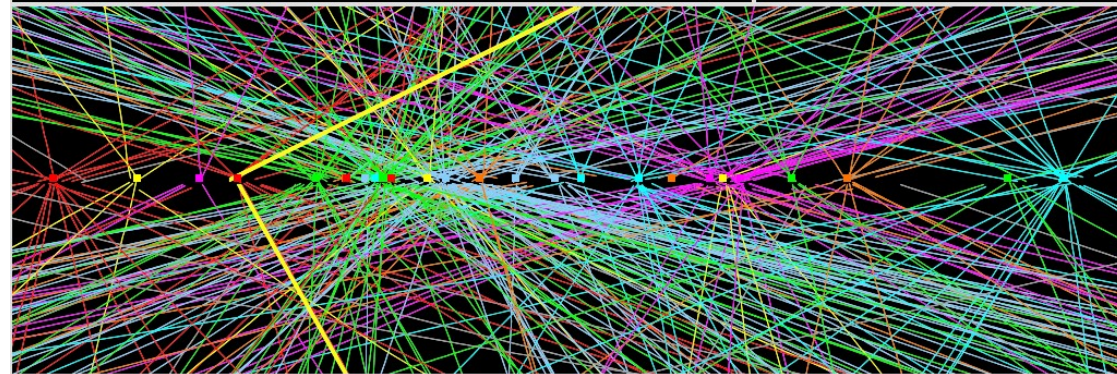
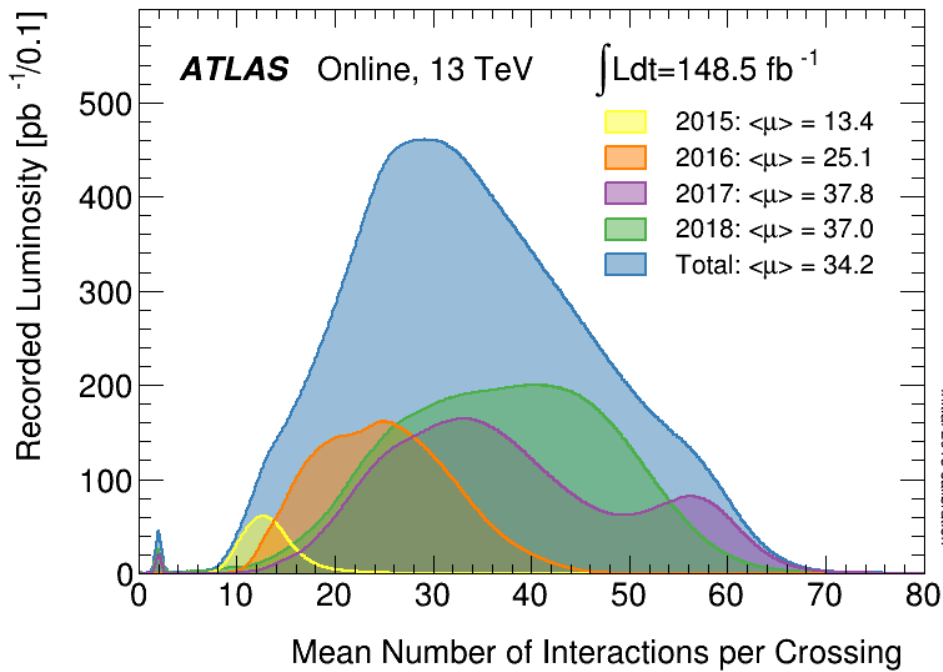
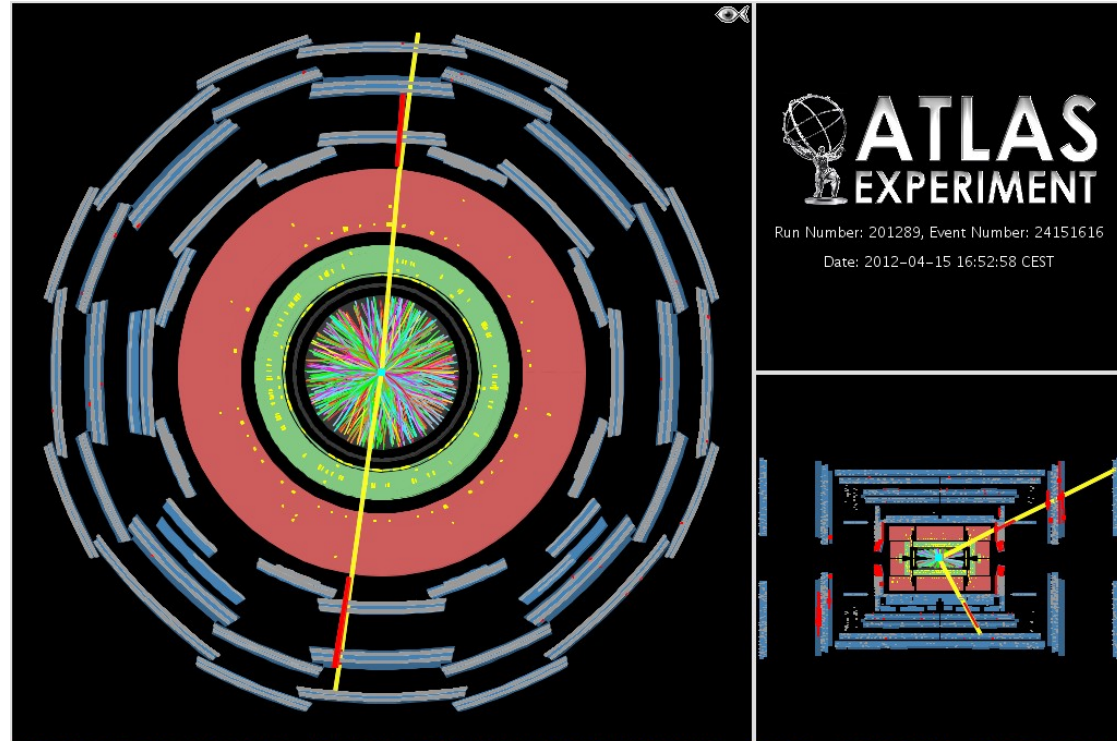
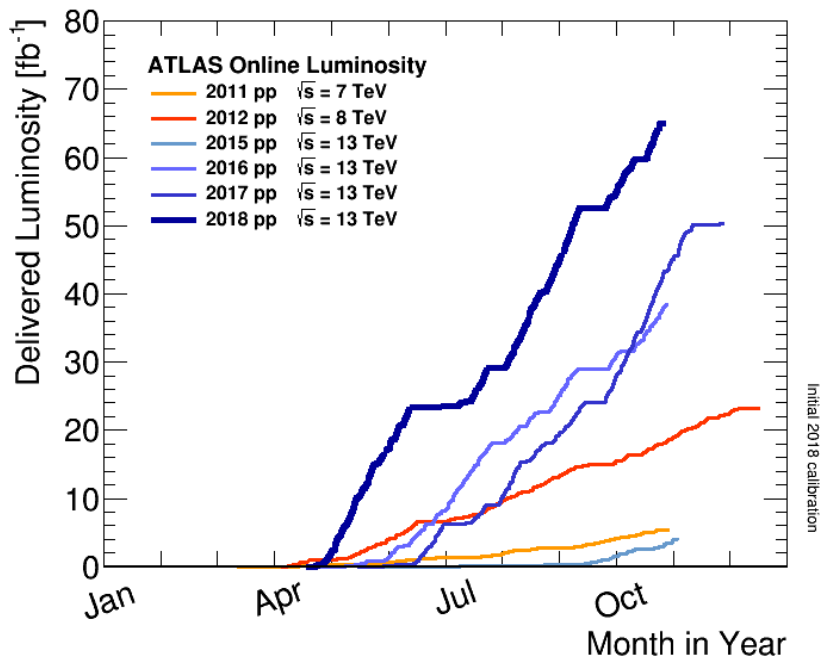
# Accumulation des données



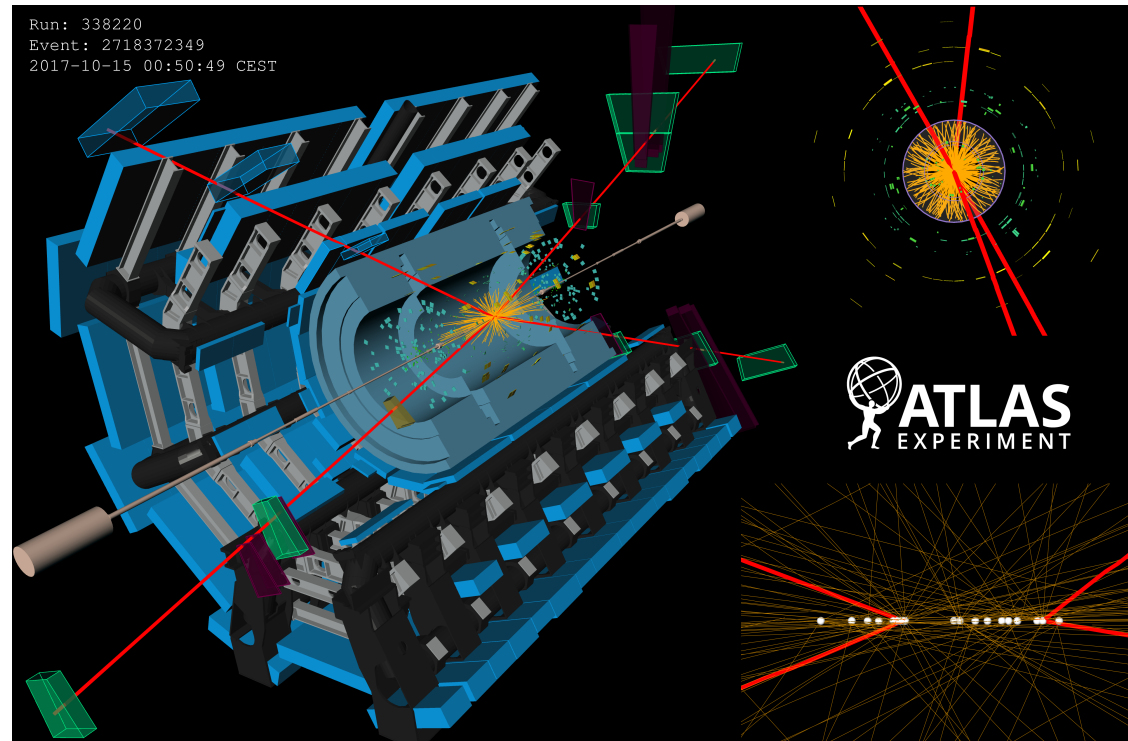
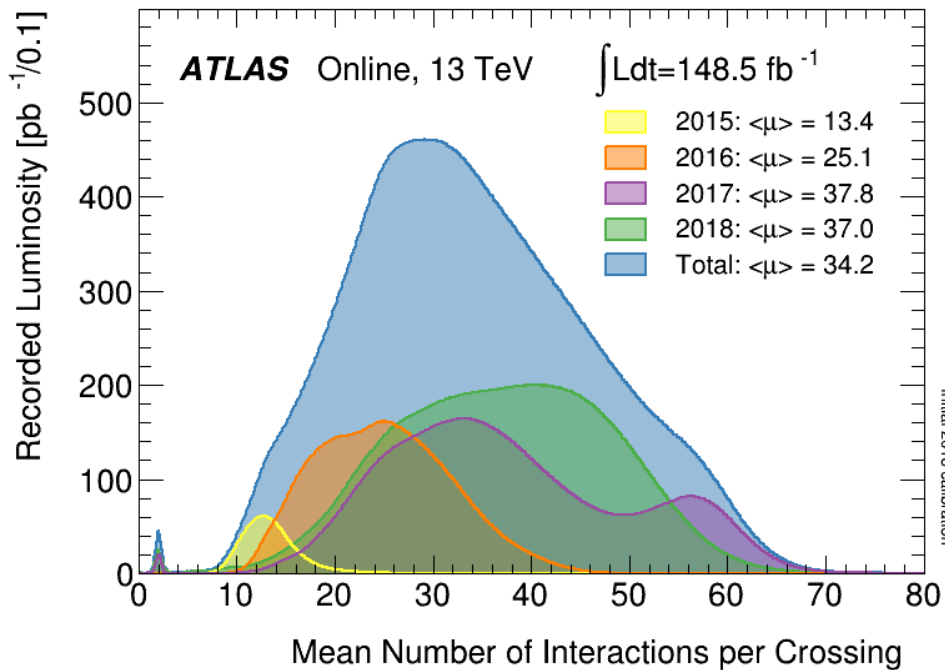
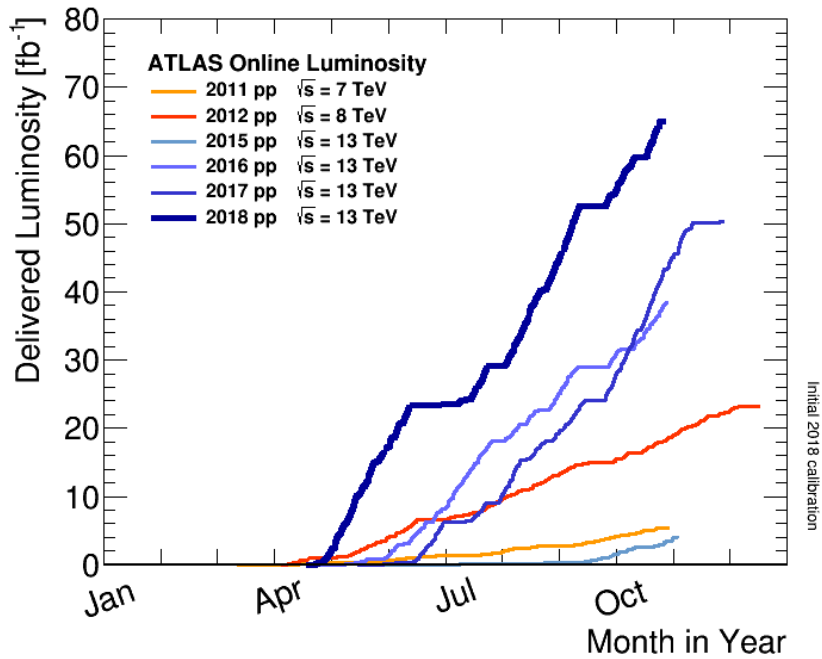
# Accumulation des données



# Accumulation des données



# Accumulation des données



# Le LHC en action

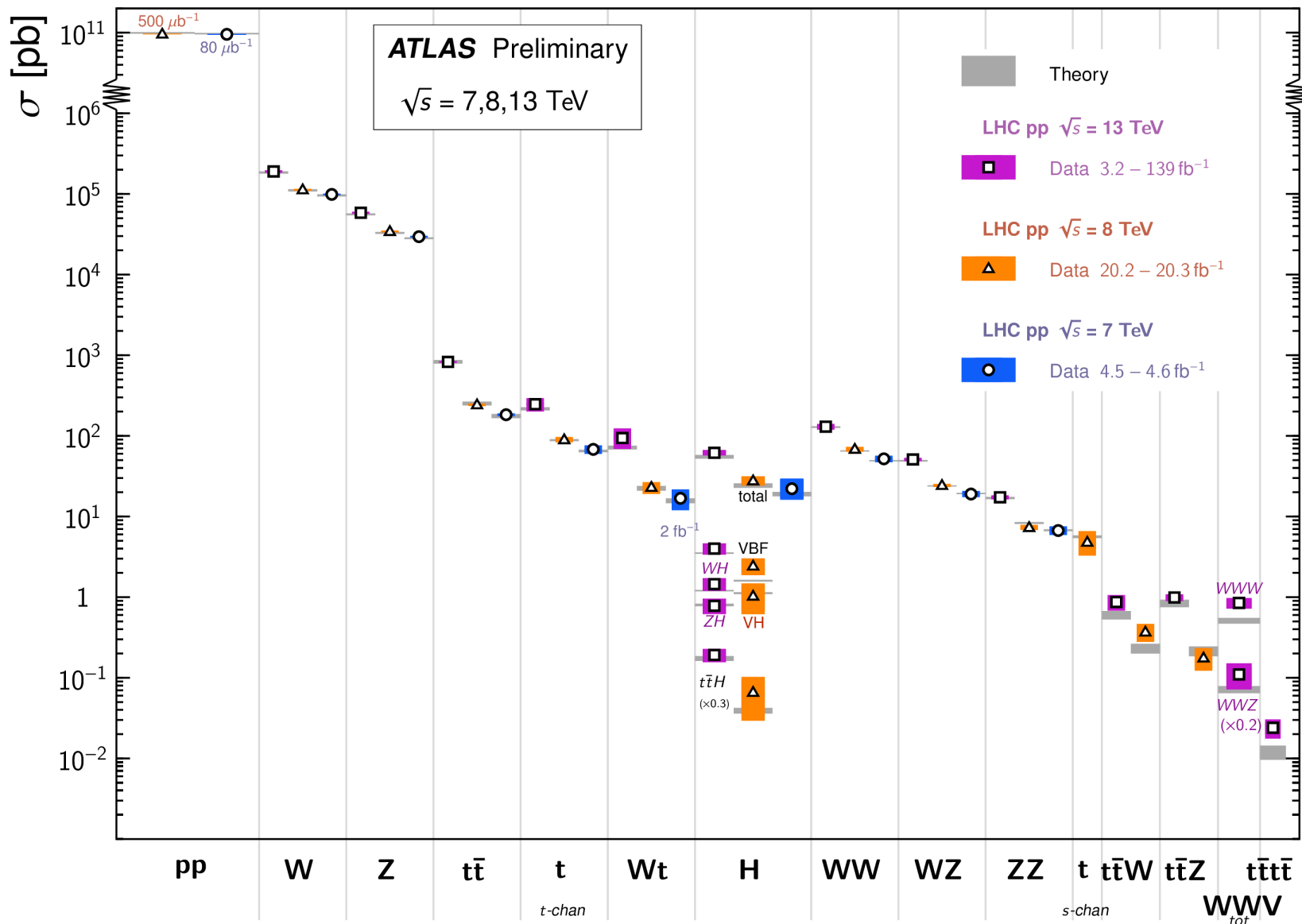




# Modèle standard : état des lieux

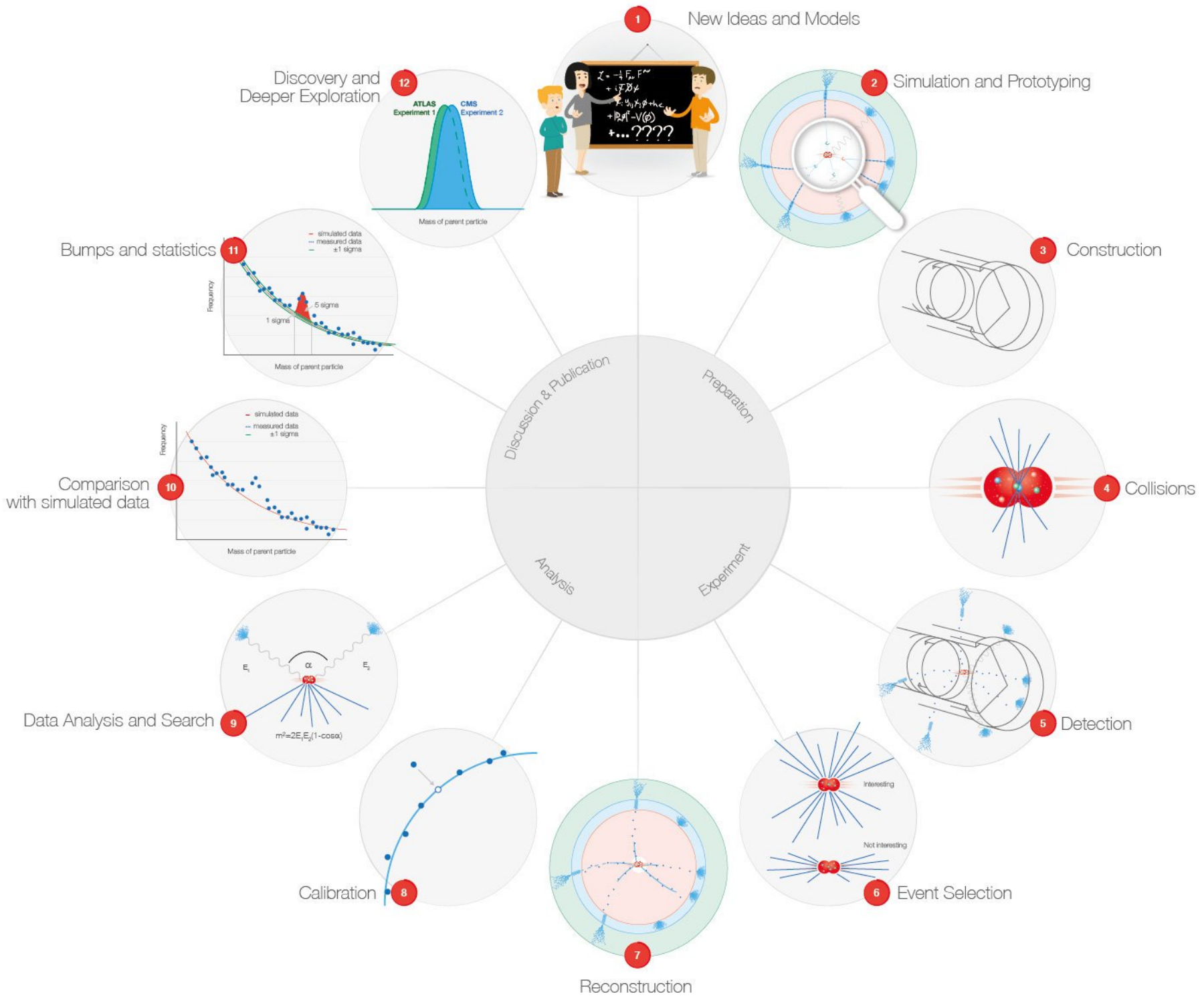
Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status: July 2021



- Très bon accord avec les prédictions théoriques !





1 New Ideas and Models

2 Simulation and Prototyping

3 Construction

4 Collisions

5 Detection

6 Event Selection

7 Reconstruction

8 Calibration

9 Data Analysis and Search

10 Comparison with simulated data

11 Bumps and statistics

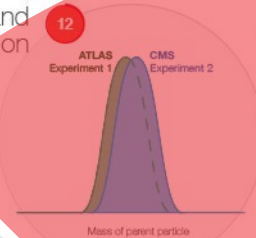
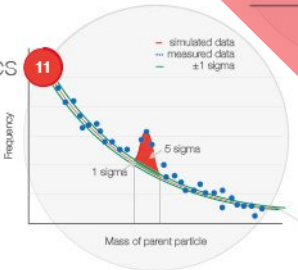
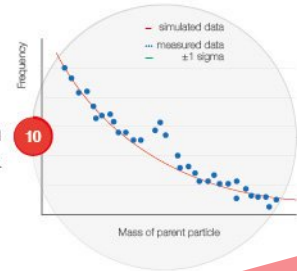
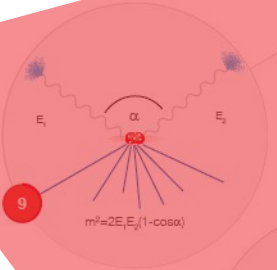
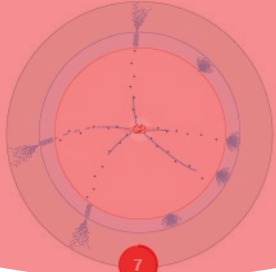
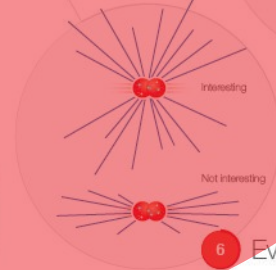
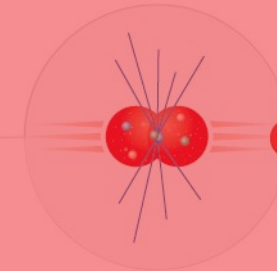
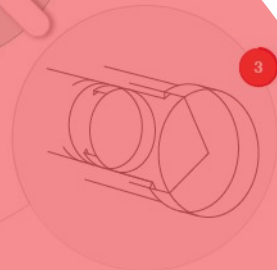
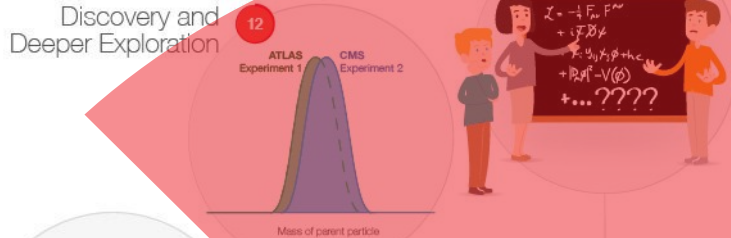
12 Discovery and Deeper Exploration

Discussion & Publication

Preparation

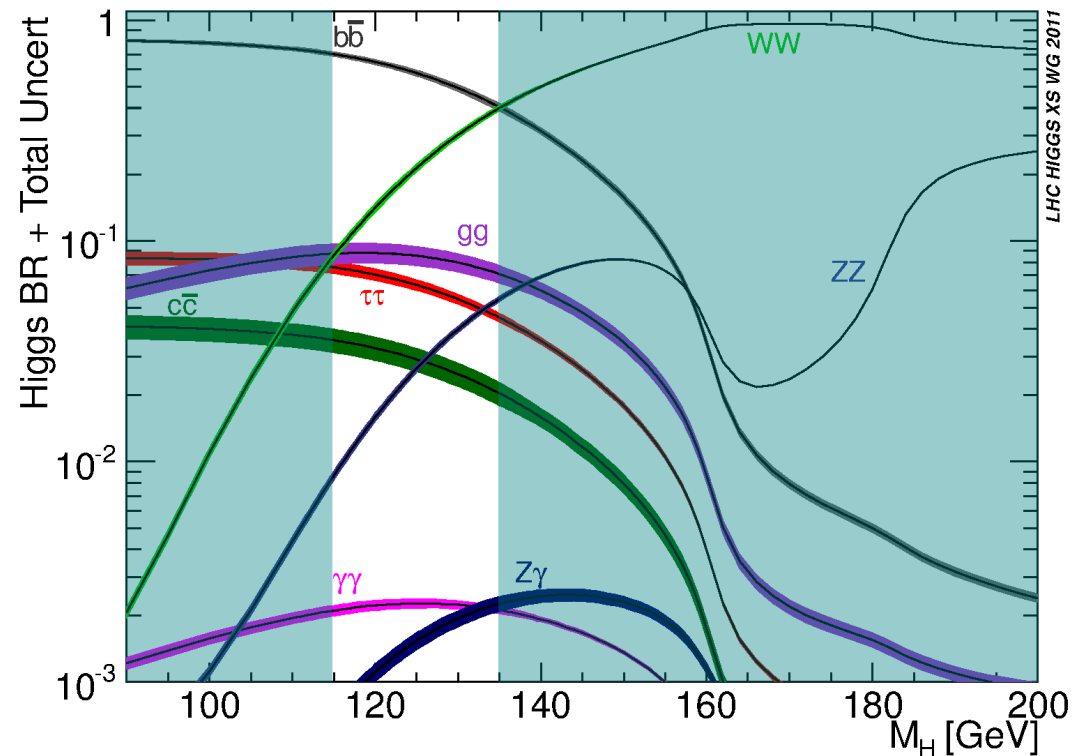
Experiment

Analysis



# Comment s'y prend-on ?

- Collision de protons  $\rightarrow (E = mc^2) \rightarrow$  création d'un boson de Higgs, une fois sur 10 milliards
- Ensuite il se désintègre, différemment suivant sa masse. Exemple à 125 GeV :
  - ▶ 58 fois sur 100 en  $b\bar{b}$
  - ▶ 21 fois sur 100 en  $WW$
  - ▶ 3 fois sur 100 en  $ZZ$
  - ▶ 2 fois sur 1000 en  $\gamma\gamma$
- Note : le plus fréquent n'est pas forcément le plus facile à observer



# Encore plus dur qu'une aiguille dans une botte de foin

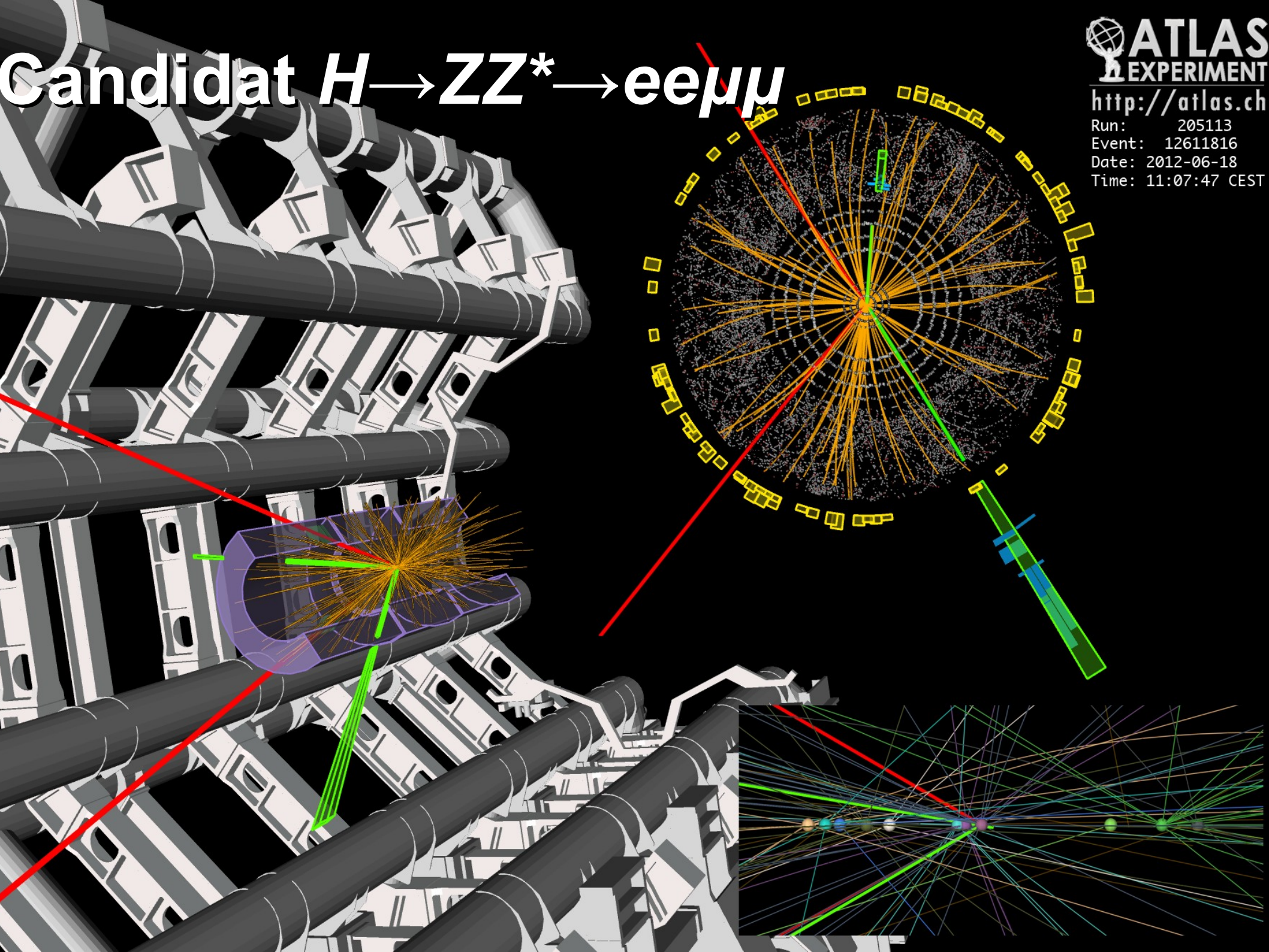
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, très difficiles à différencier de ce que l'on cherche
- Une aiguille dans une botte d'aiguilles



Candidat  $H \rightarrow \gamma\gamma$



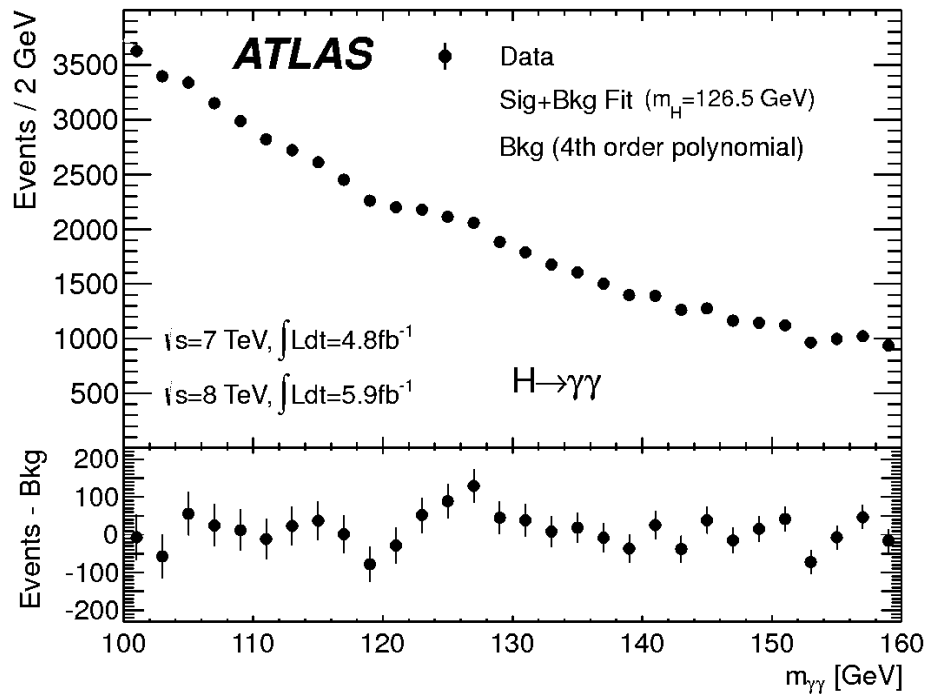
# Candidate $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow ee\mu\mu$





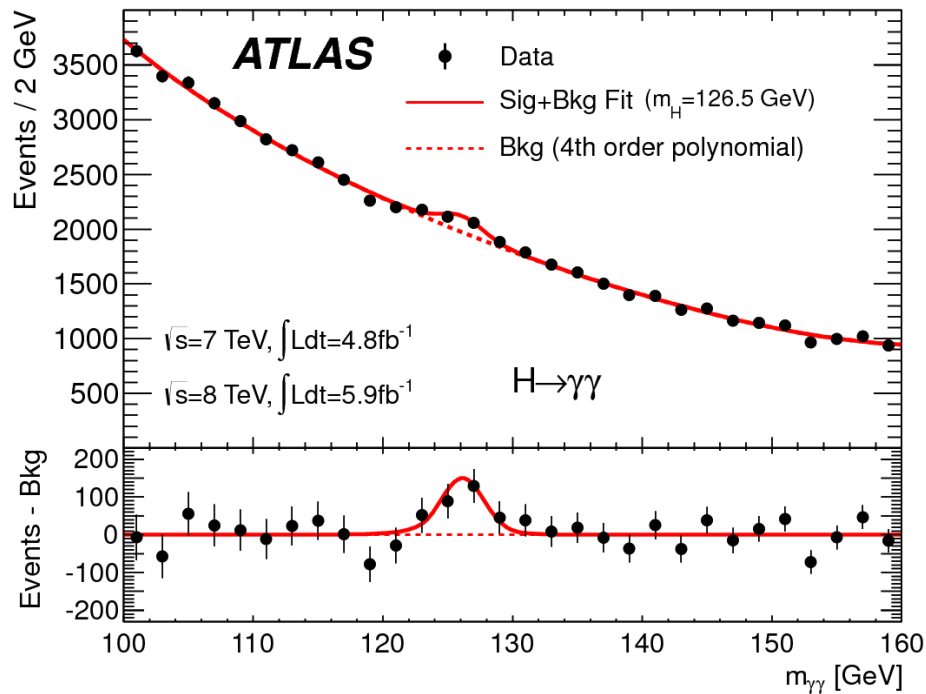
# Mesure

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



# Mesure

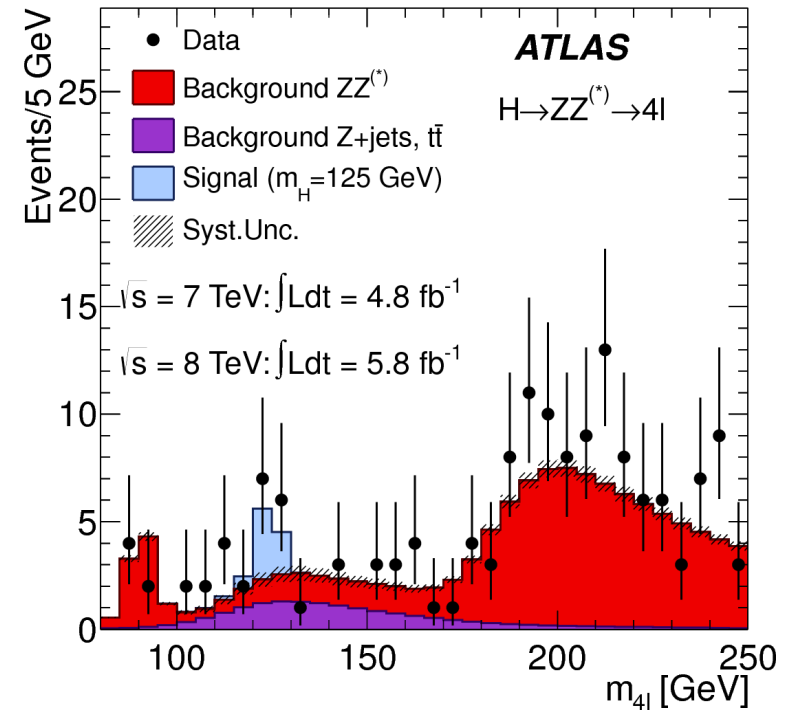
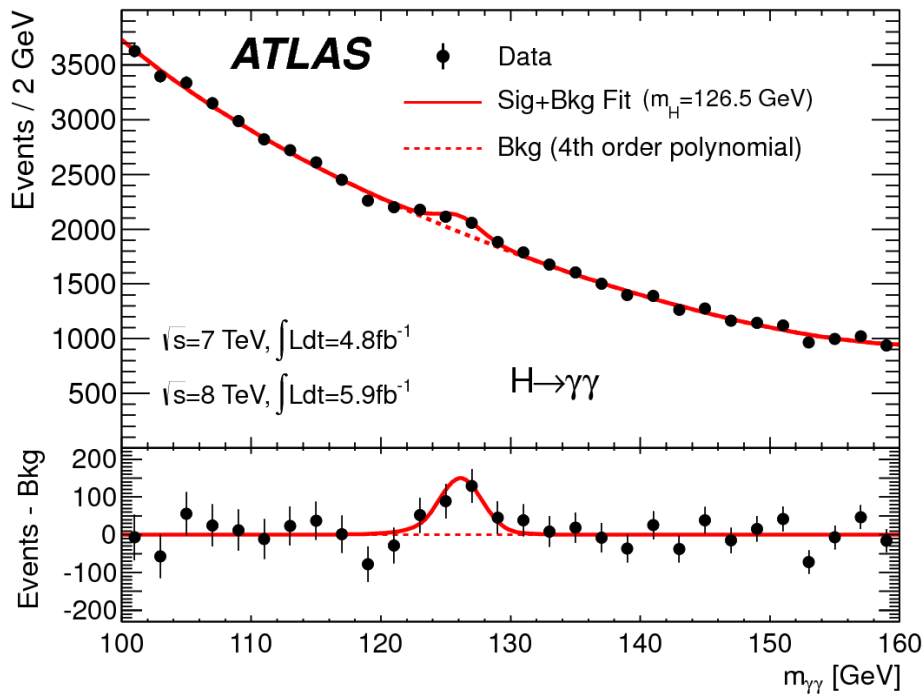
- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



# Mesure

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

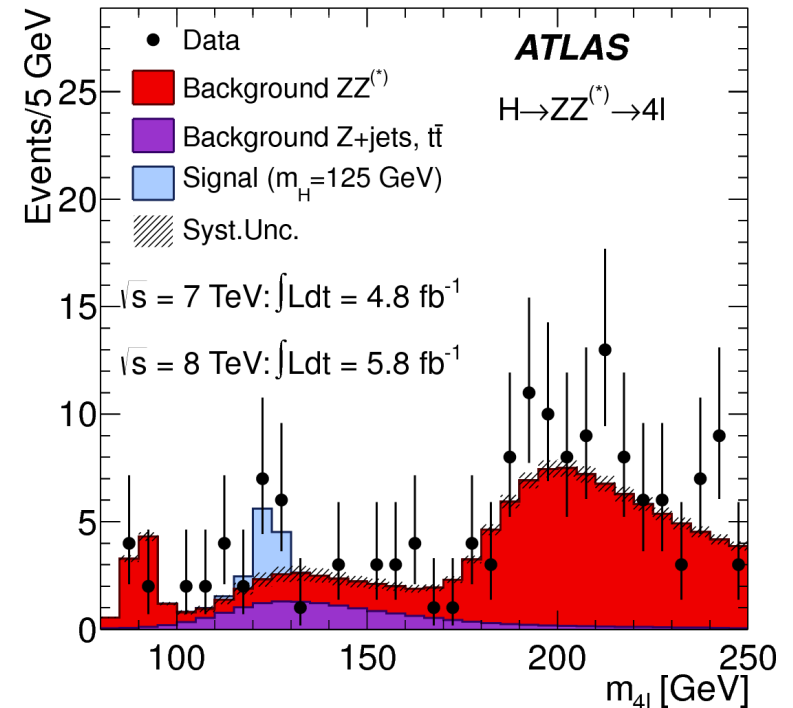
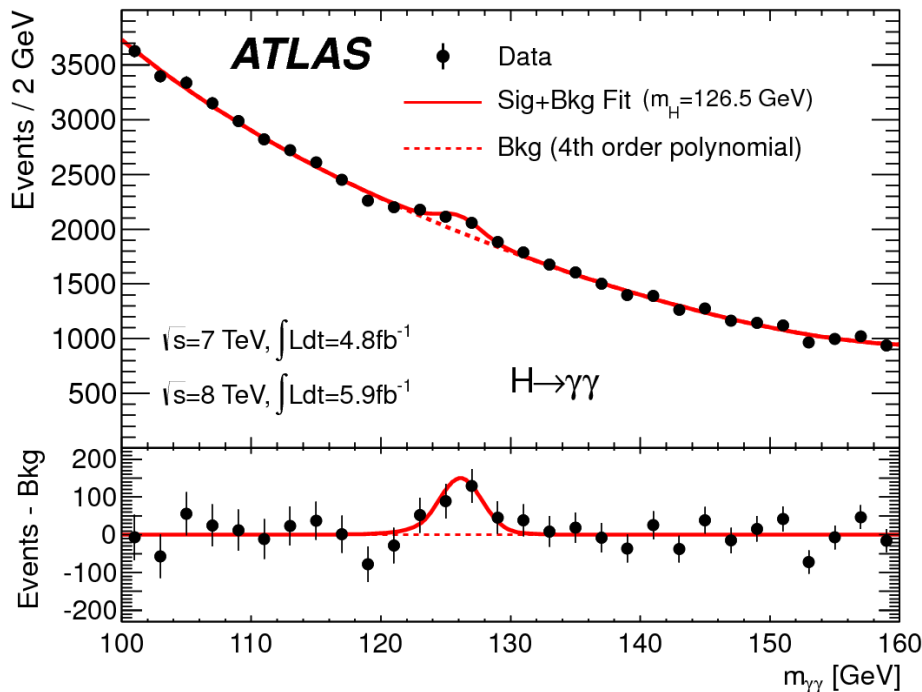
- Higgs en ZZ
  - ▶ Très peu de bruit de fond
  - ▶ Très peu d'événements



# Mesure

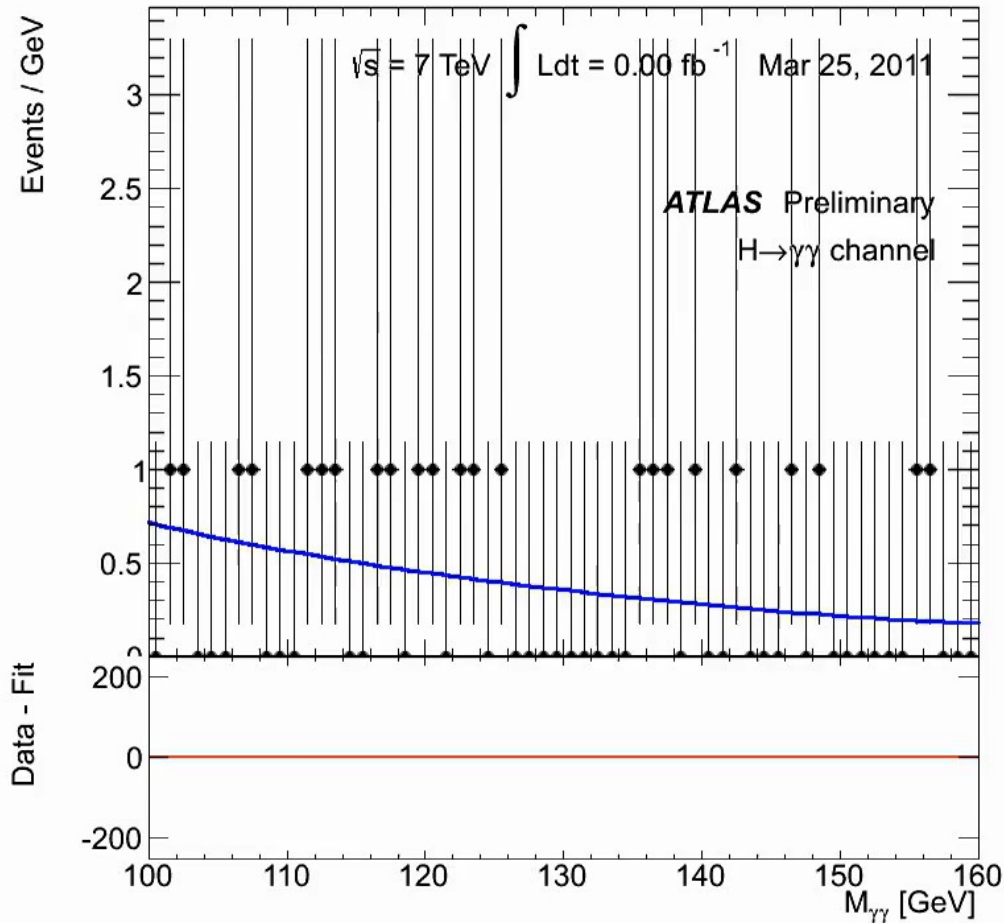
- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

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

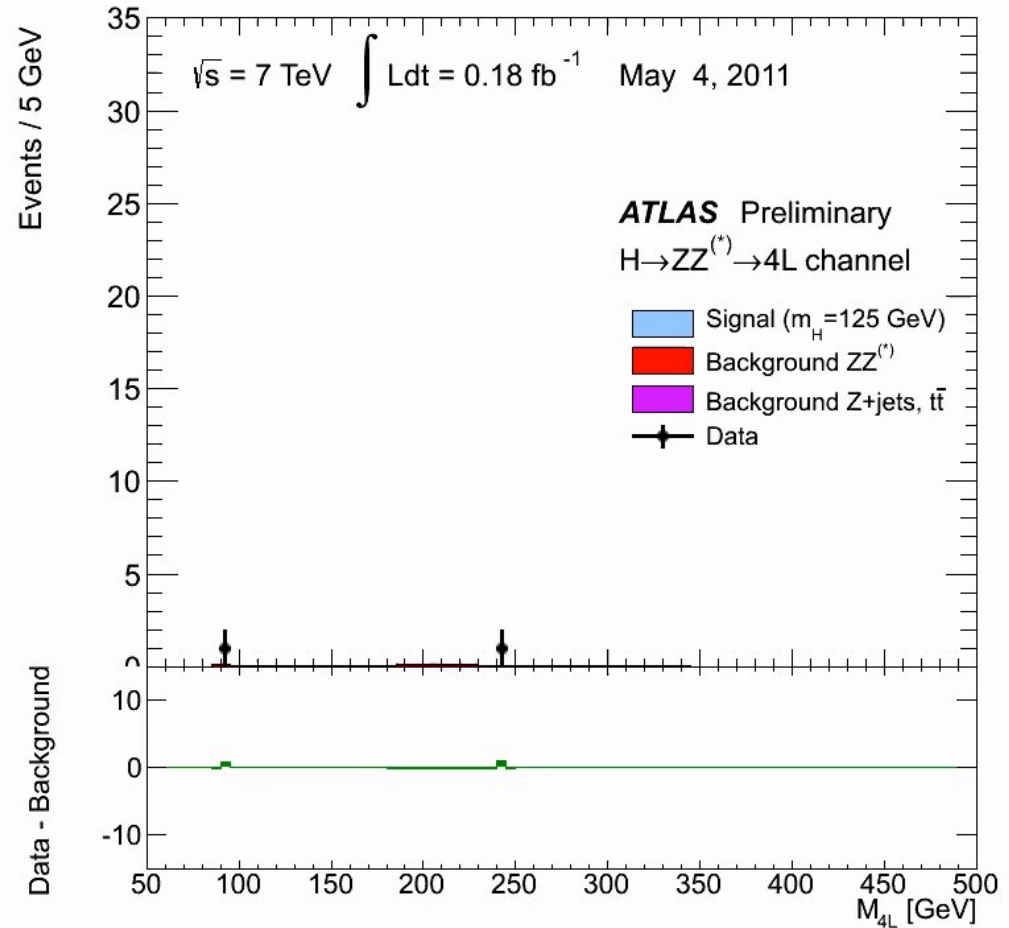


Est-ce que cela est significatif ?  
Outils statistiques pour répondre

# Évolution dans le temps (jusqu'à fin 2012)

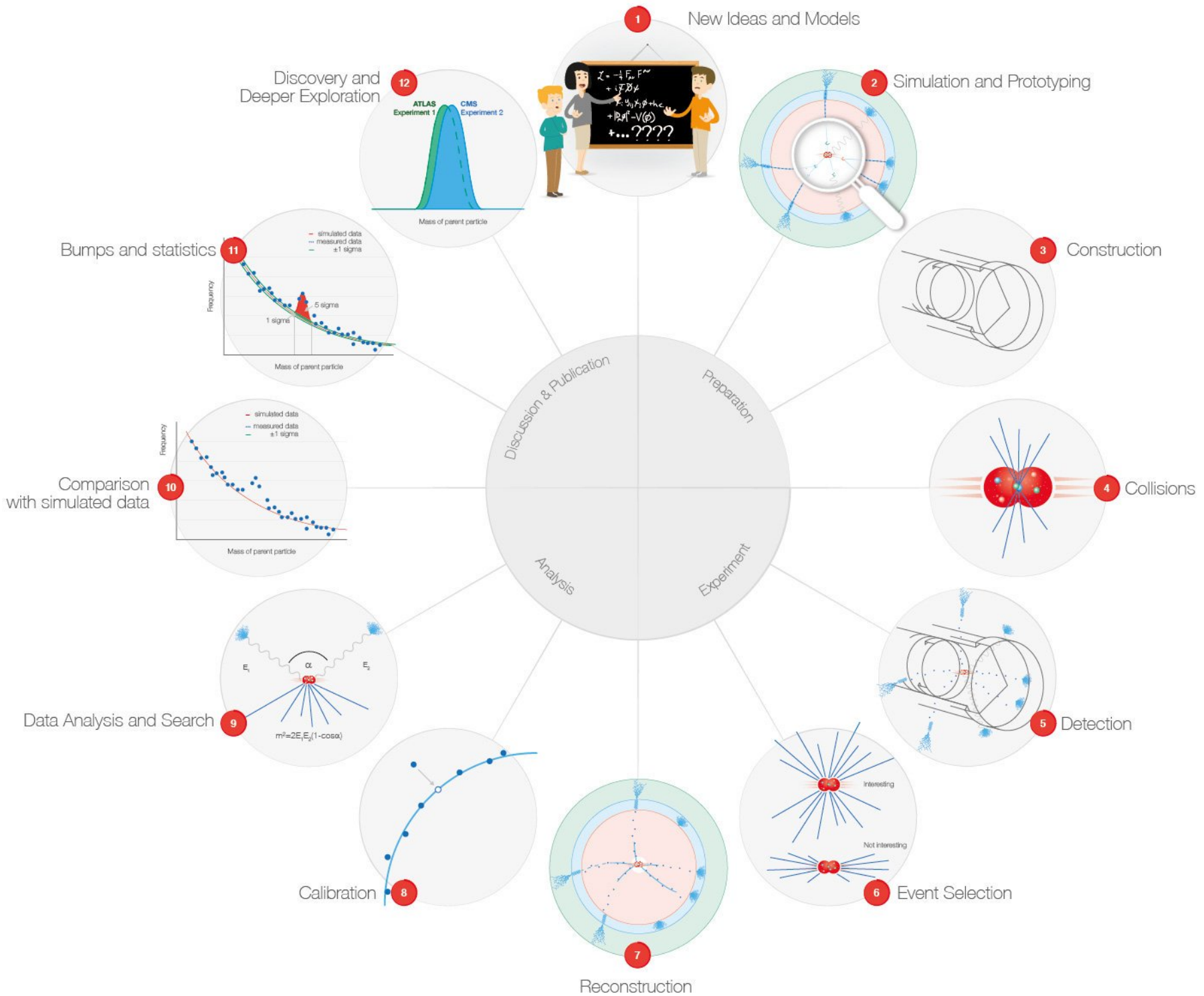


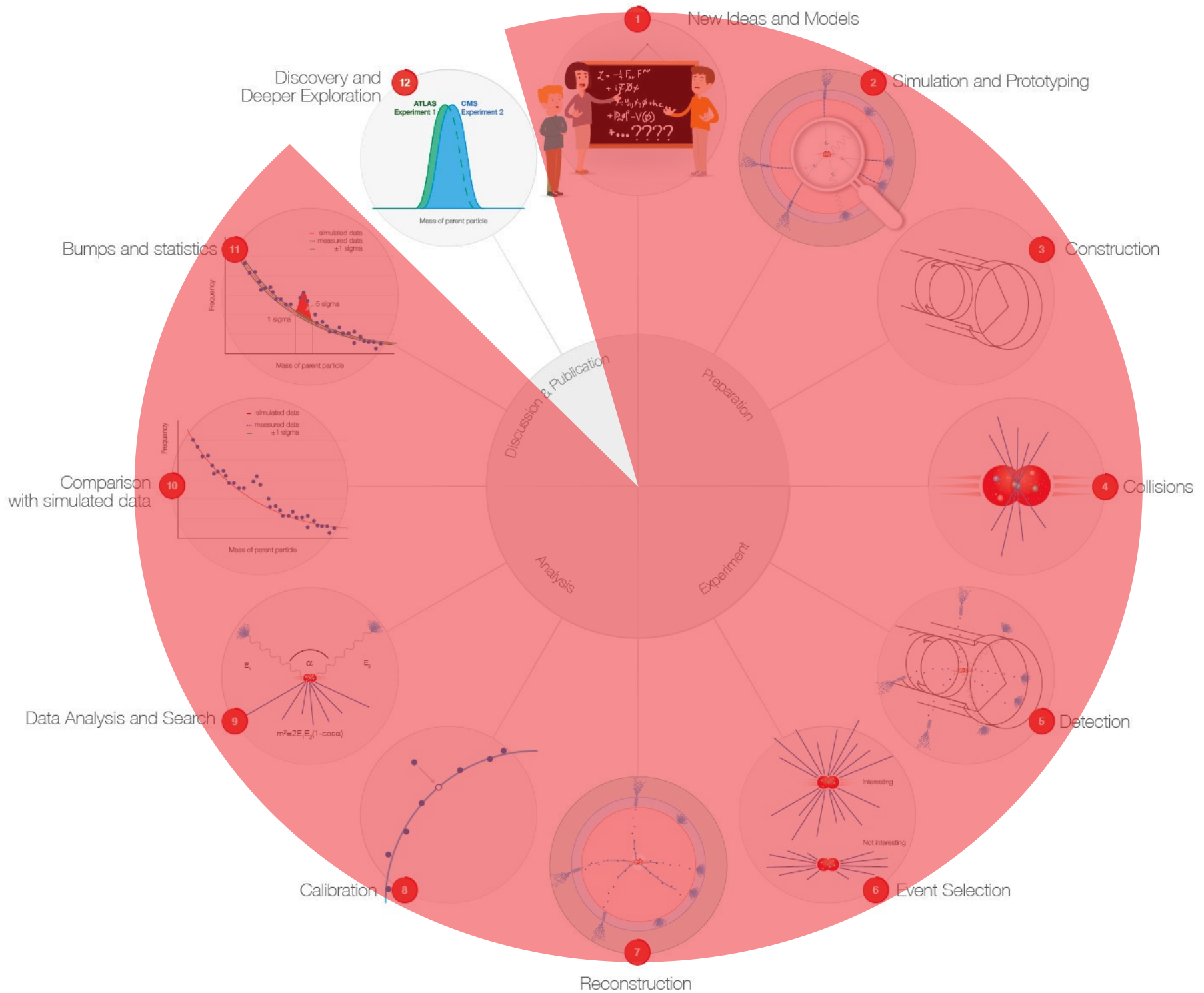
© CERN



© CERN





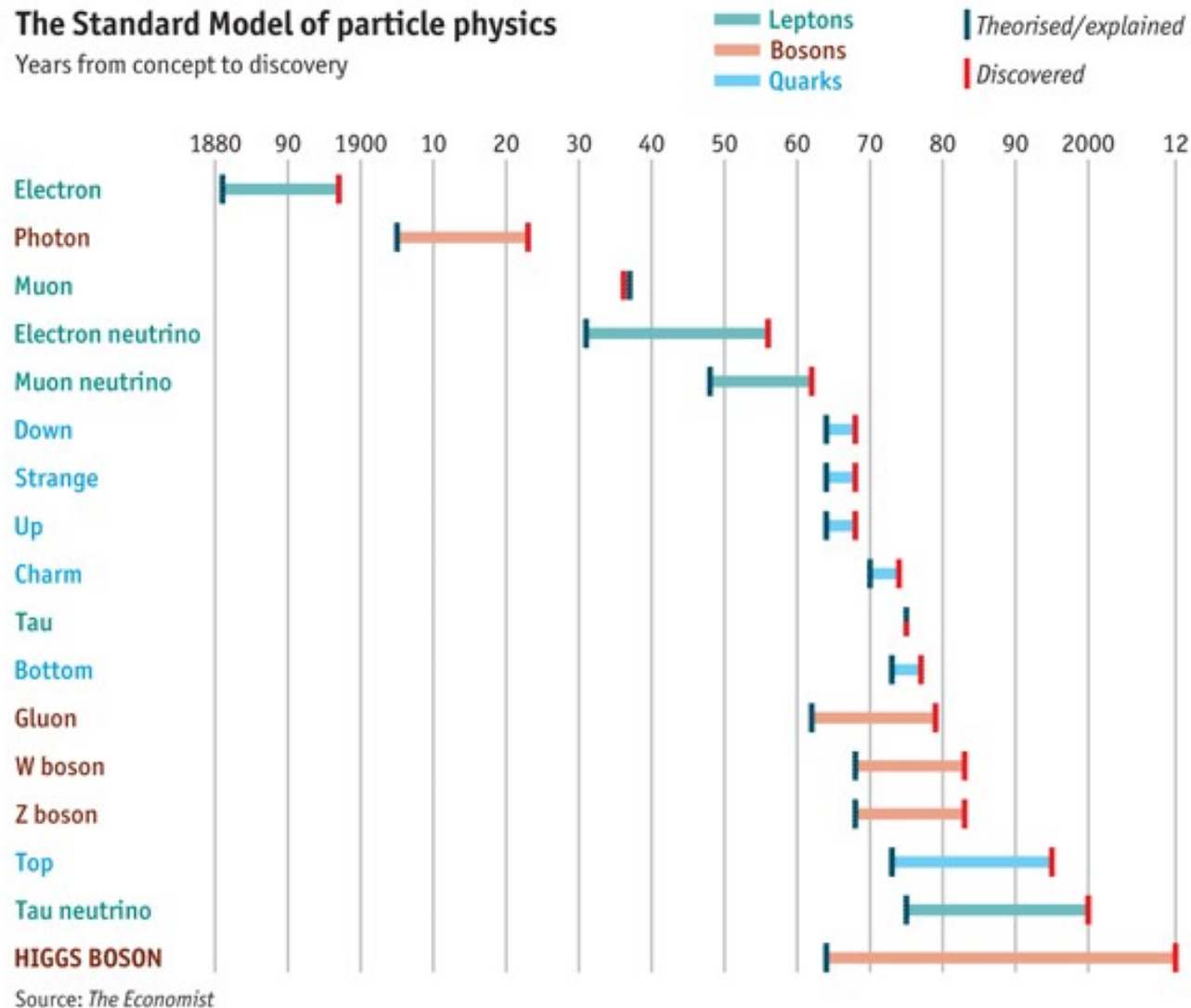


# Découverte du boson de Higgs annoncée le 4 juillet 2012





# Une longue quête

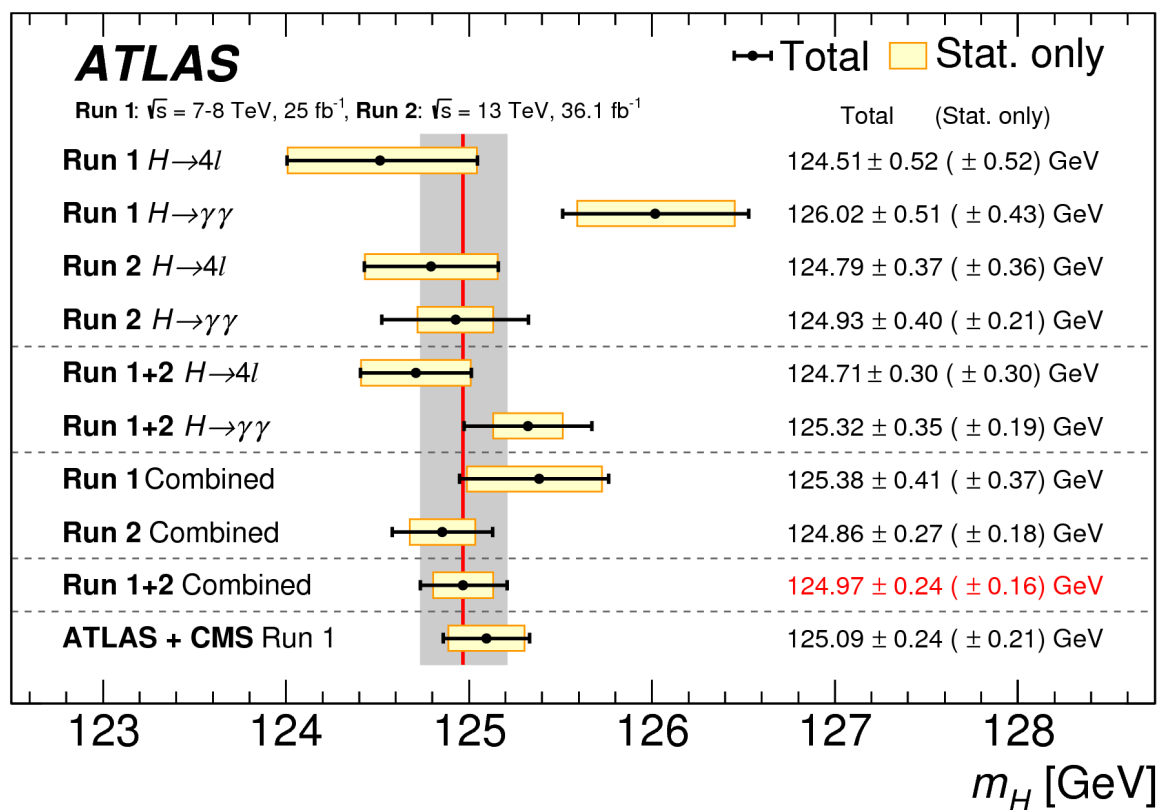


- 48 ans entre la prédiction théorique et la découverte expérimentale !

# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :

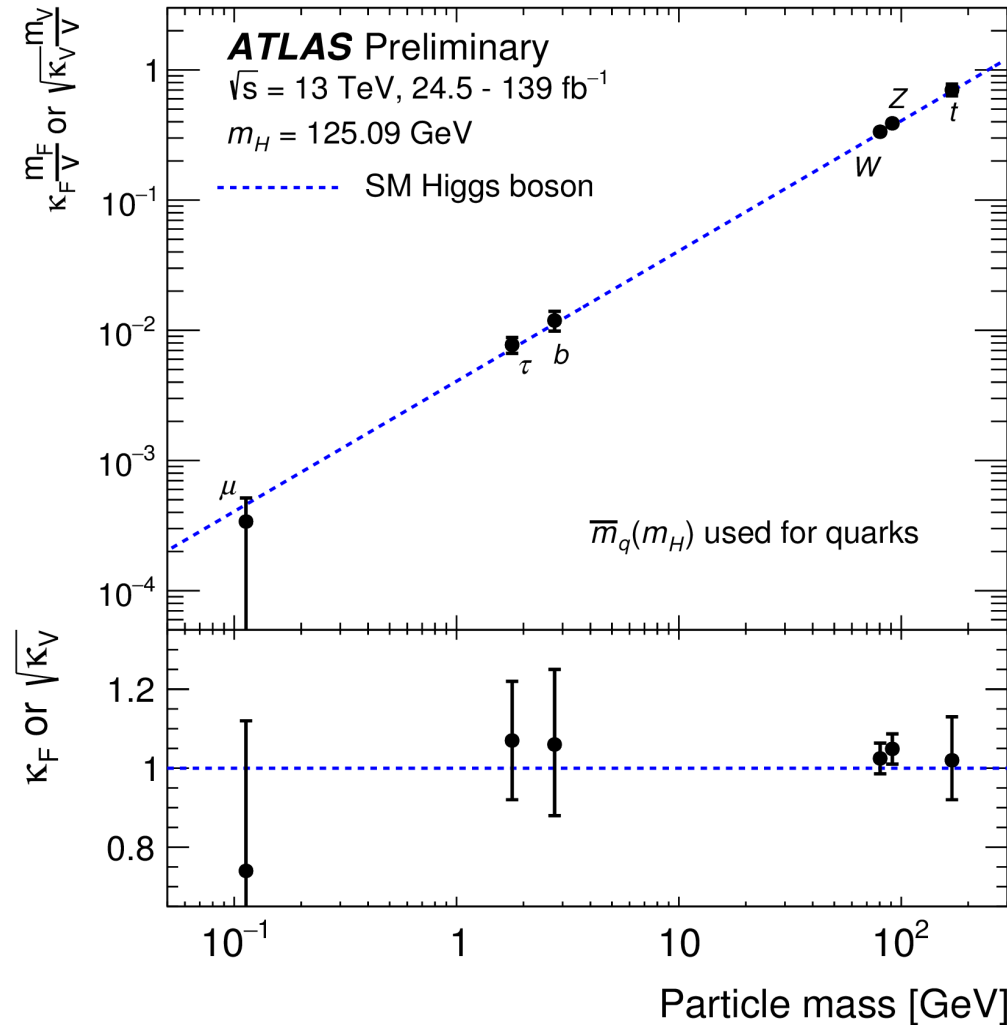
- ▶  $m_H = 125.09 \pm 0.24$  (0.21 stat.  $\pm$  0.11 syst.) GeV  
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]  
(134 fois la masse du proton)



# 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...

# Masse des particules et couplage au boson de Higgs

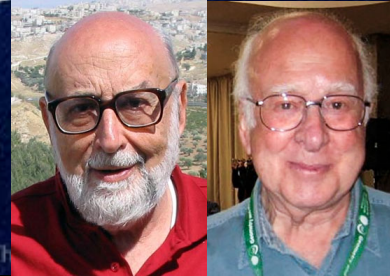


- Relation comme prévue par le modèle standard

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

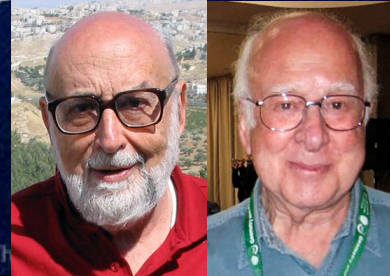


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

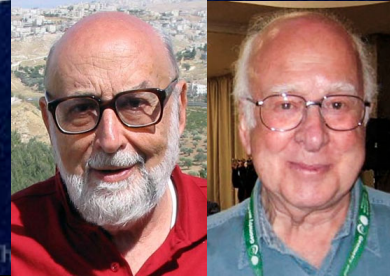


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



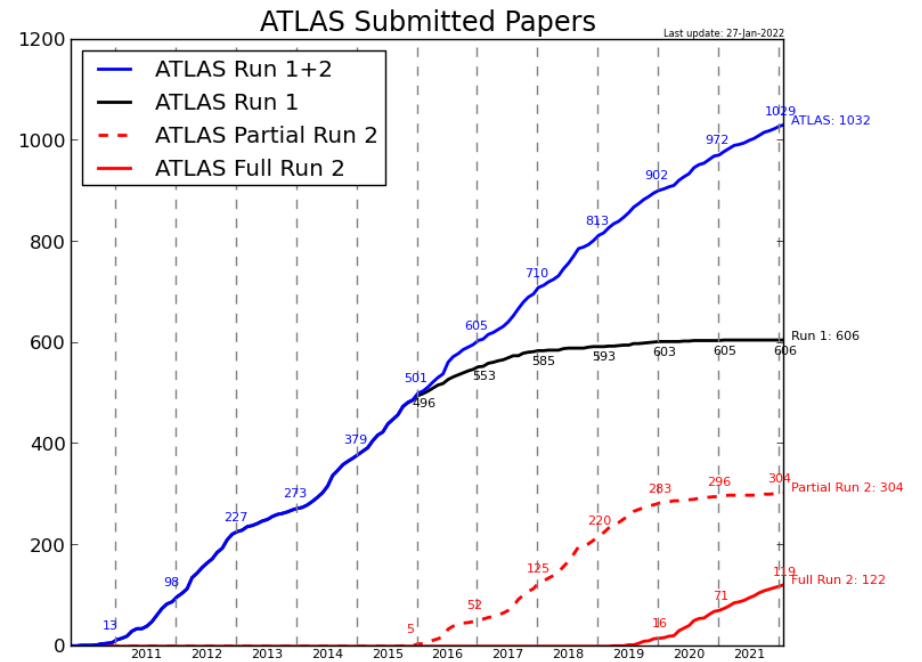
« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



**Le CERN et les expériences ATLAS & CMS**

# Publications

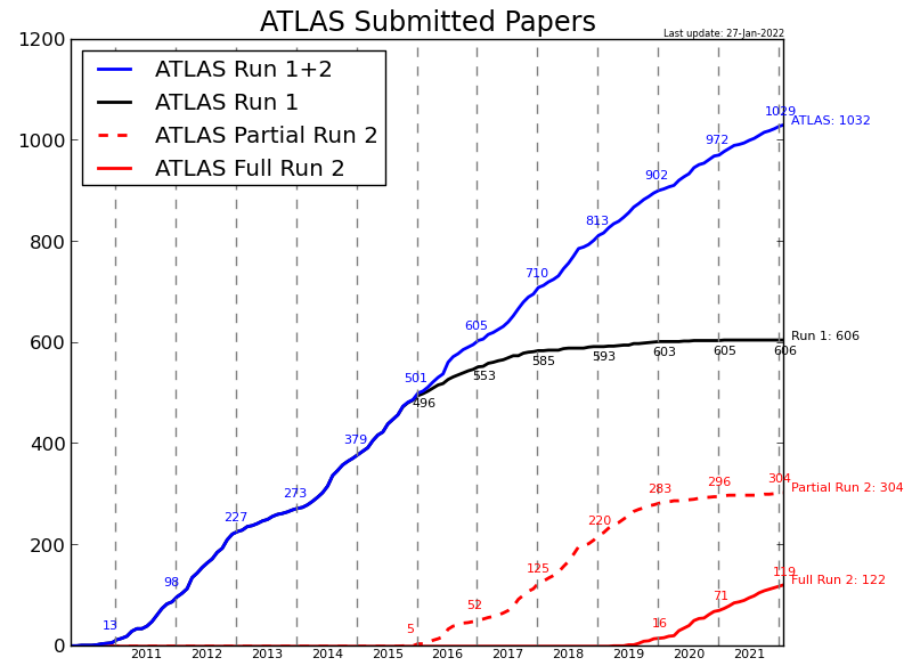
- ATLAS :
  - ▶ >1000 publications
  - ▶ >1100 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
  - ▶ > 600 publications
- ALICE :
  - ▶ > 330 publications





# Publications

- ATLAS :
  - ▶ >1000 publications
  - ▶ >1100 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
  - ▶ > 600 publications
- ALICE :
  - ▶ > 330 publications



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

**Forte pression du CERN sur les journaux :  
Open Access**



A photograph of a large, white iceberg floating in a deep blue ocean under a clear blue sky with light, wispy clouds. The iceberg is the central focus, with its jagged peaks and sharp edges clearly visible. The water is calm, reflecting the sky and the iceberg. The horizon line is straight and divides the image roughly in half.

**Ce que l'on connaît (5%)**

Ce que l'on connaît (5%)

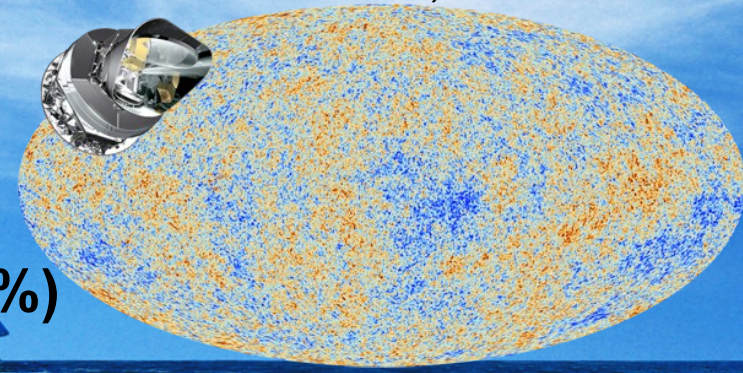
27% Matière noire

68% Énergie noire

Reste à découvrir !



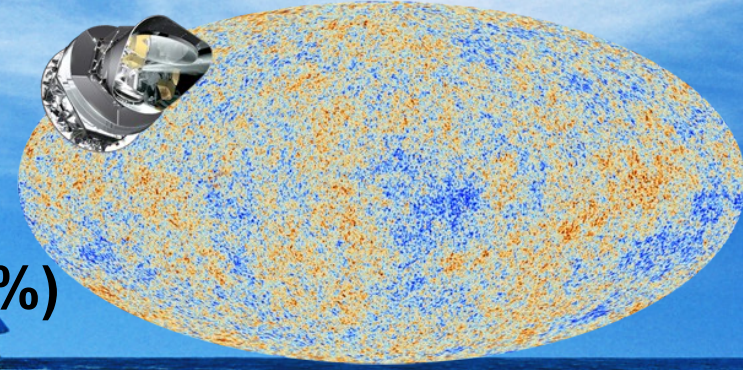
**Ce que l'on connaît (5%)**



**27% Matière noire**

**68% Énergie noire**

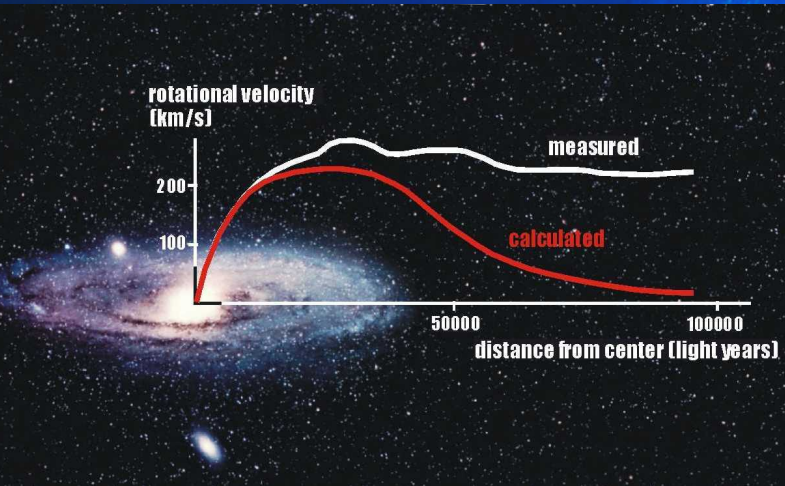
Planck, mars 2013



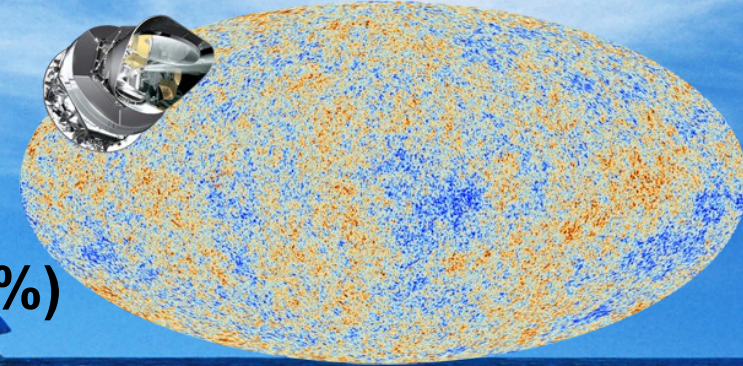
Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

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



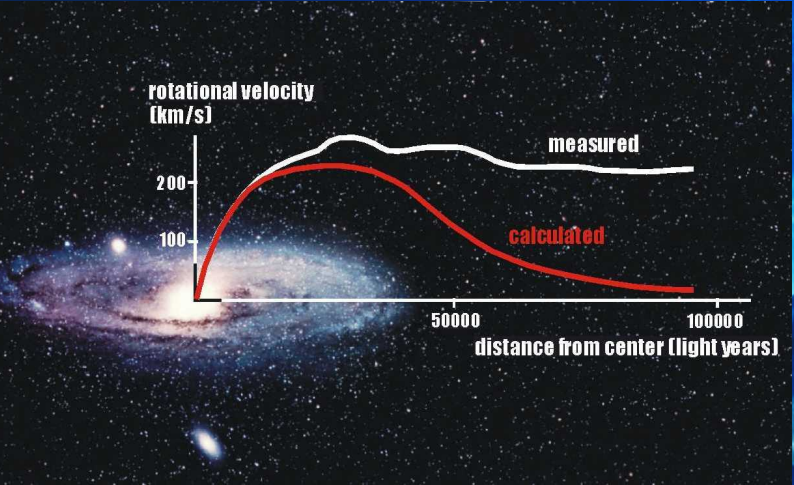
68% Énergie noire



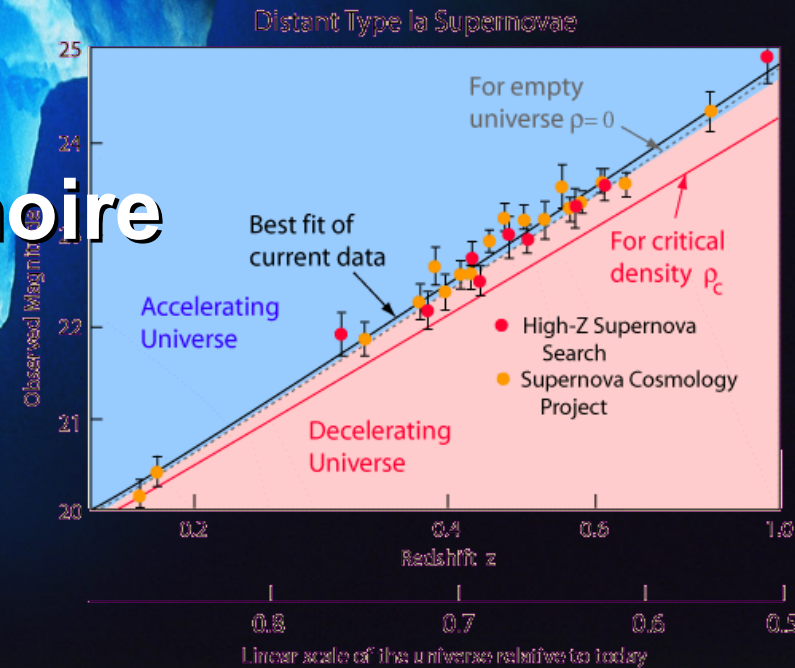
Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

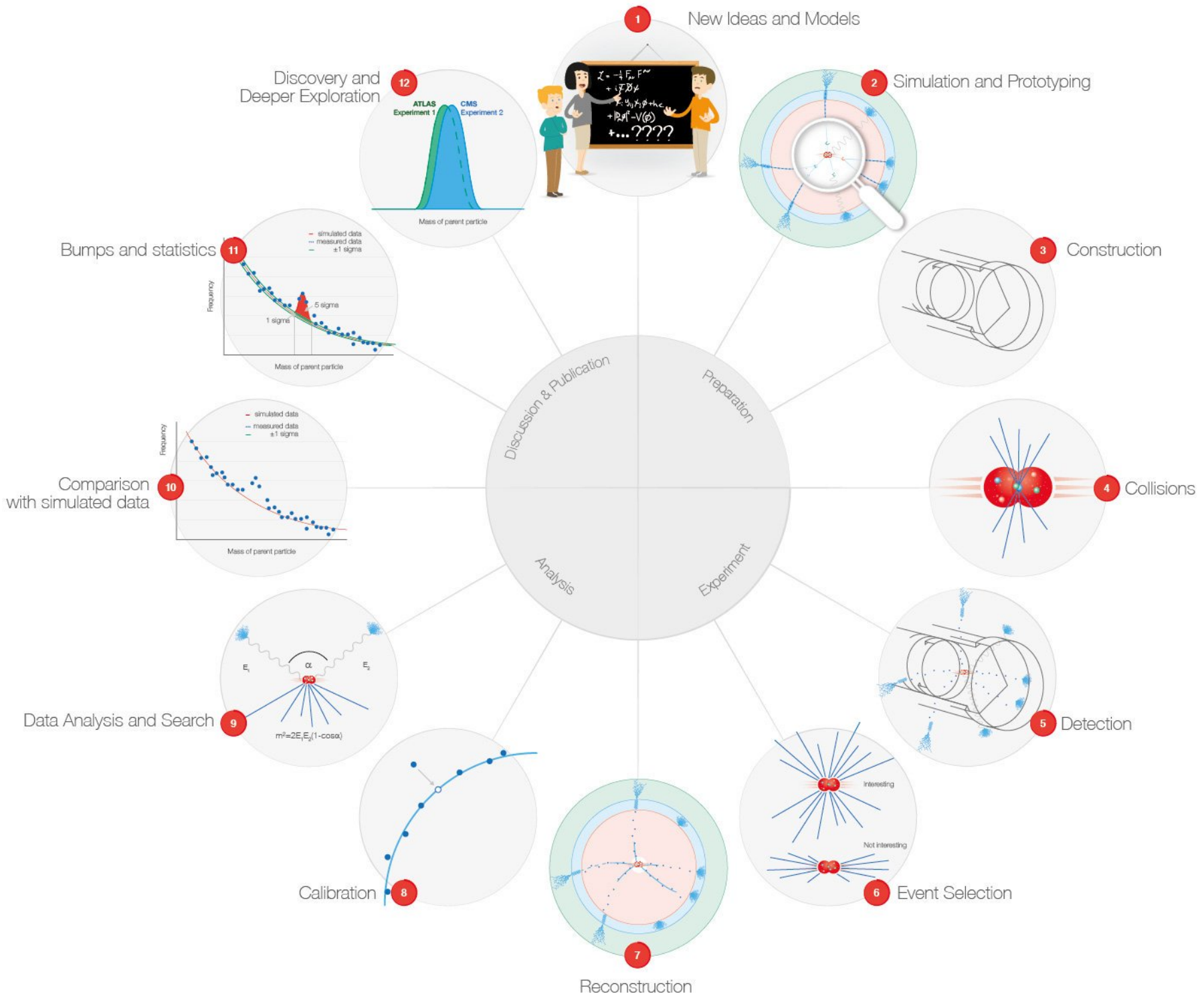
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...)?



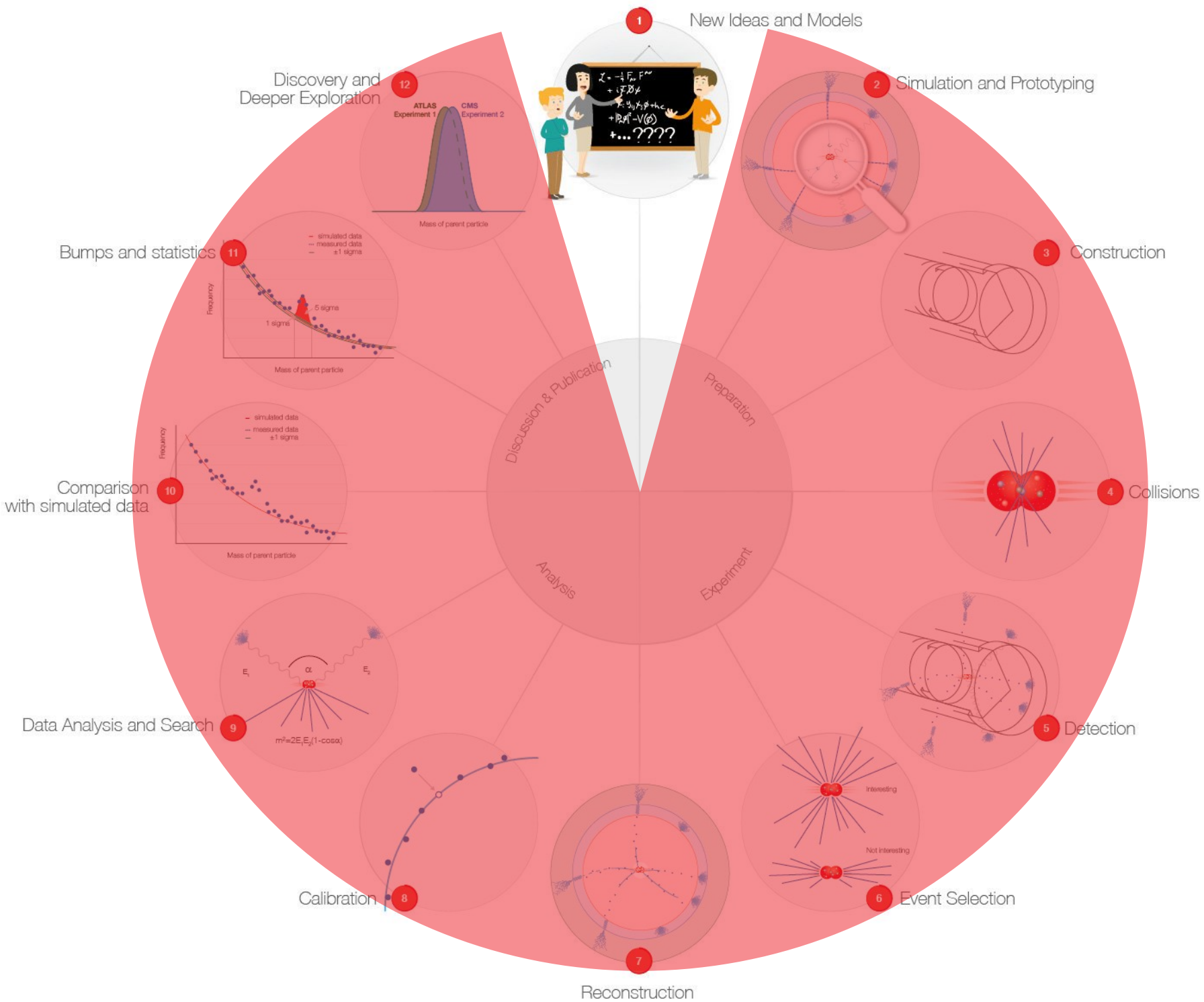
68% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !

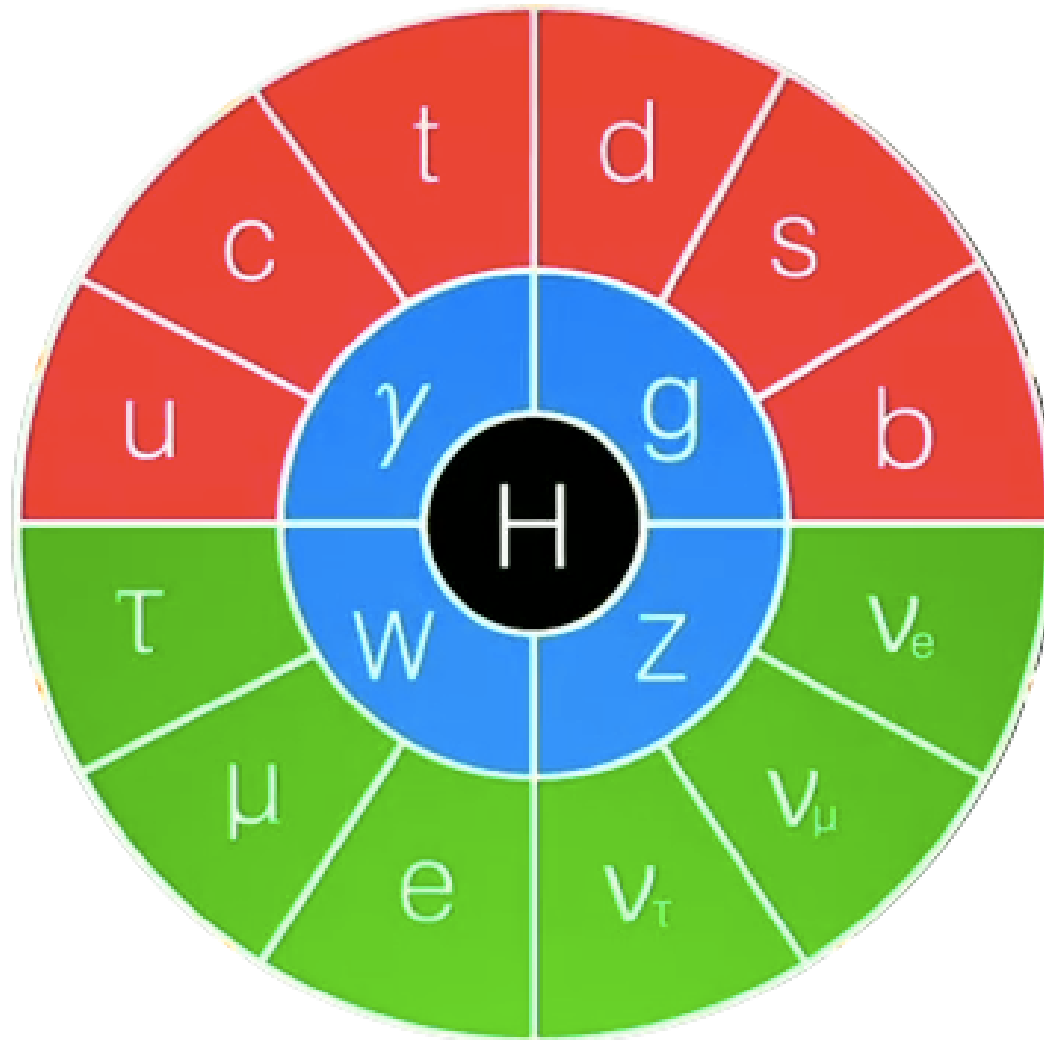






# Autres théories

- 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

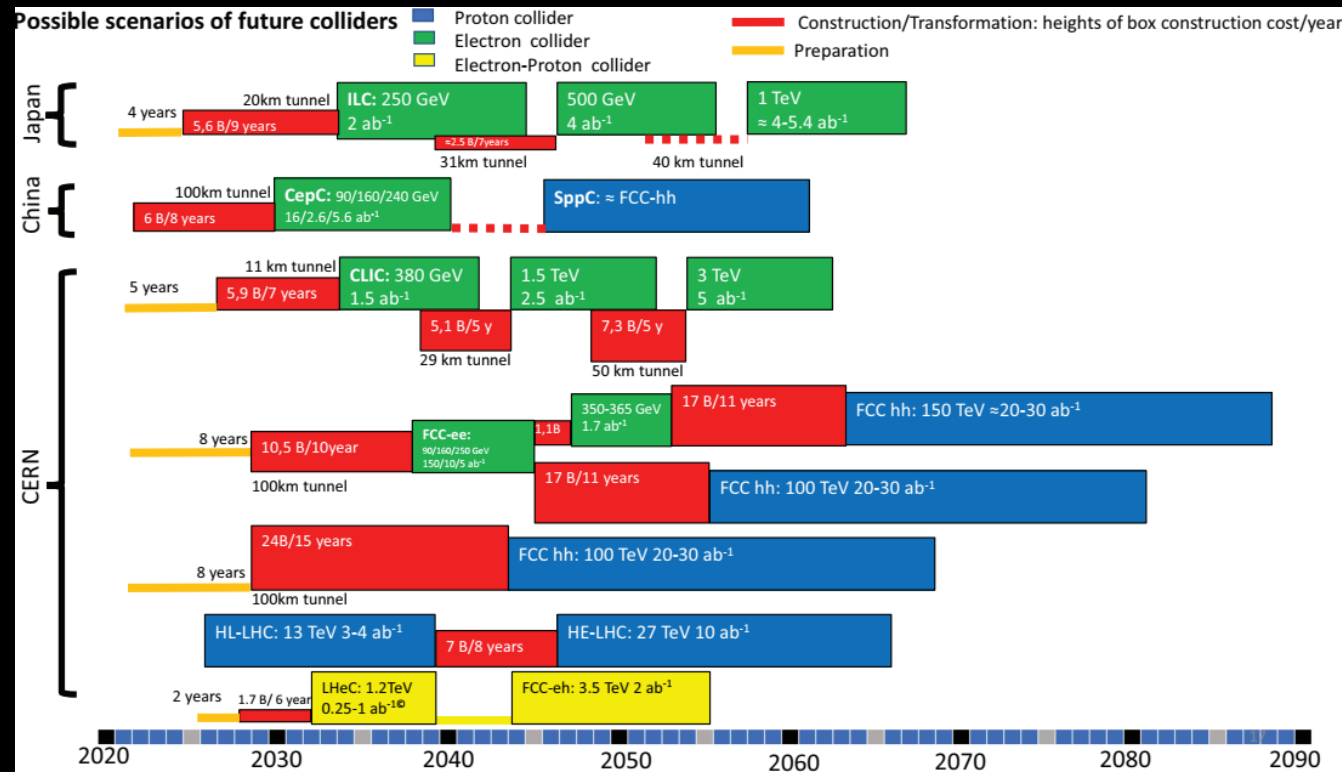
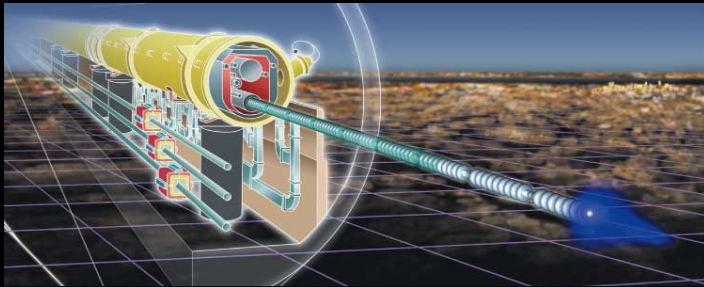
- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

## **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 ?



- **Future Circular Collider (FCC)**

Circumference: 90 - 100 km  
 Energy: 100 TeV (pp) 90-350 GeV ( $e^+e^-$ )

- **Circular Electron Positron Collider (CEPC), Chine**

- **Large Hadron Collider (LHC)**

- **Large Electron-Positron Collider (LEP)**

Circumference: 27 km  
 Energy: 14 TeV (pp) 209 GeV ( $e^+e^-$ )

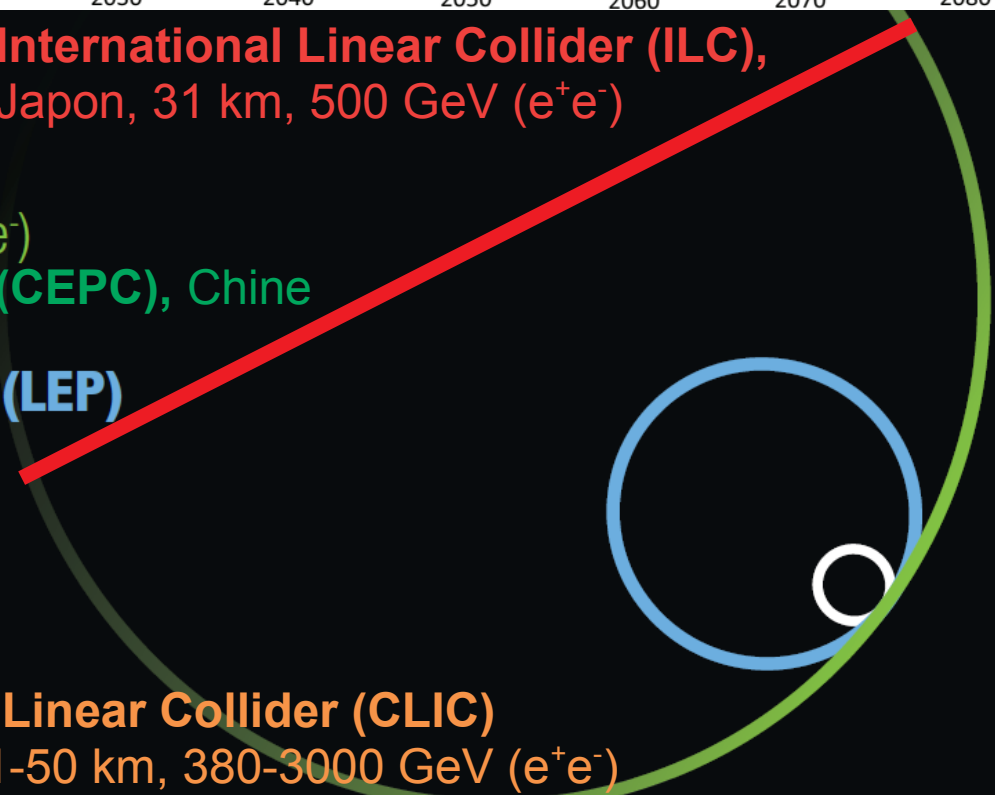
- **Tevatron**

Circumference: 6.2 km  
 Energy: 2 TeV ( $p\bar{p}$ )

- **International Linear Collider (ILC), Japon, 31 km, 500 GeV ( $e^+e^-$ )**

- **Compact Linear Collider (CLIC)**

CERN, 11-50 km, 380-3000 GeV ( $e^+e^-$ )



# Liens

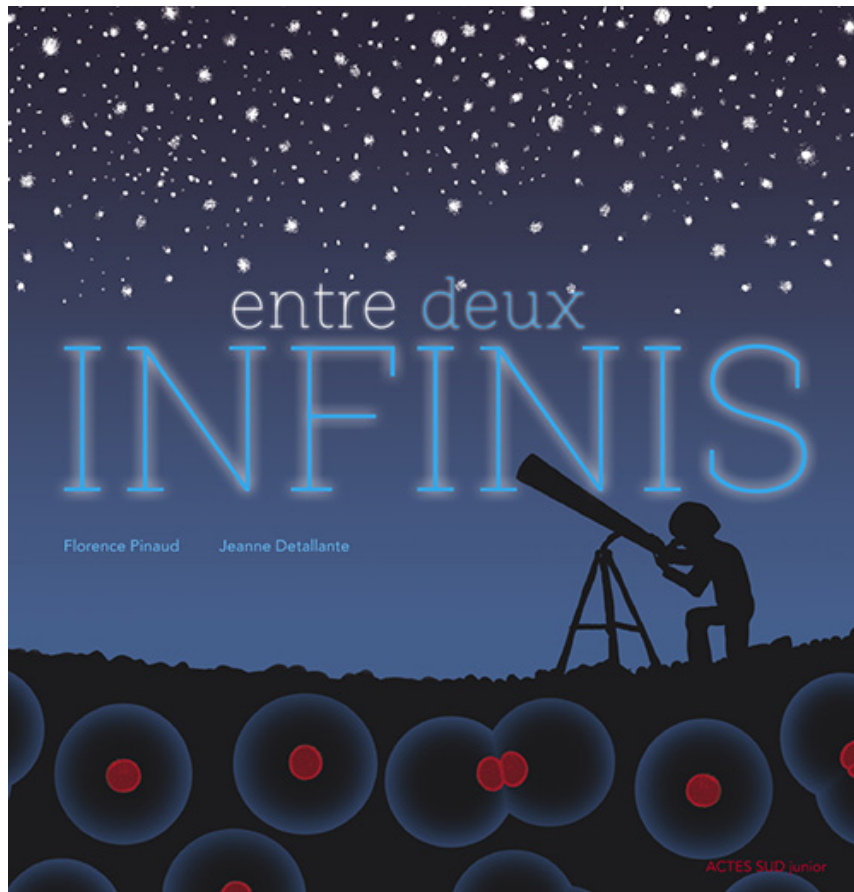
ATLAS@home		<a href="https://atlasathome.cern.ch">atlasathome.cern.ch</a>
ATLAS grand public		<a href="https://atlas.cern">atlas.cern</a>
ATLAS en direct		<a href="https://atlas-live.cern.ch">atlas-live.cern.ch</a>
ATLAS sur		<a href="https://twitter.com/ATLASexperiment">twitter.com/ATLASexperiment</a>
ATLAS sur		<a href="https://www.facebook.com/ATLASexperiment">www.facebook.com/ATLASexperiment</a>
ATLAS sur		<a href="https://www.instagram.com/atlasexperiment">www.instagram.com/atlasexperiment</a>
ATLAS sur		<a href="https://www.youtube.com/theATLASExperiment">www.youtube.com/theATLASExperiment</a>
ATLAS sur		<a href="https://www.tiktok.com/@atlasexperiment">www.tiktok.com/@atlasexperiment</a>
Site français du		<a href="https://www.lhc-france.fr">www.lhc-france.fr</a>
Le CPPM		<a href="https://www.cppm.in2p3.fr">www.cppm.in2p3.fr</a>
Le CERN		 <a href="https://twitter.com/cppmluminy">twitter.com/cppmluminy</a>
Le CERN sur		 <a href="https://twitter.com/cern">twitter.com/cern</a>
«Nouvelle» affiche du SM		<a href="https://www.particuleselementaires.fr">www.particuleselementaires.fr</a>

# Livre à partir de 10 ans

## Entre deux infinis

FLORENCE PINAUD

JEANNE DETALLANTE - ILLUSTRATEUR



Dans l'univers, il y a l'infiniment grand : planètes, étoiles, galaxies, trous noirs... Un monde dont on ne connaît qu'une minuscule partie et où l'on compte en années-lumière. Et il y a l'infiniment petit : molécules, cellules, particules élémentaires, quarks... Un autre monde que l'on n'a pas fini non plus de découvrir. Et moi dans tout ça... ? Un livre pour aider à comprendre la complexité de l'univers.

Actes Sud Junior

Hors collection

Avril 2019 / 23,0 x 23,0 / 56 pages

ISBN 978-2-330-12102-0

prix indicatif : 15, 90€

> [Où trouver ce livre ?](#)



<https://www.actes-sud.fr/node/68092>