

# La physique des particules

Yann Coadou

Décembre 2024

Centre de physique  
des particules  
de Marseille.

*Un laboratoire au  
cœur de l'Univers  
et de la matière*



run: 304431 event: 2206548301  
2016-07-25 07:01:07

cnrs

amu

Aix

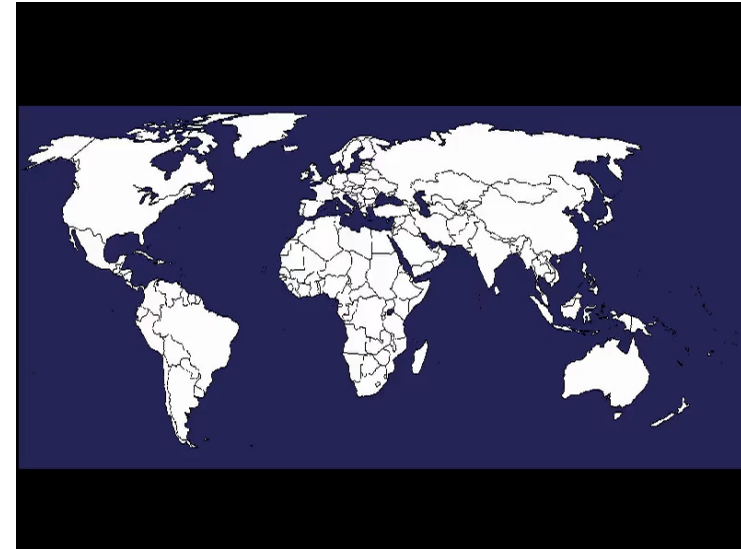
Marseille

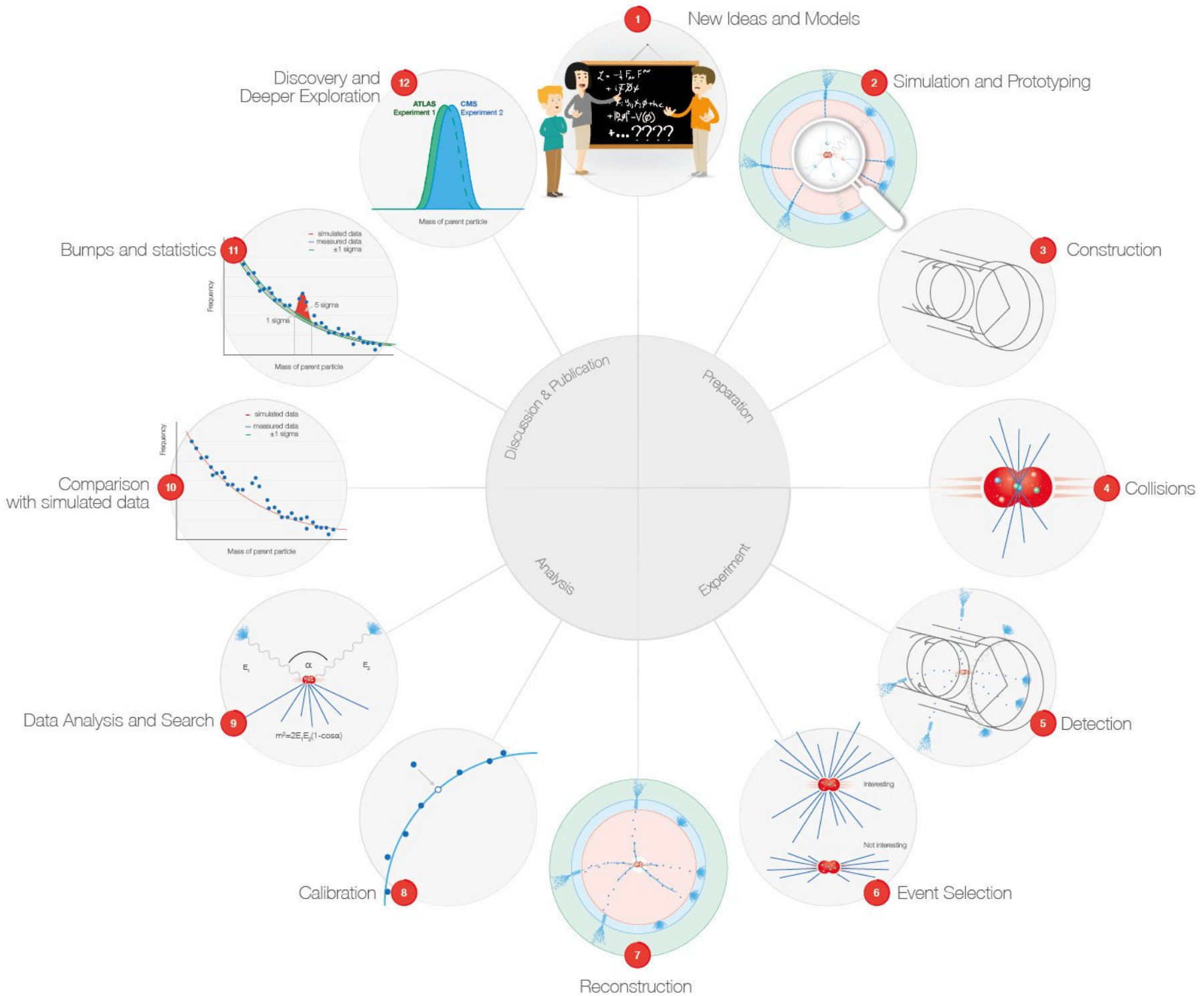
Université

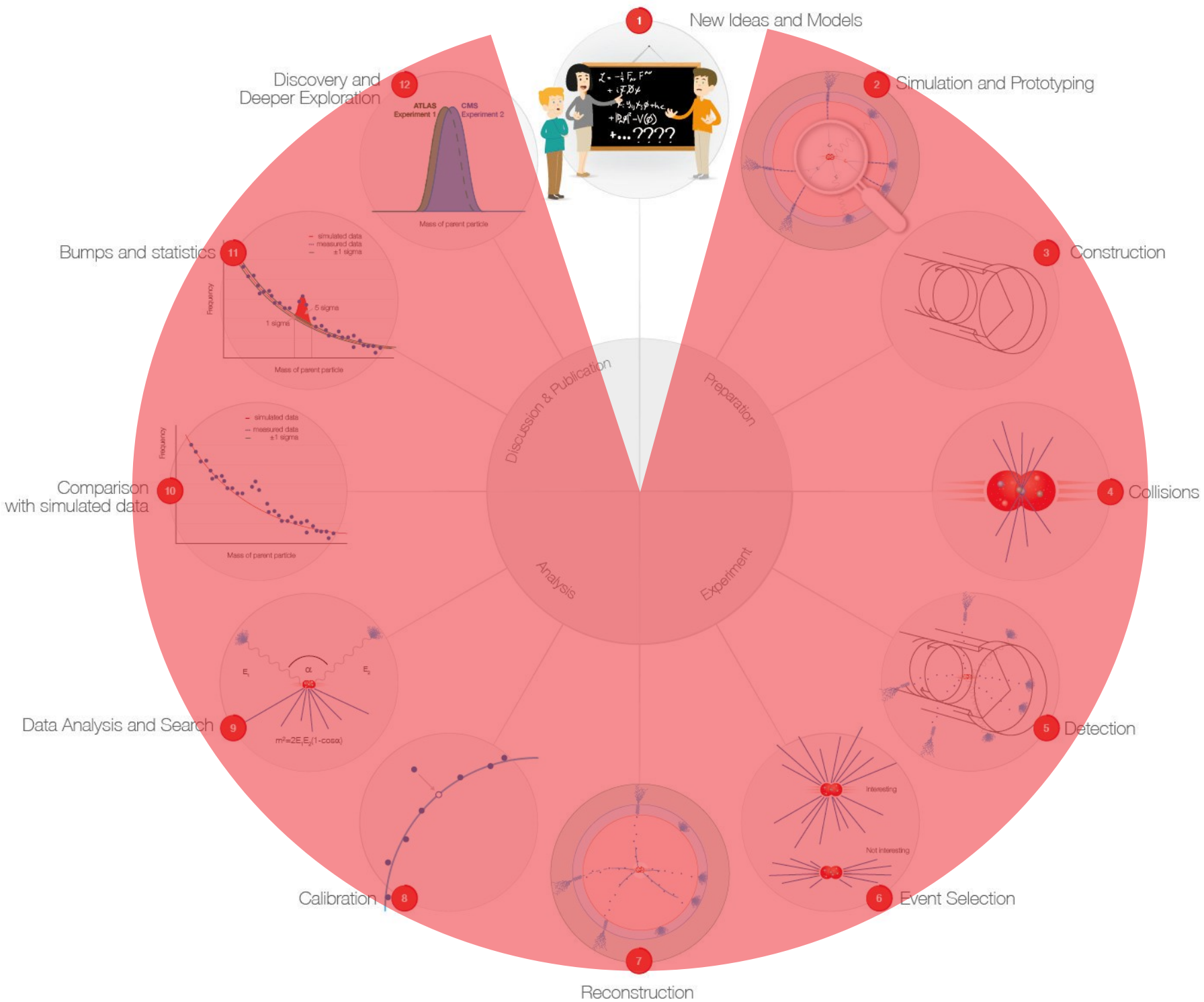


# Yann Coadou

- Chercheur au CPPM (IN2P3/CNRS) depuis octobre 2009 sur ATLAS et 2023 sur DarkSide
- Avant ça :
  - ▶ Classes préparatoires à Orléans
  - ▶ Double diplôme Ecole Centrale Paris/Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Stockholm, Suède
  - ▶ Projet de fin d'études sur ATLAS au Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Californie
  - ▶ Doctorat sur ATLAS et D0, université d'Uppsala, Suède (basé un an et demi à Chicago, USA)
  - ▶ Postdoctorat dans D0, Simon Fraser University, Vancouver, Canada
  - ▶ CERN fellow dans ATLAS, Genève, Suisse

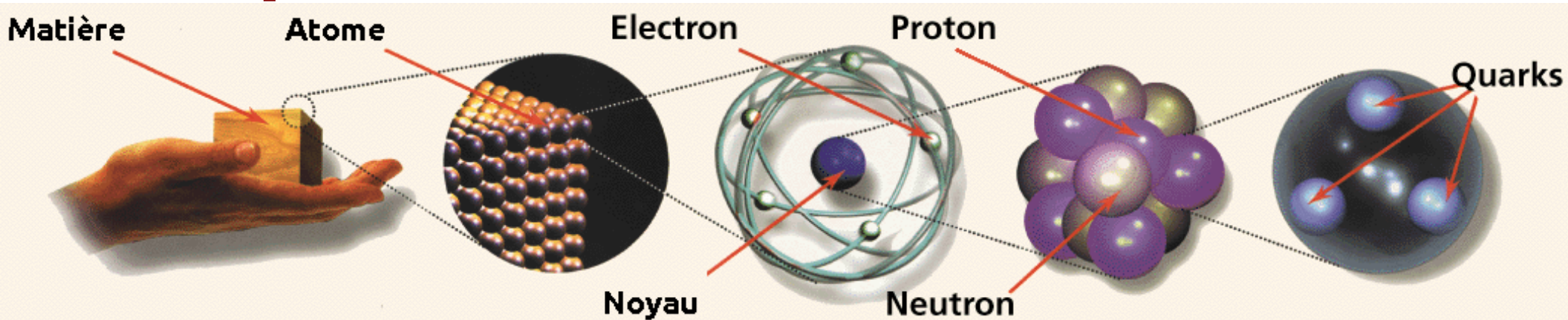




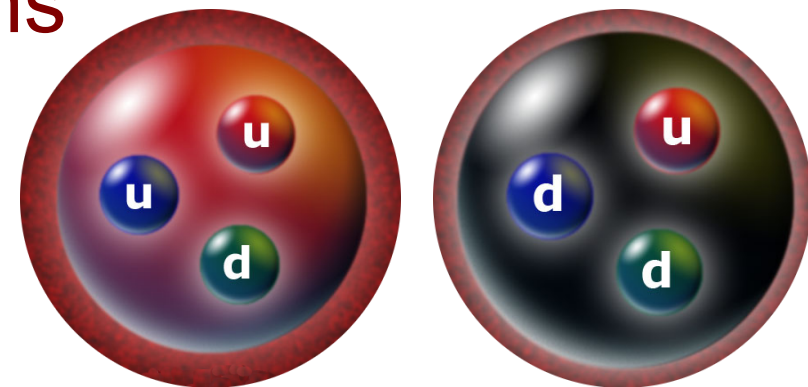


*De l'infiniment grand  
à l'infiniment petit...*

# De quoi est fait l'Univers visible ?

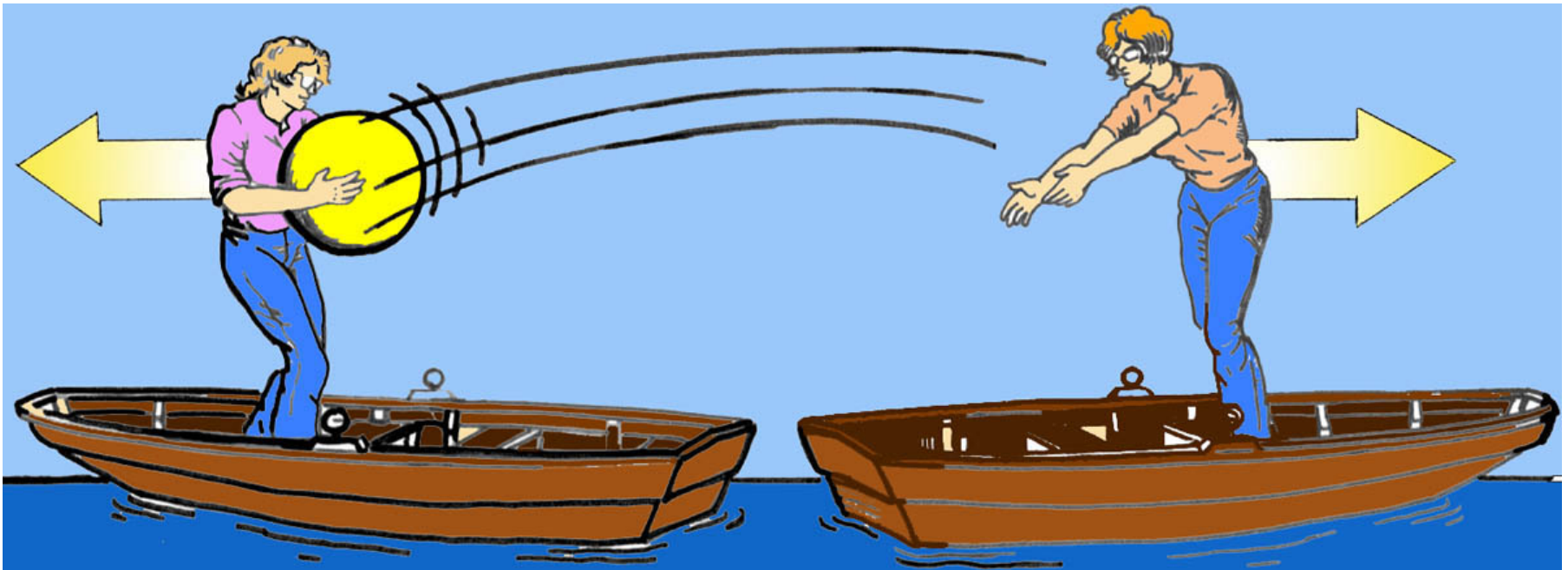


- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**
- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks
- Ils composent les noyaux
- Les électrons forment un nuage autour des noyaux
- Des **neutrinos** sont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



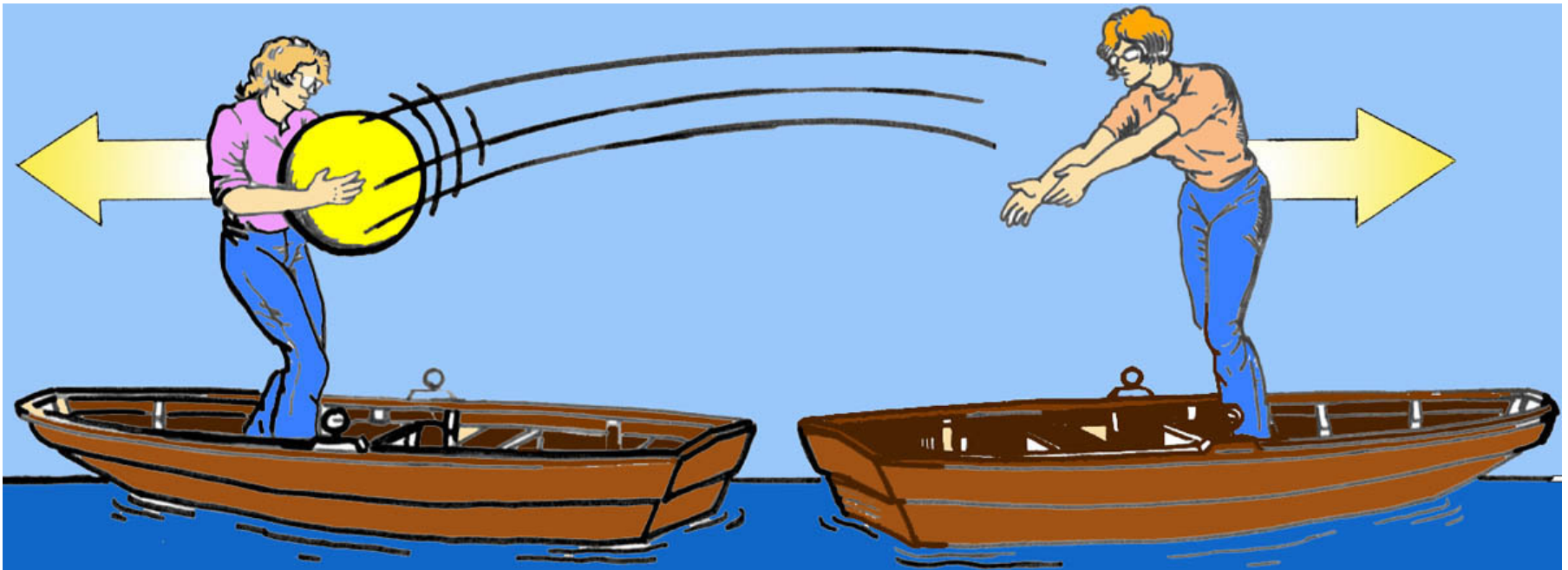
# Interaction fondamentale

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

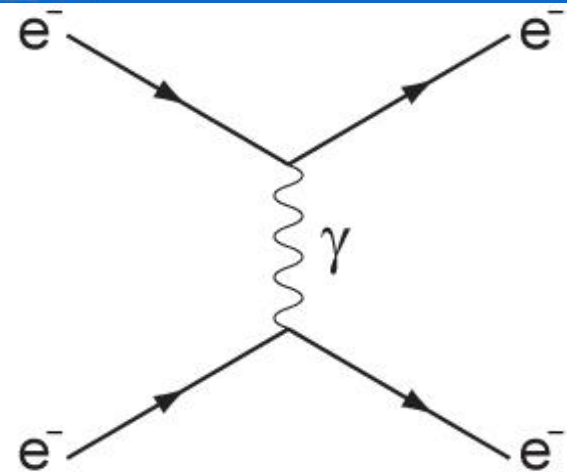


# Interaction fondamentale

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



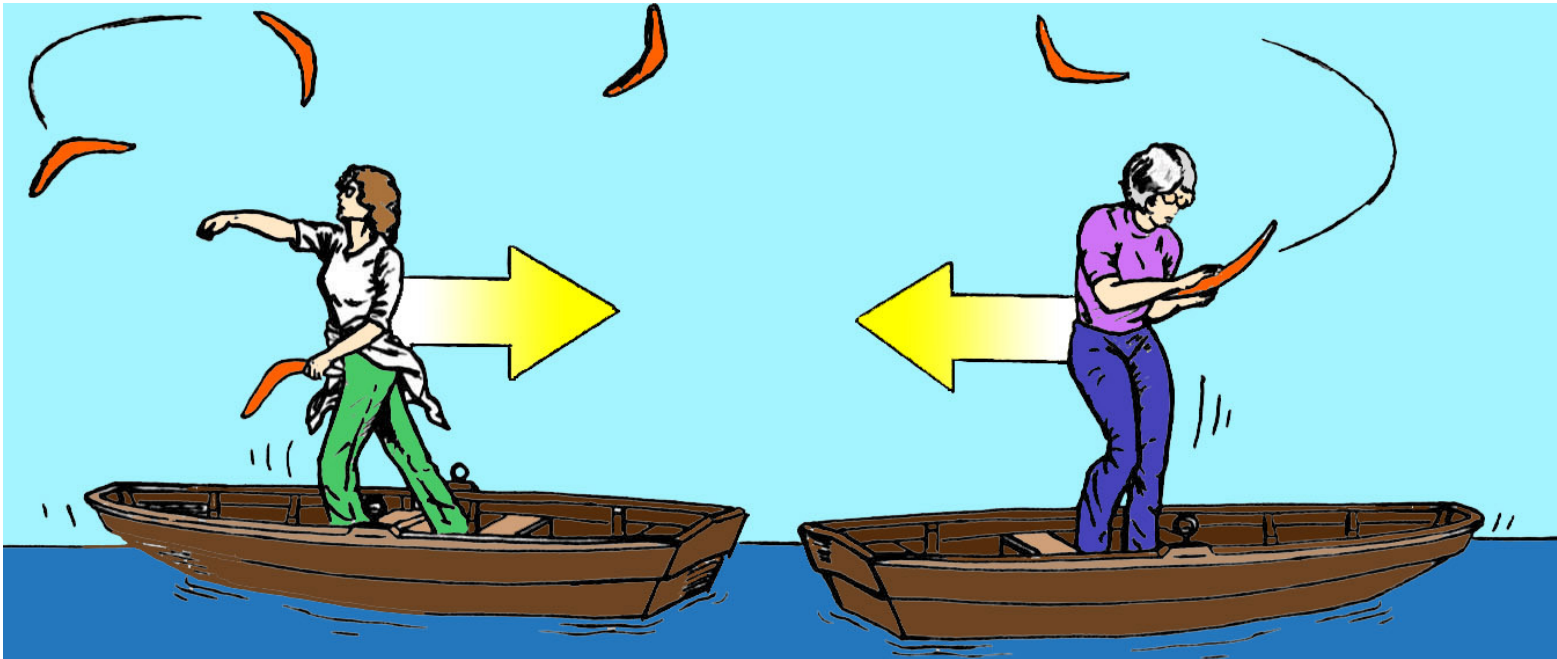
En physique des particules :



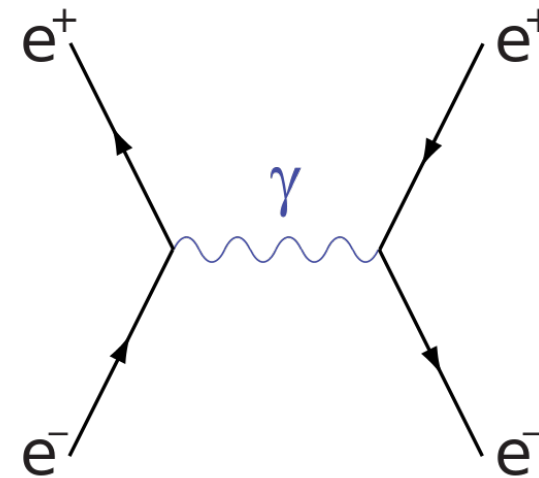


# Interaction fondamentale

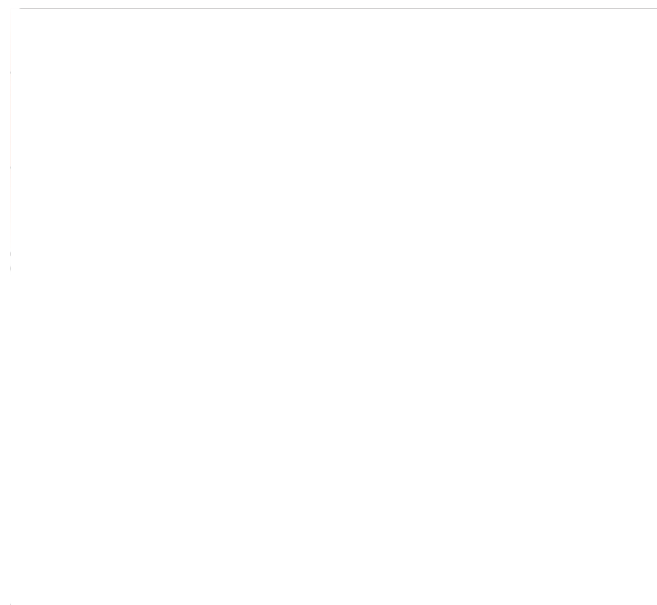
Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)



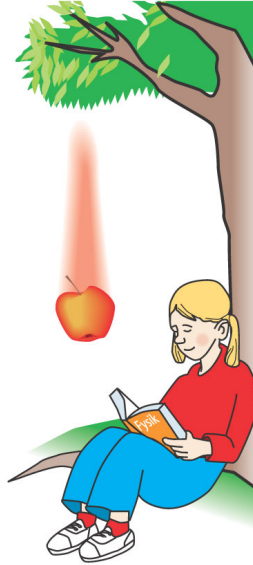
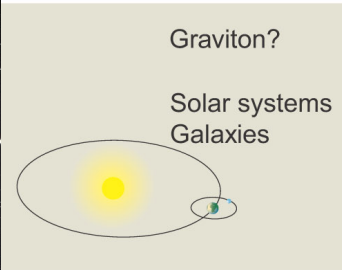
En physique des particules :



# Les forces

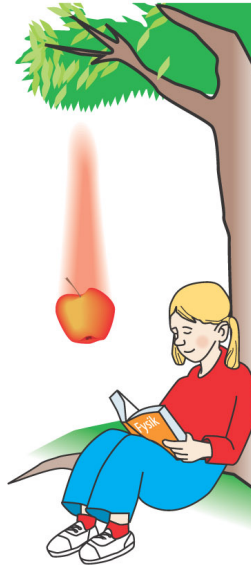


# Les forces



**Force gravitationnelle**

# Les forces

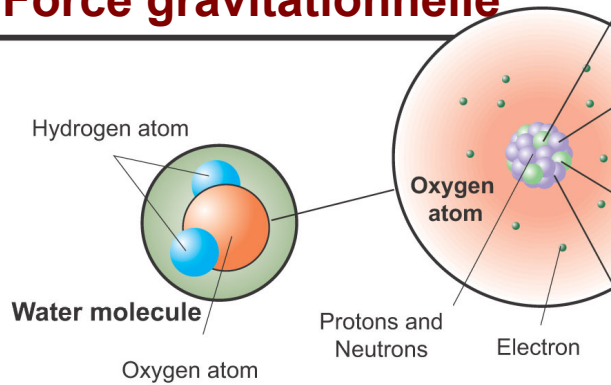


Graviton?

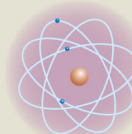
Solar systems  
Galaxies



## Force gravitationnelle



Photon



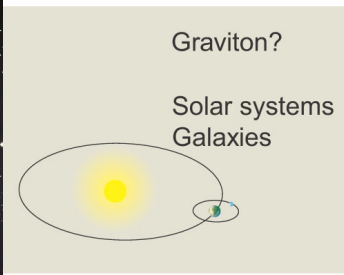
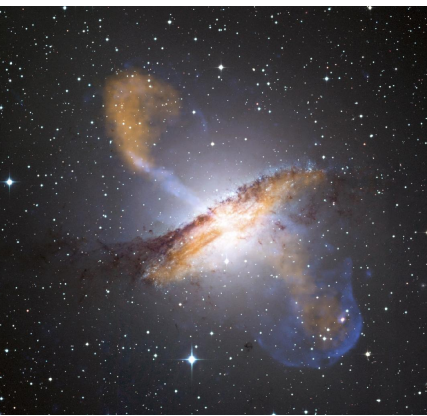
Atoms  
Light  
Chemistry  
Electronics



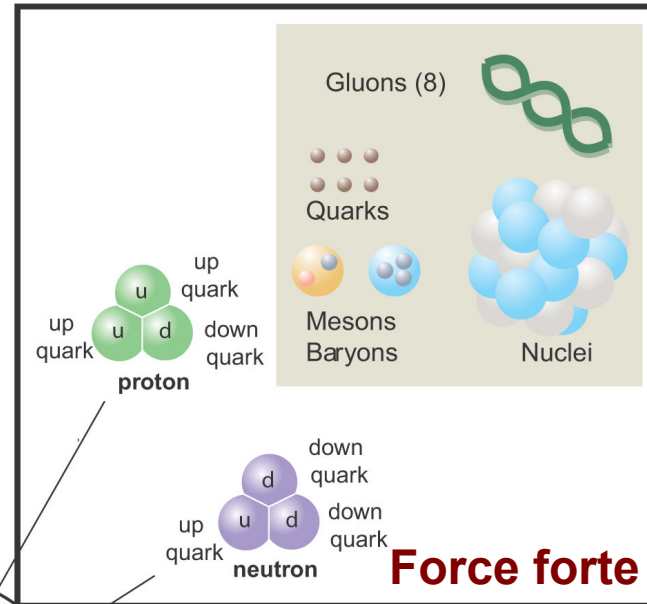
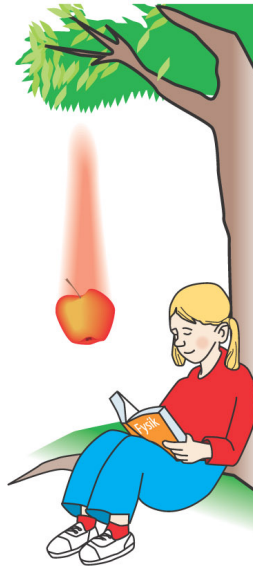
## Force électromagnétique

# Les forces

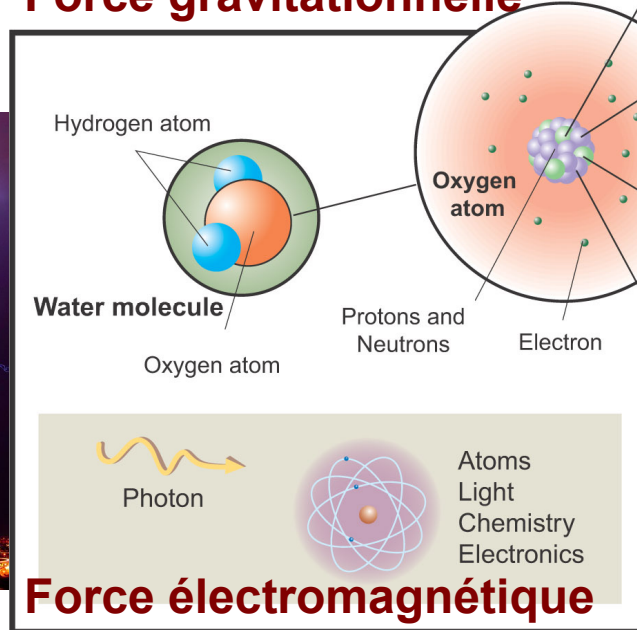
Illustration: Typoform



**Force gravitationnelle**



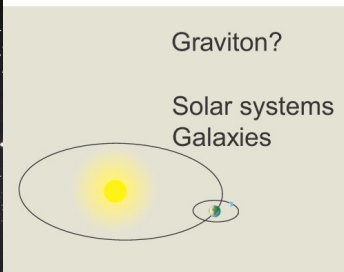
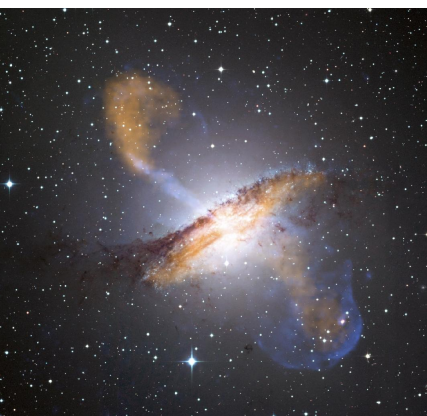
**Force forte**



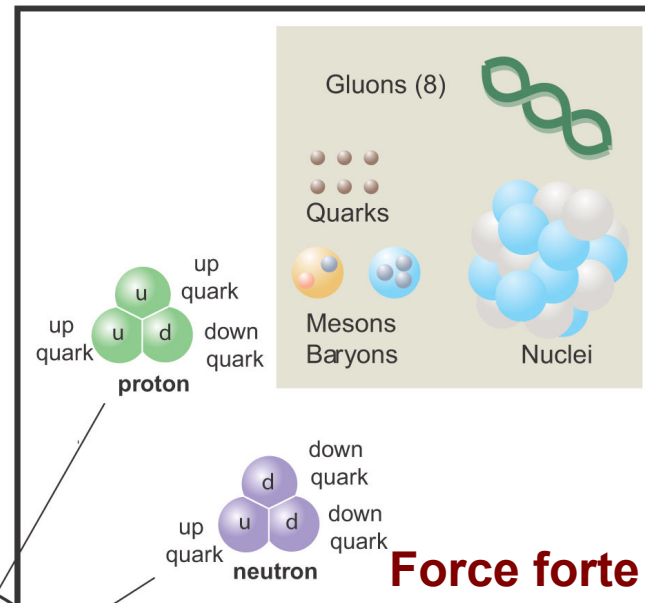
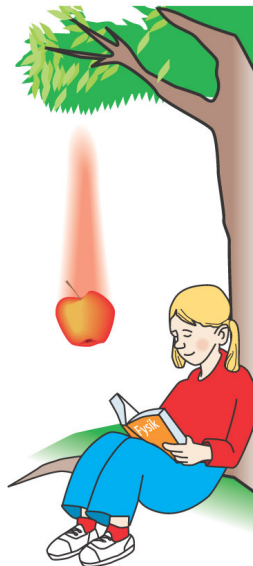
**Force électromagnétique**

# Les forces

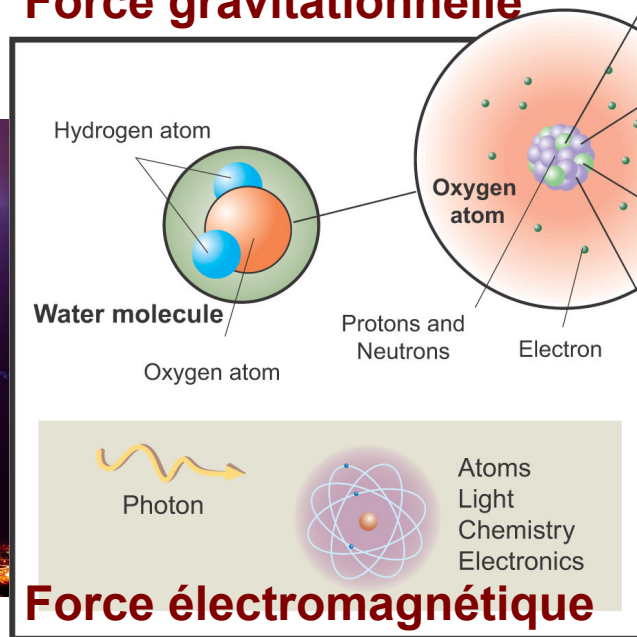
Illustration: Typoform



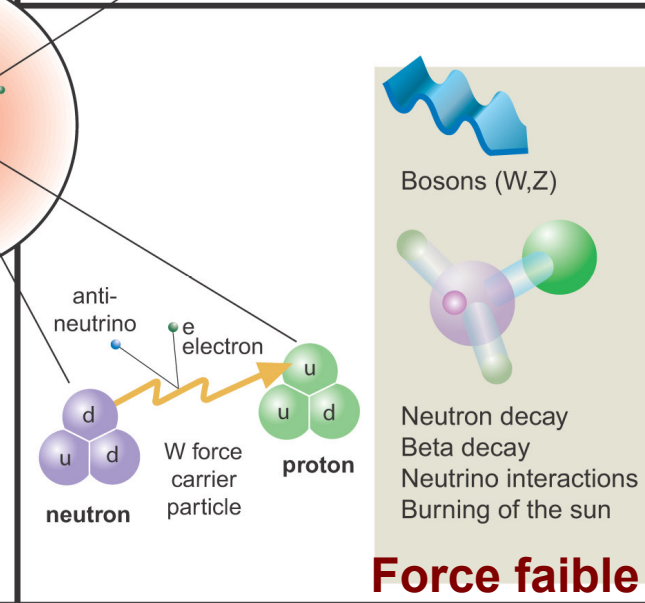
**Force gravitationnelle**



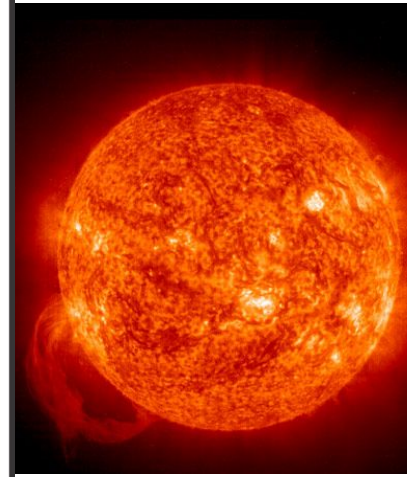
**Force forte**



**Force électromagnétique**

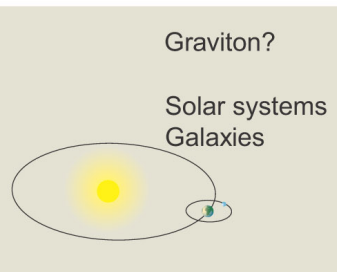
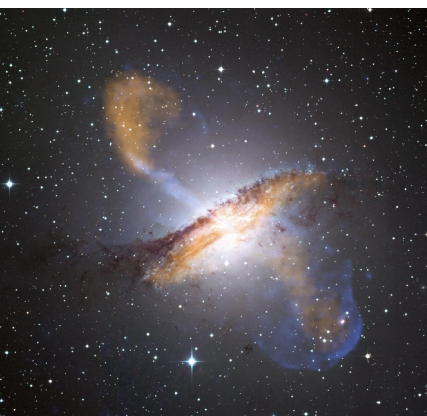


**Force faible**

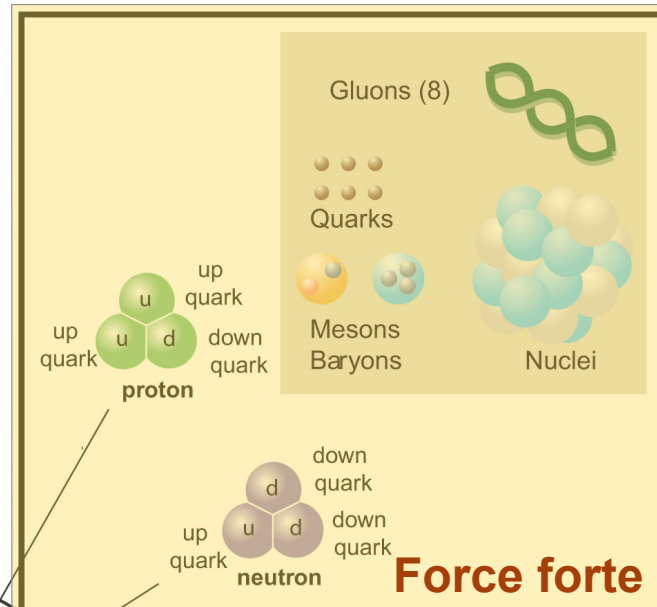
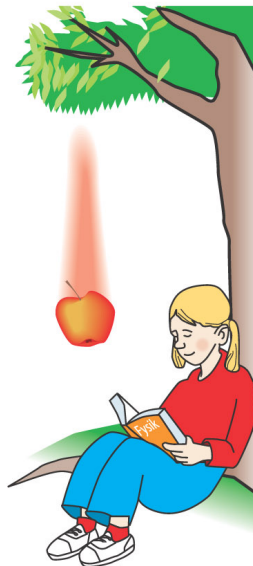


# Les forces

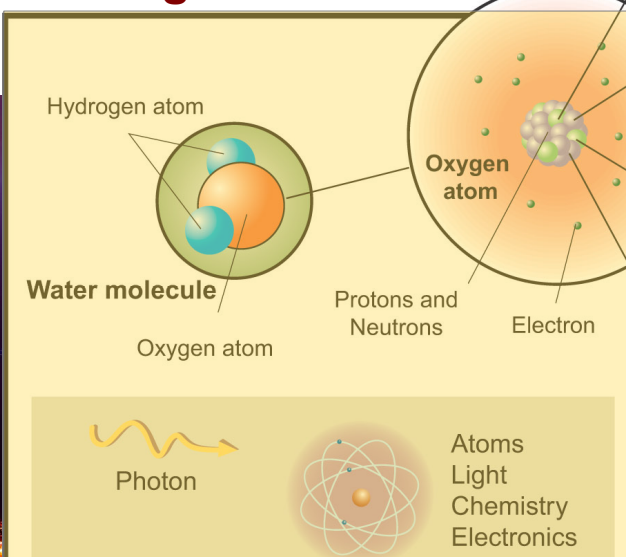
Illustration: Typoform



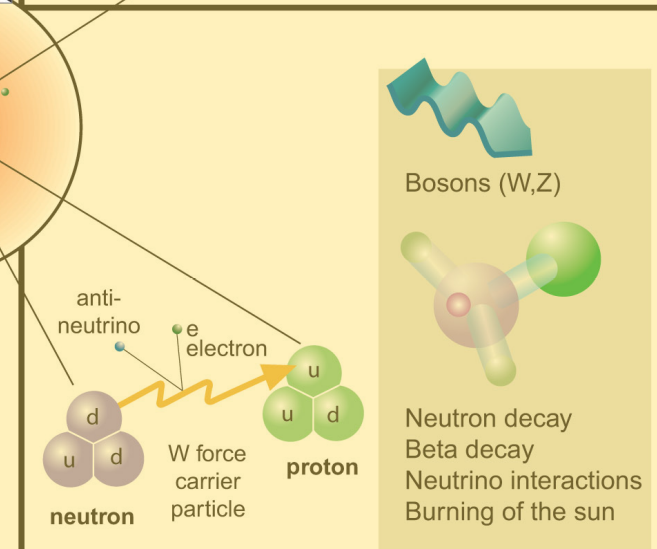
**Force gravitationnelle**



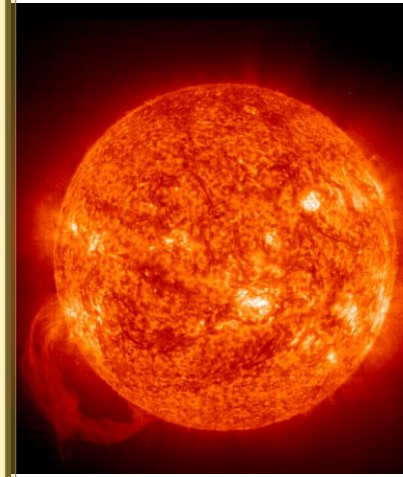
**Force forte**



**Force électromagnétique**



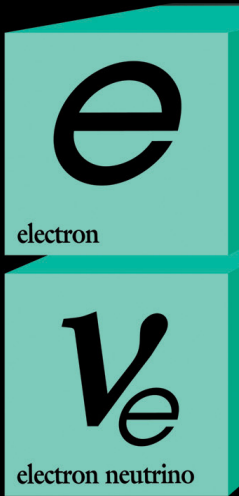
**Force faible**



# Quarks



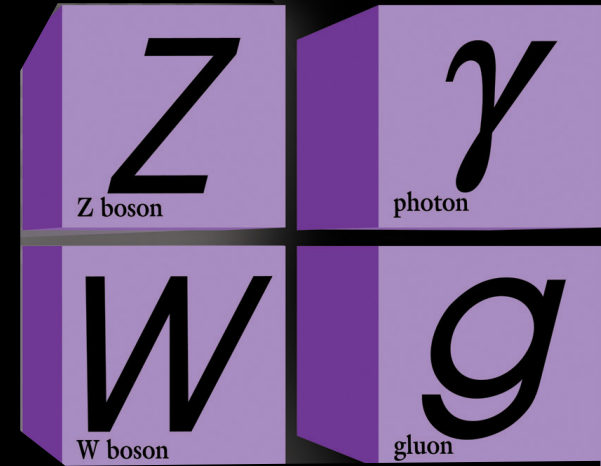
+ anti-matière



# Leptons

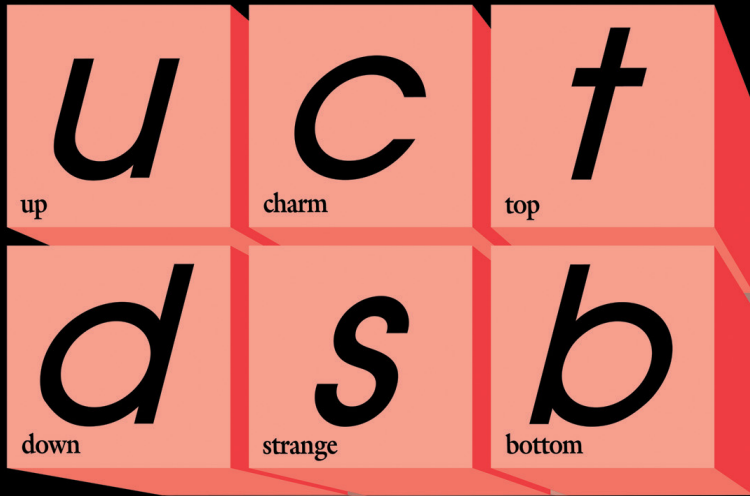
# Le modèle standard

## Forces

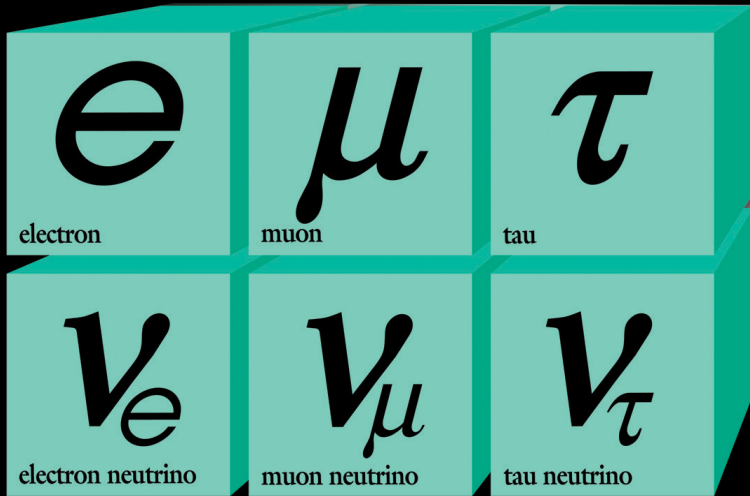




# Quarks



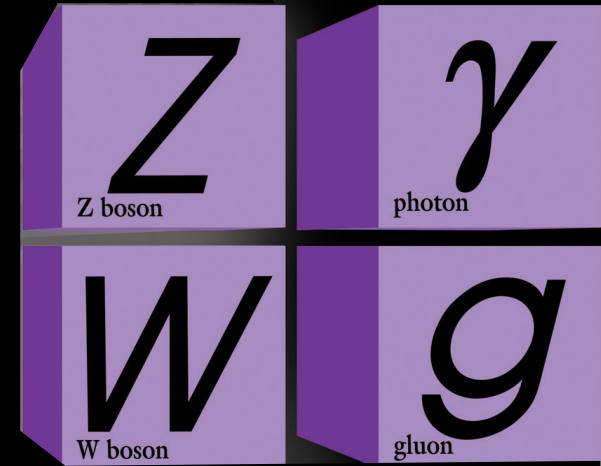
+ anti-matière



# Leptons

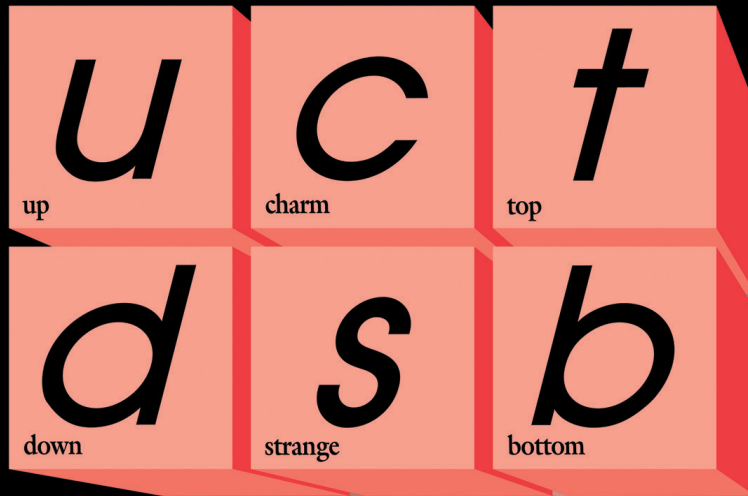
# Le modèle standard

# Forces

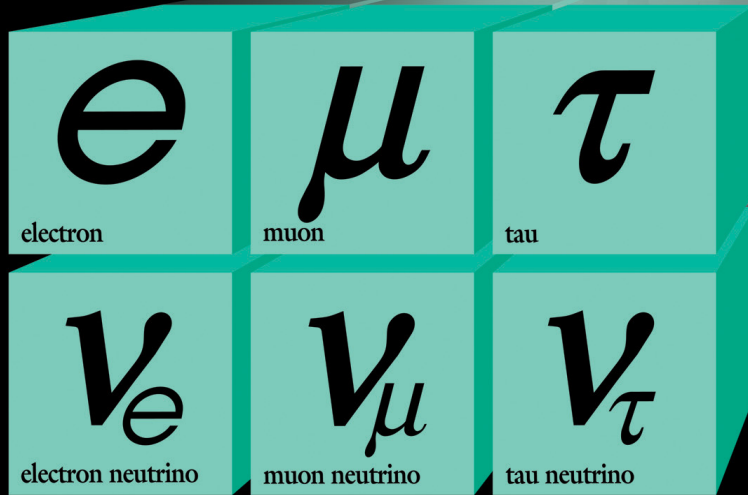


# Quarks

# Le modèle standard

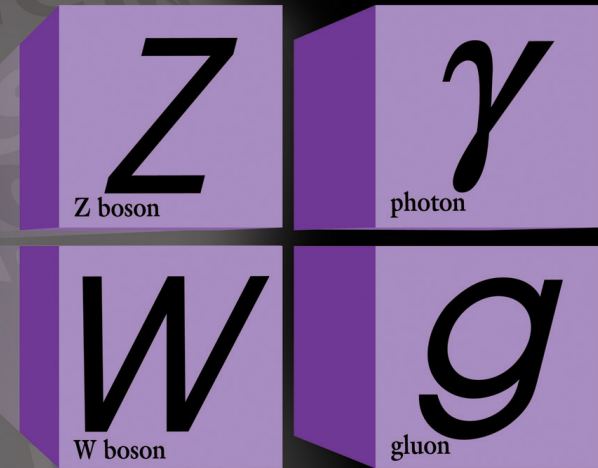


+ anti-matière



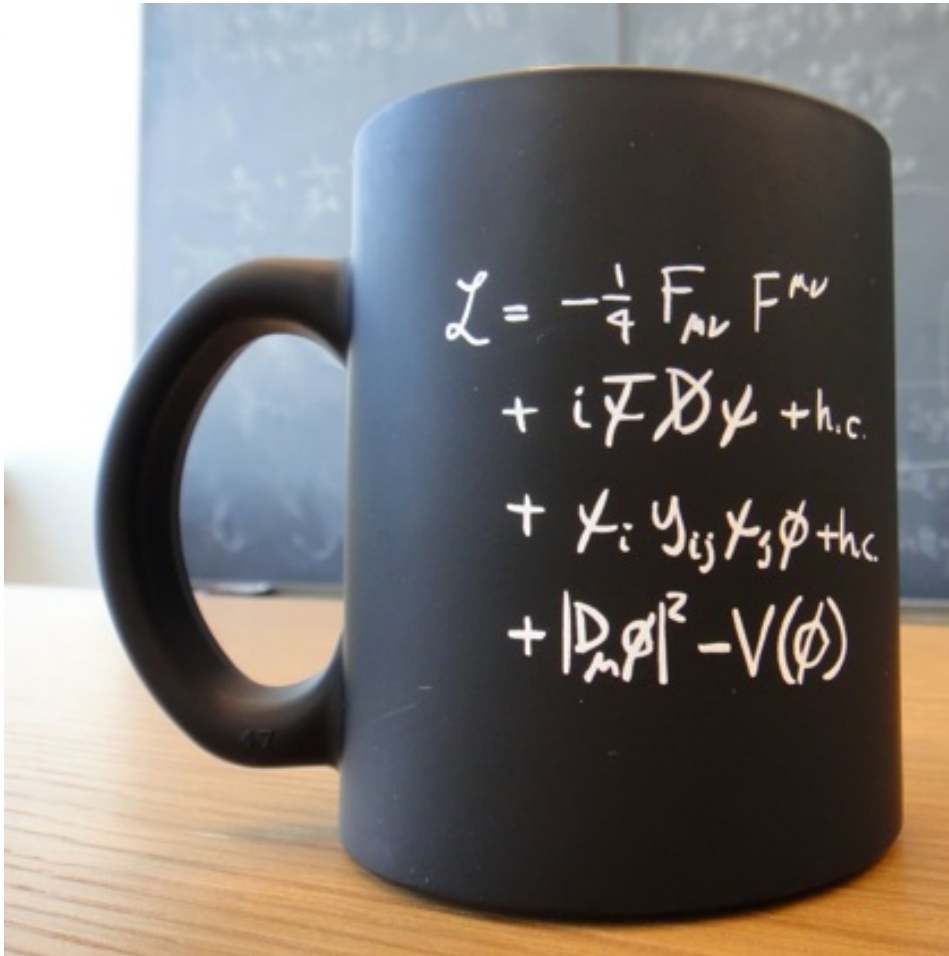
# Leptons

# Forces



# Le modèle standard

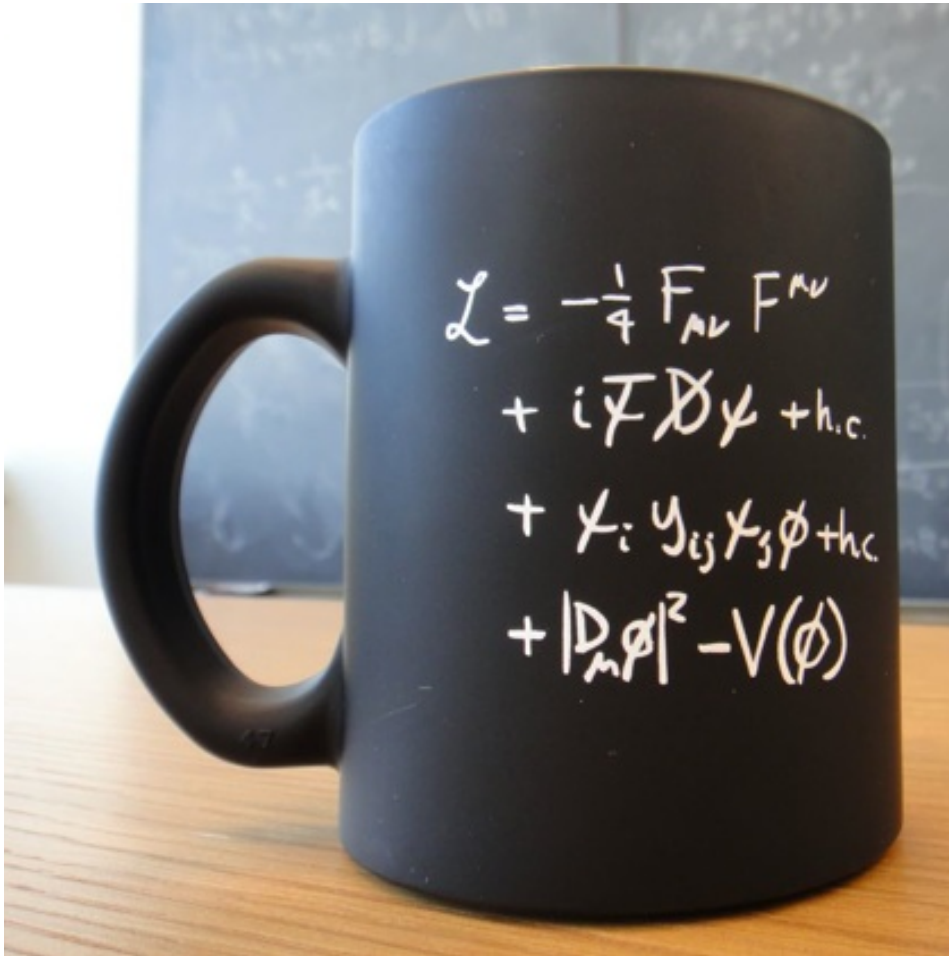
- Version synthétique



# Le modèle standard

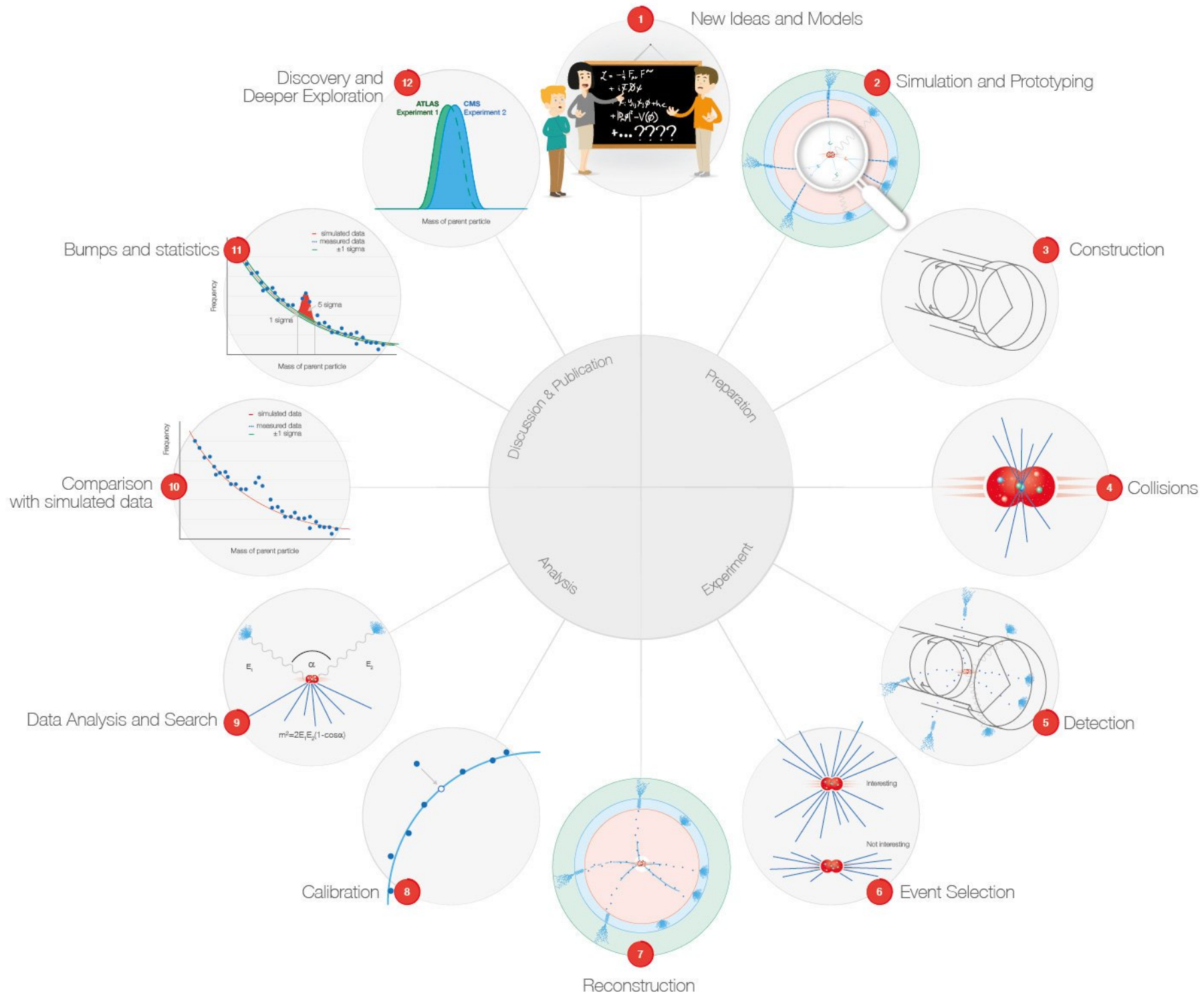
- Version synthétique

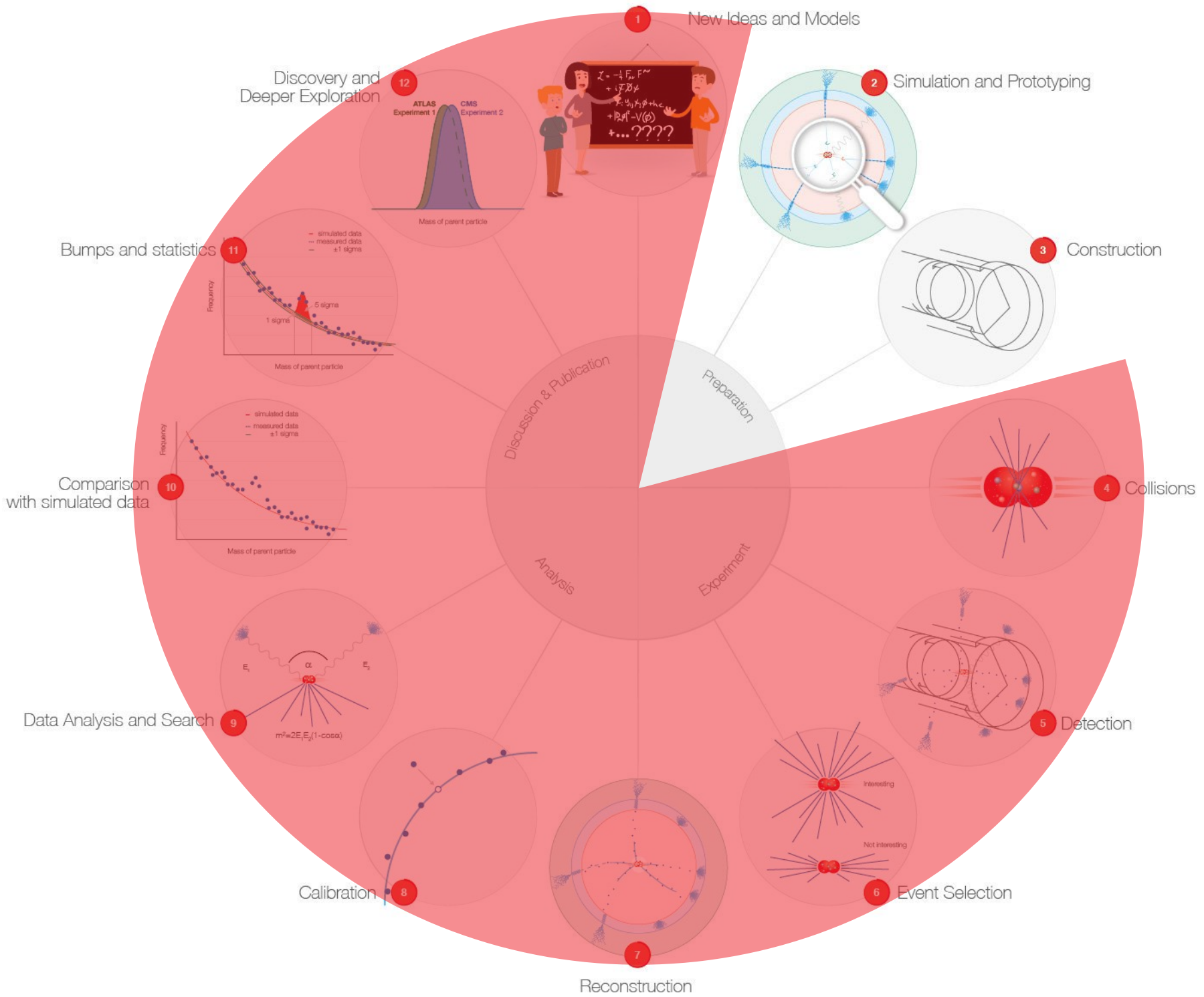
- Version développée...



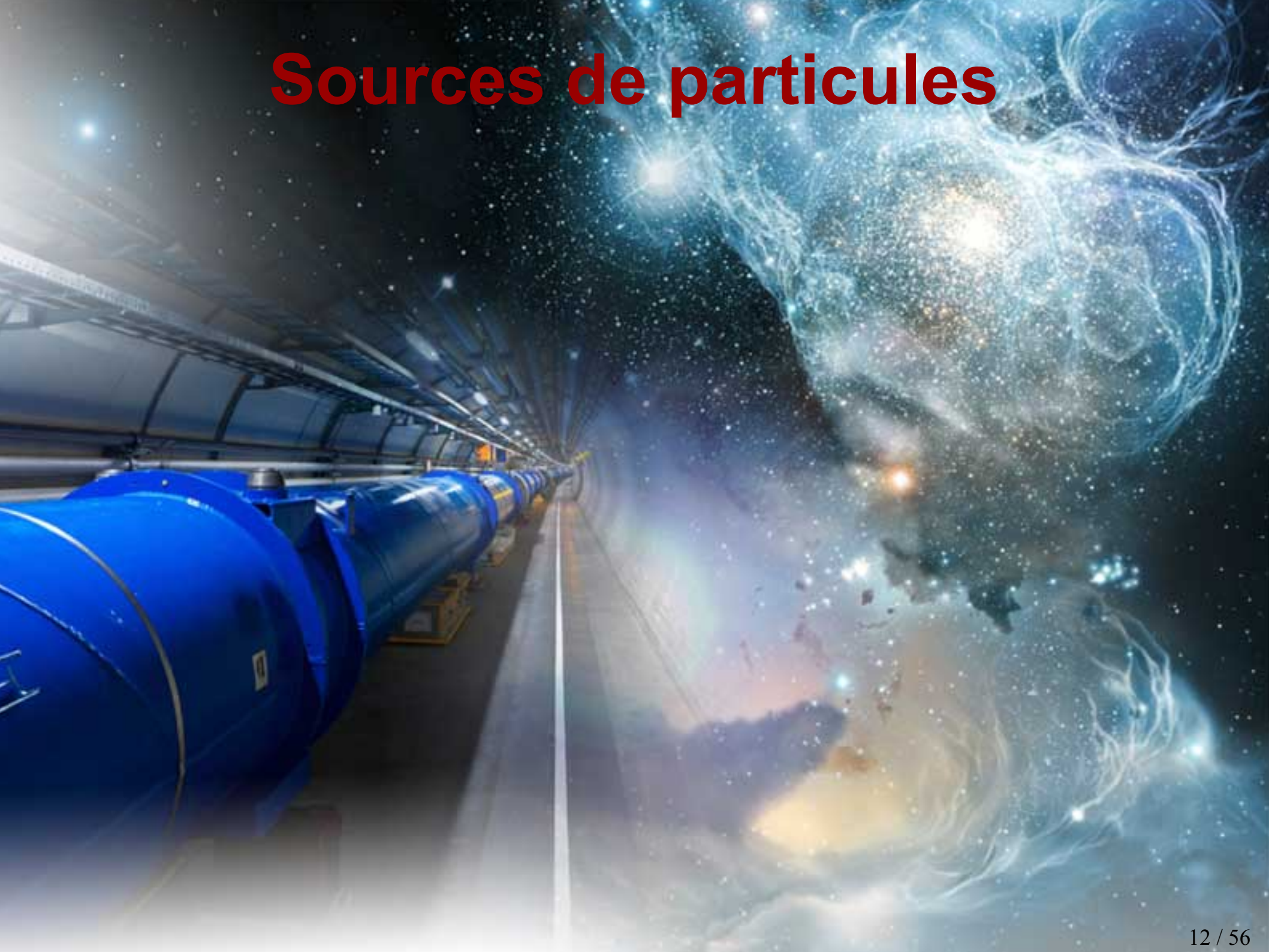
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + 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 - \\
 & igc_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^+)] - ig 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_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ 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} ig [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}) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig 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} ig^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} ig^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 + ig 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{ig}{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{ig}{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\kappa} d_\kappa^j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{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{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_\kappa^j) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_\kappa^j) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_\kappa^j) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_\kappa^j) - \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{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{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 + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig 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} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^- + \bar{X}^- X^0 \phi^+] + \frac{1}{2c_w} ig M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ + \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & ig M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ + \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} ig M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 + \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

# Interactions avec le boson de Higgs





# Sources de particules



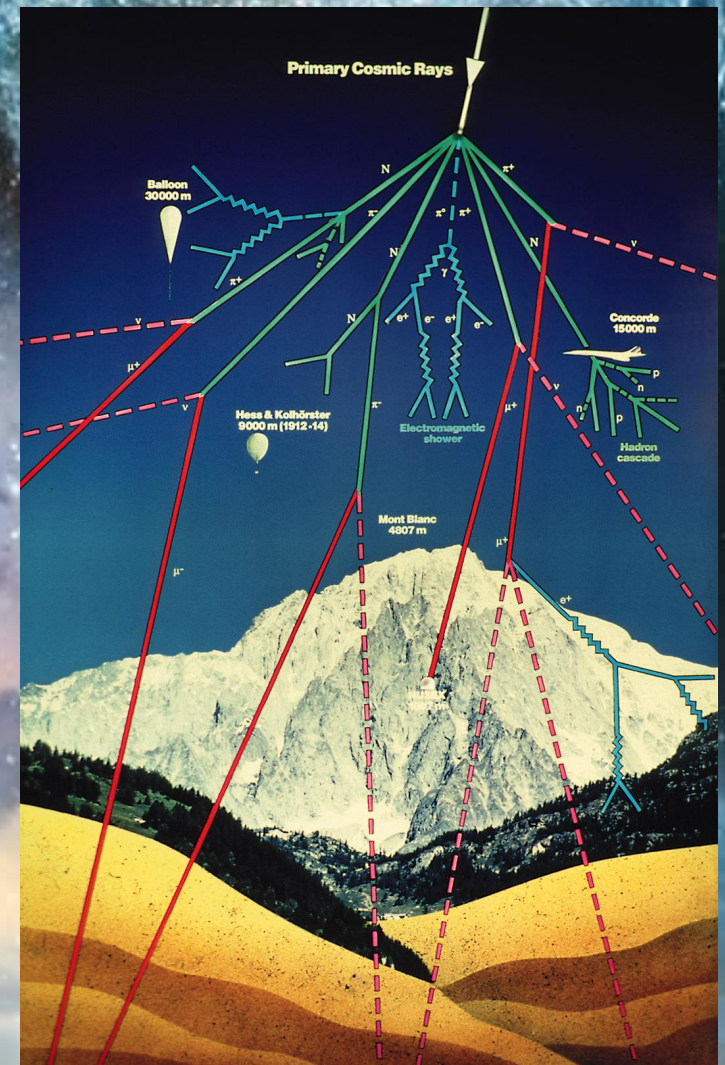


# Sources de particules

**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)

**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)

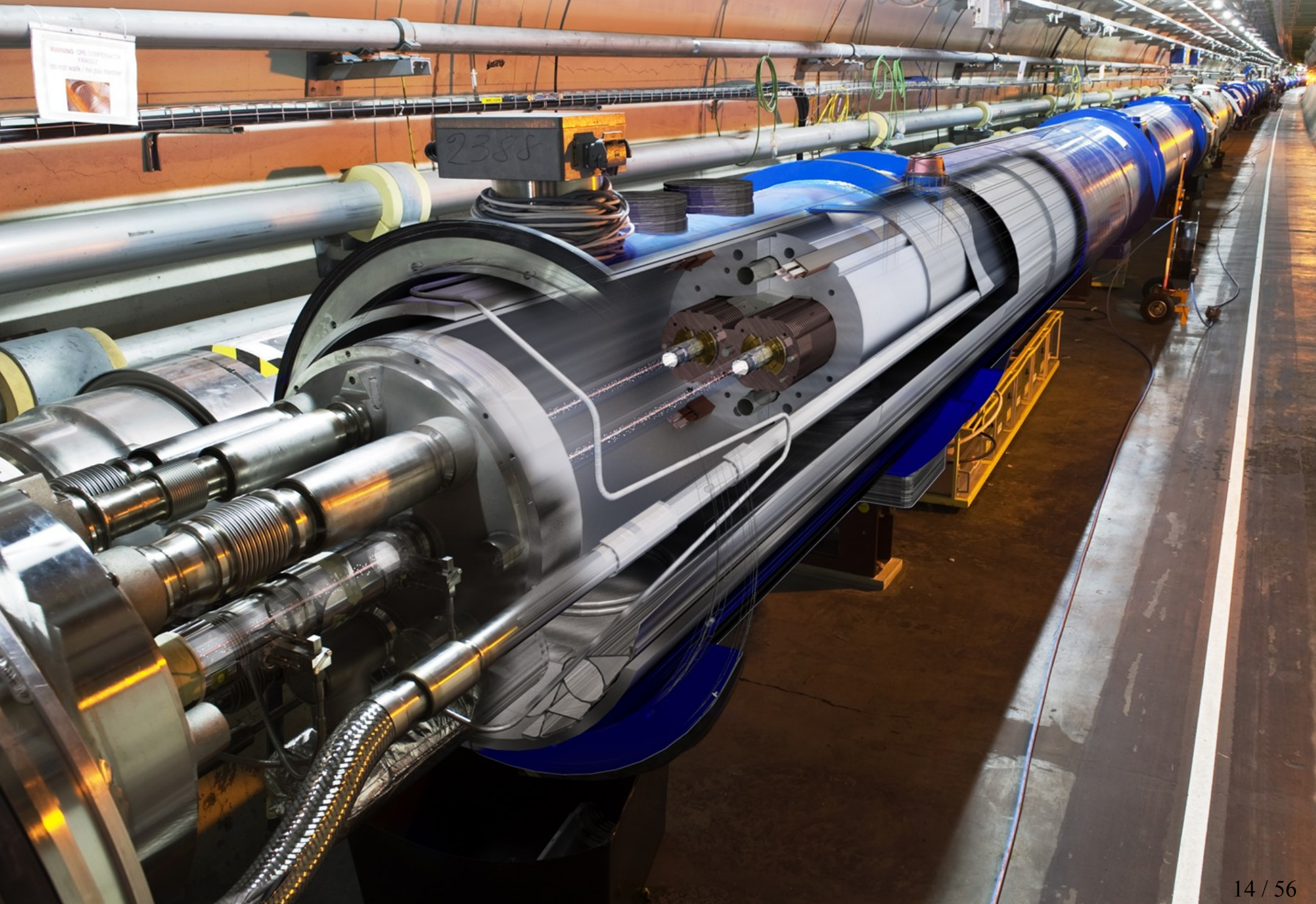


# Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)

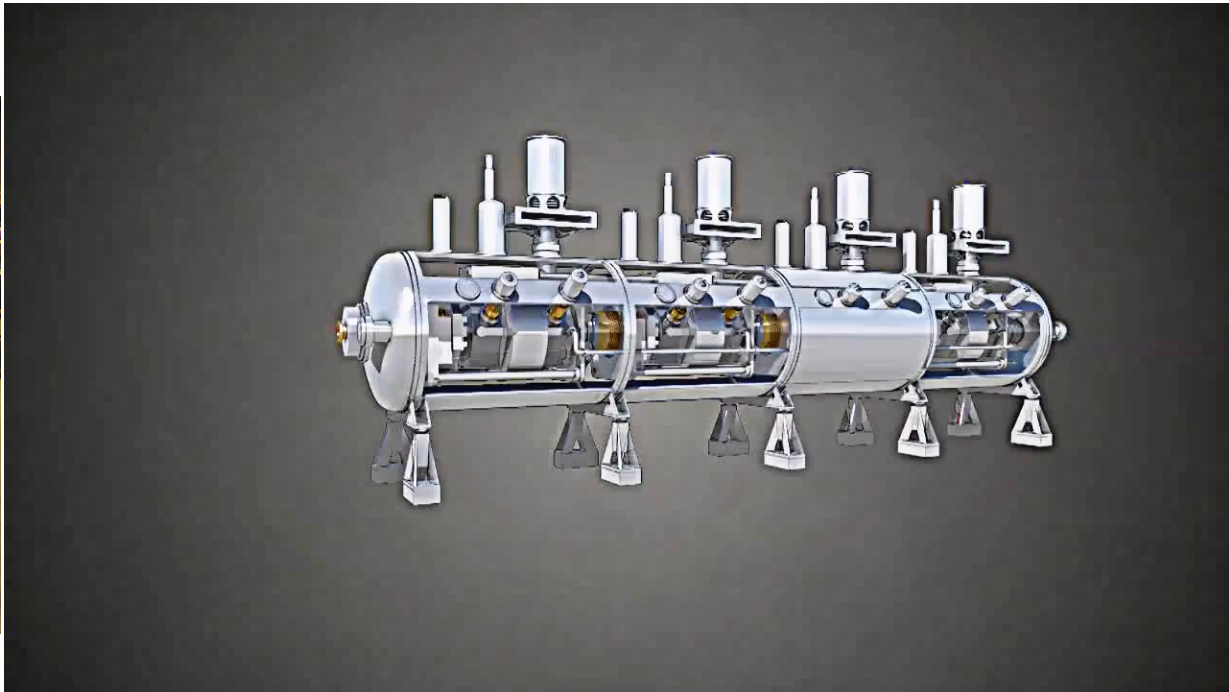
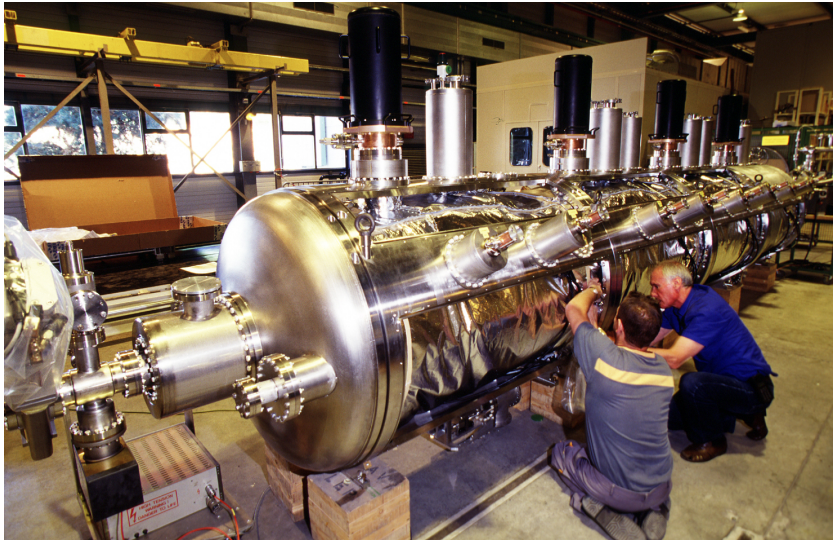
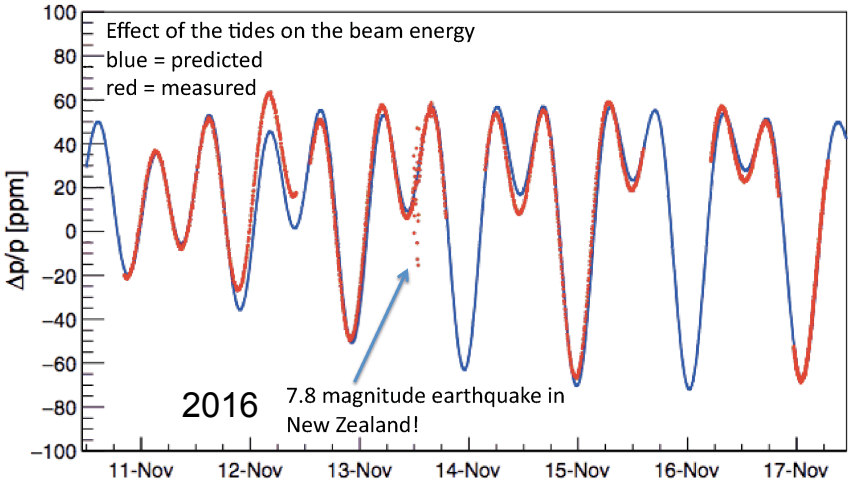


# Le LHC : la machine à superlatifs





# Aimants et cavités



# 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
Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
Juin 2026	Fin des collisions à luminosité nominale
2030-2041	Phase à haute luminosité HL-LHC (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

1994

Approbation par le conseil d

1996-1998

Approbation des quatre gra

1998-2008

Construction du LHC et des détecteurs

Septembre 2008

Mise en service, panne cryogénique

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

Juillet 2022

Début du Run 3 à 13.6 TeV

Juin 2026

Fin des collisions à luminosité nominale

2030-2041

Phase à haute luminosité HL-LHC (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

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

Juillet 2022

Début du Run 3 à 13.6 TeV

Juin 2026

Fin des collisions à luminosité nominale

2030-2041

Phase à haute luminosité HL-LHC (10 fois plus de données)



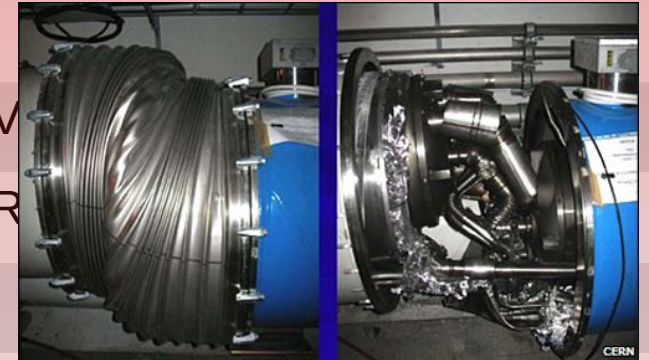
# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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
Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
Juin 2026	Fin des collisions à luminosité nominale
2030-2041	Phase à haute luminosité HL-LHC (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
Juillet 2022	Début du Run 3
Juin 2026	Fin des collisions
2030-2041	Phase à haute



# 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
Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
Juin 2026	Fin des collisions à luminosité nominale
2030-2041	Phase à haute luminosité HL-LHC (10 fois plus de données)

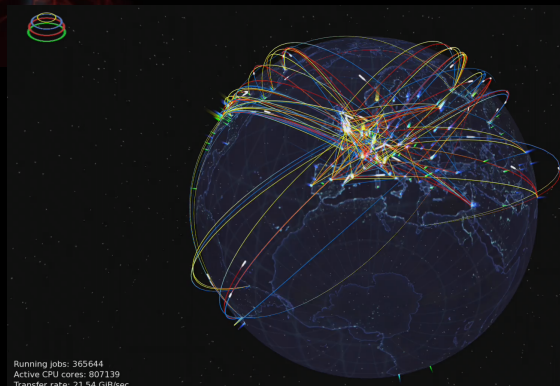
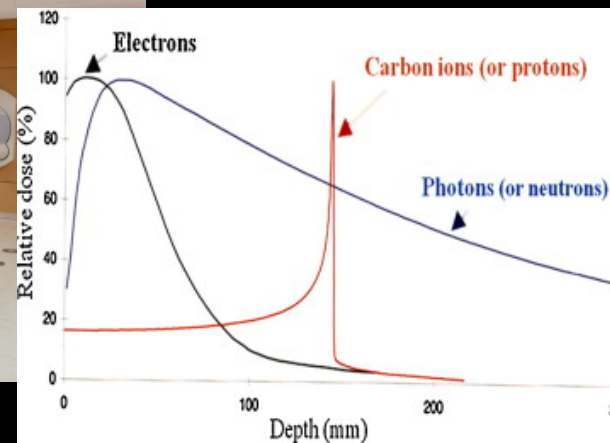
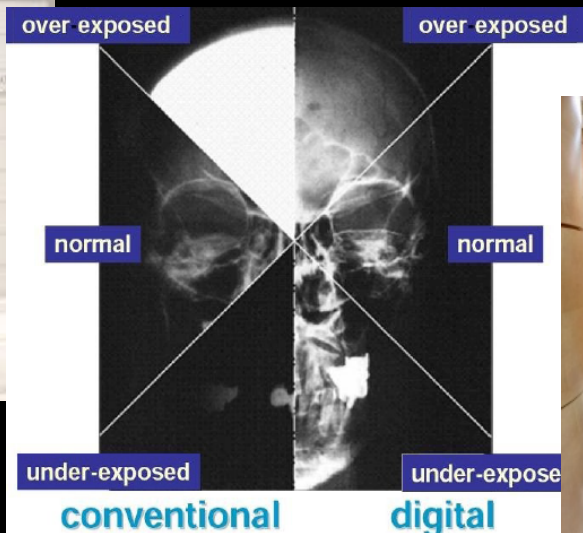


YEARS / ANS CERN  
1954-2024

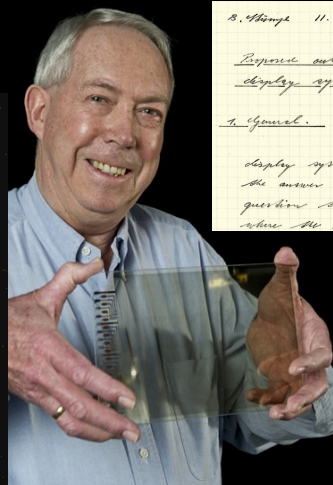




# A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?

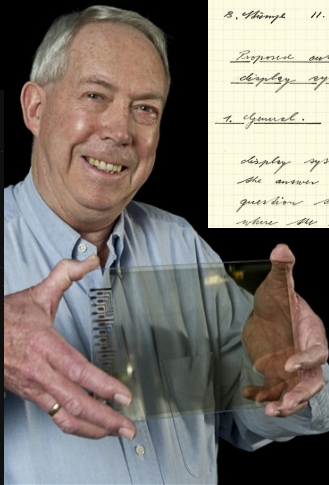
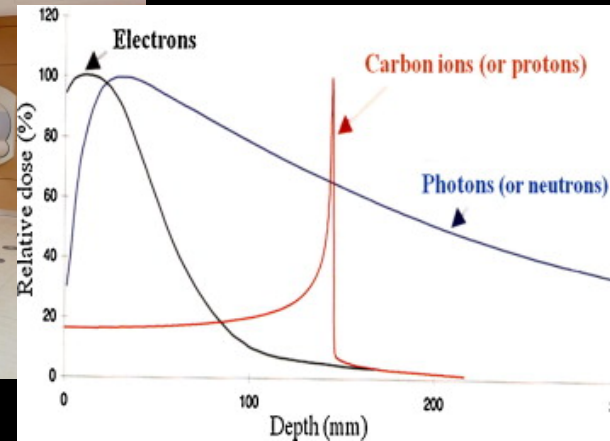
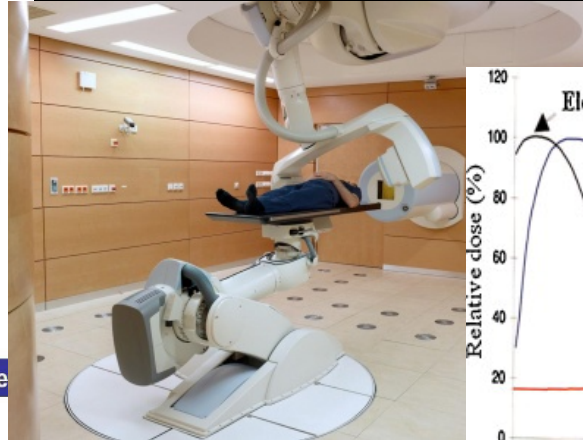
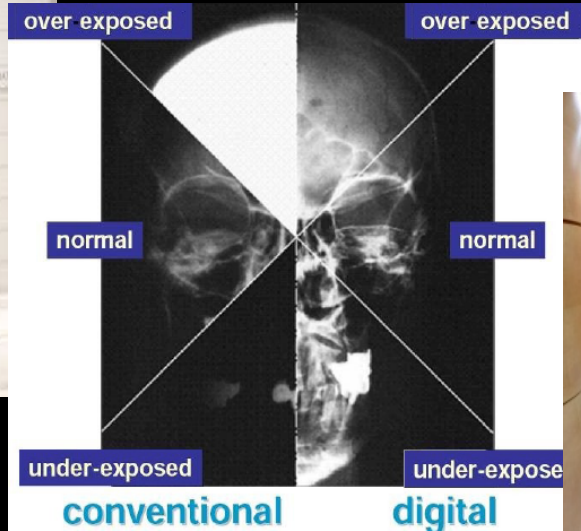


Running jobs: 365644  
Active CPU cores: 807139  
Transfer rate: 21.54 GiB/sec

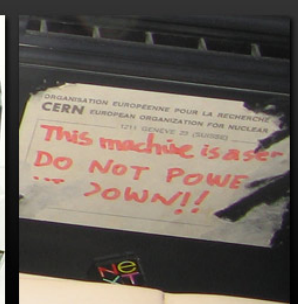


B. Thompson 11.03.1972 Page 7.  
Expense outline for a fast interactive computer display system \*  
1. General: *early all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to*

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

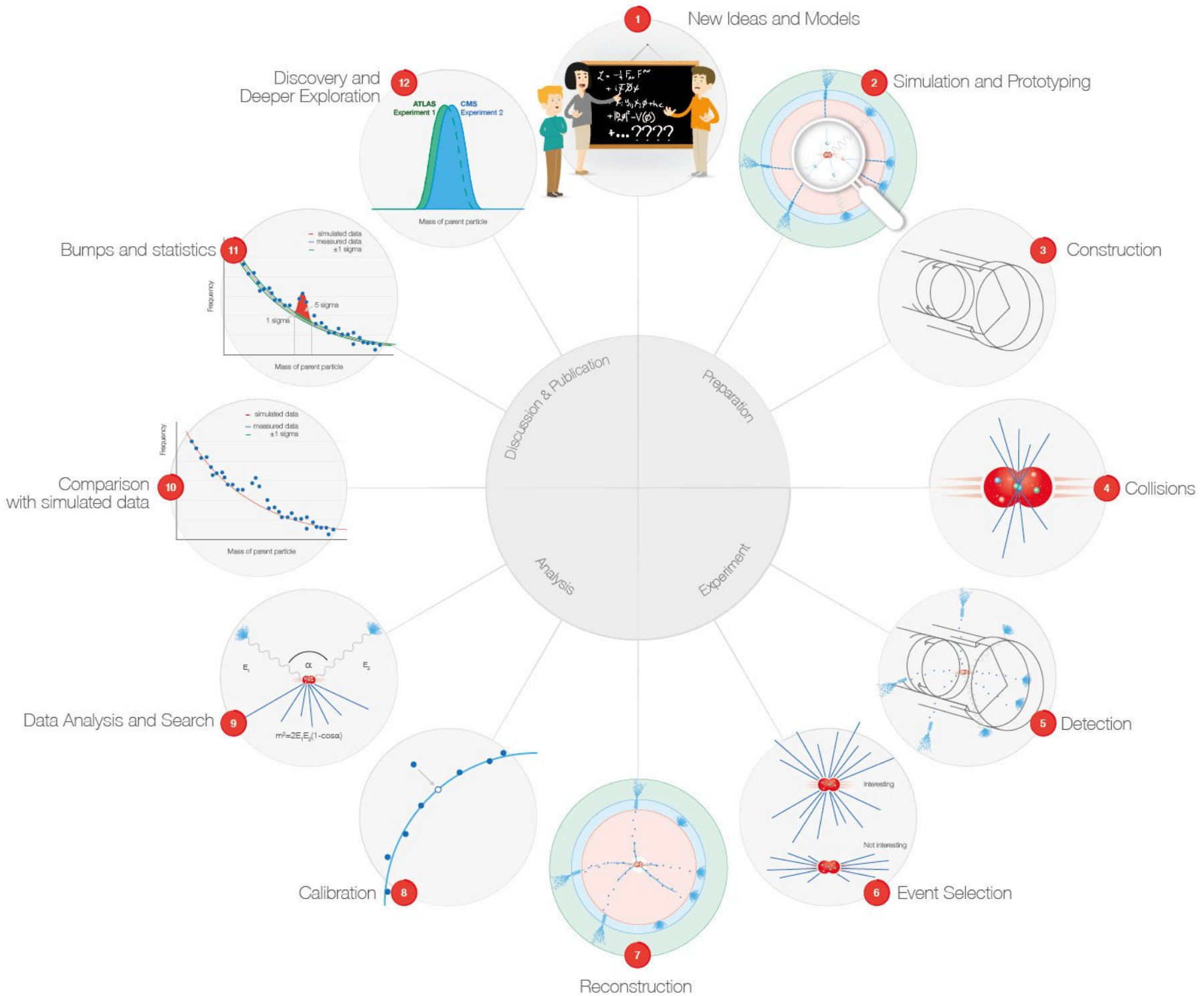


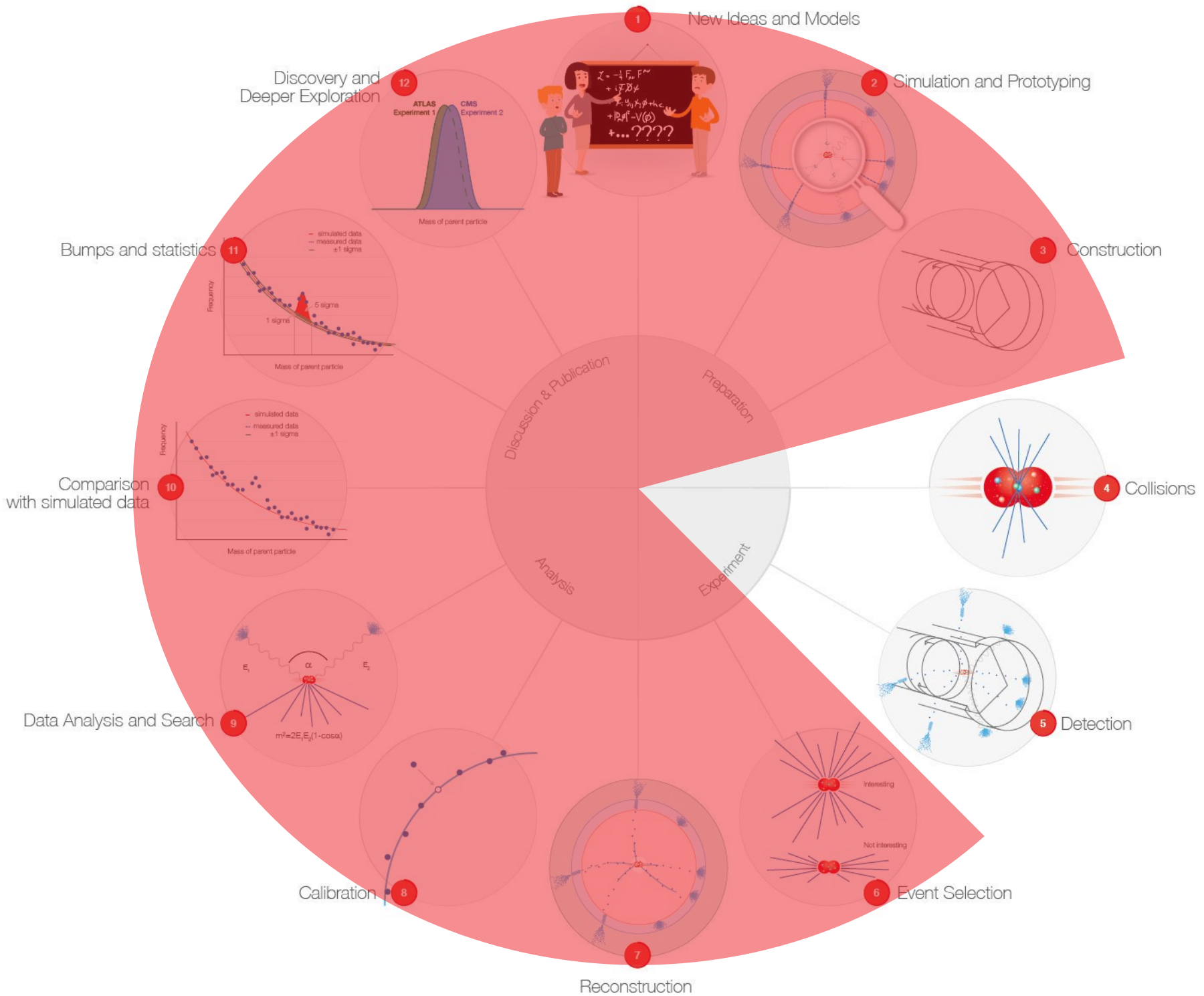
B. Thompson 11.03.1972 PAGE 7  
 Propose outline for a fast interactive computer display system \*  
 1. General: nearly all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to



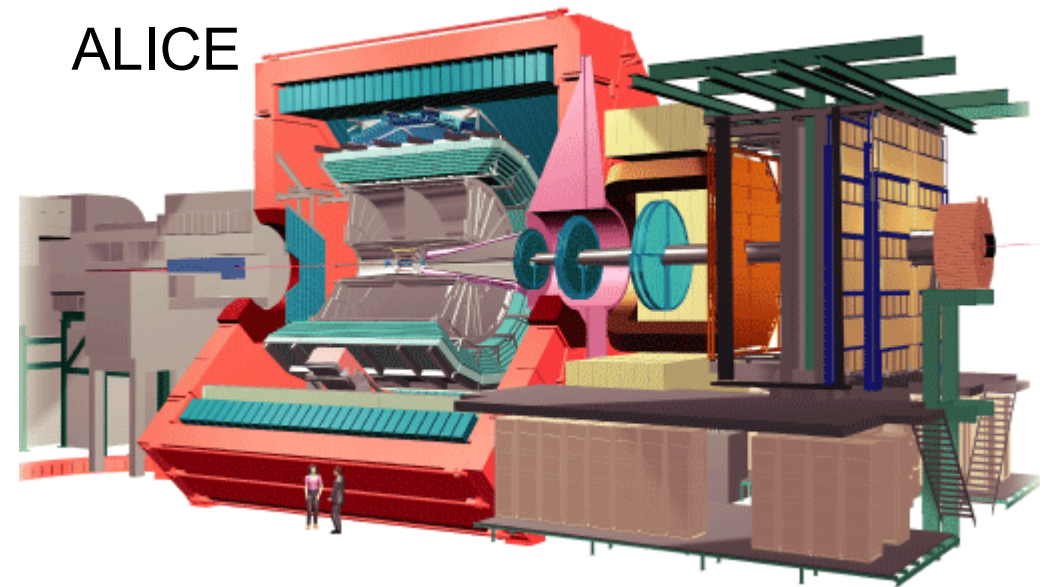
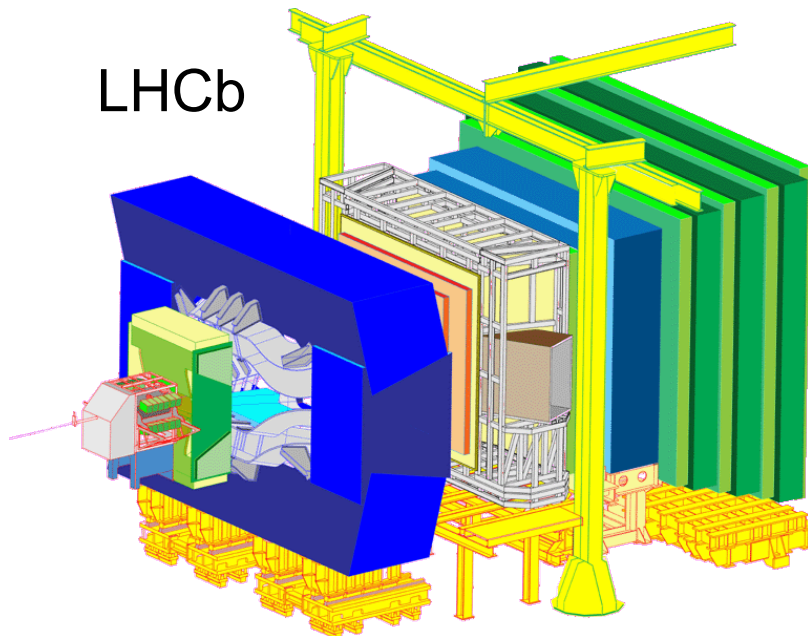
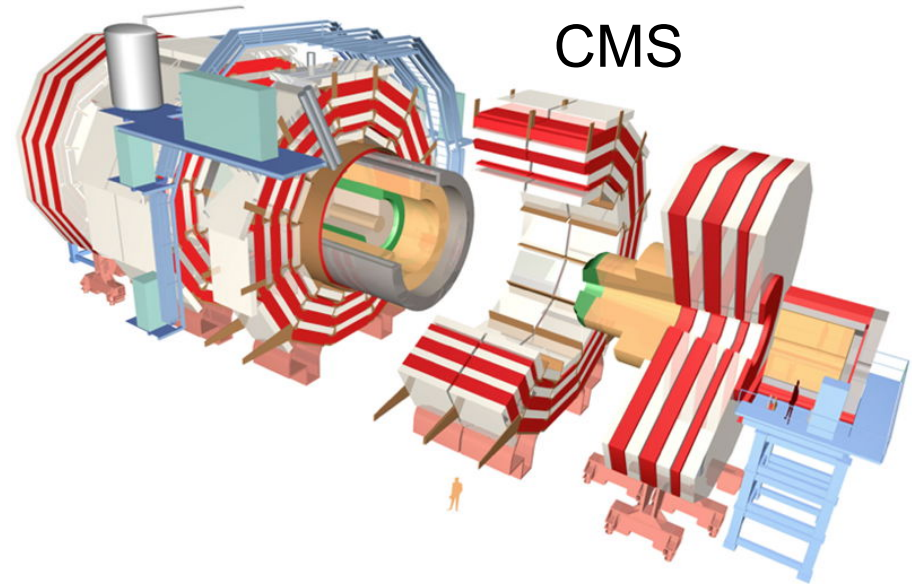
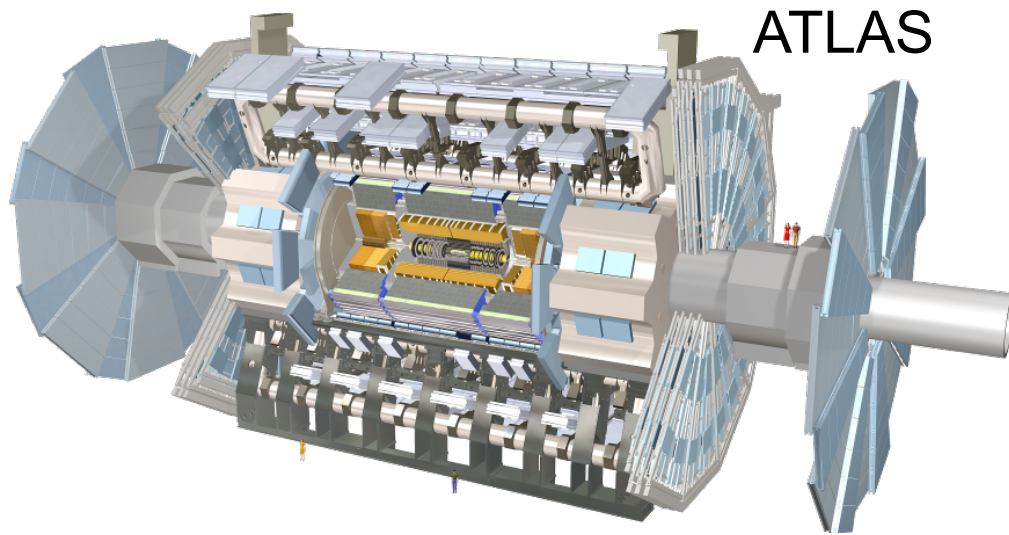
► Le Web a été inventé au CERN !

Running jobs: 365644  
 Active CPU cores: 807139  
 Transfer rate: 21.54 GiB/sec

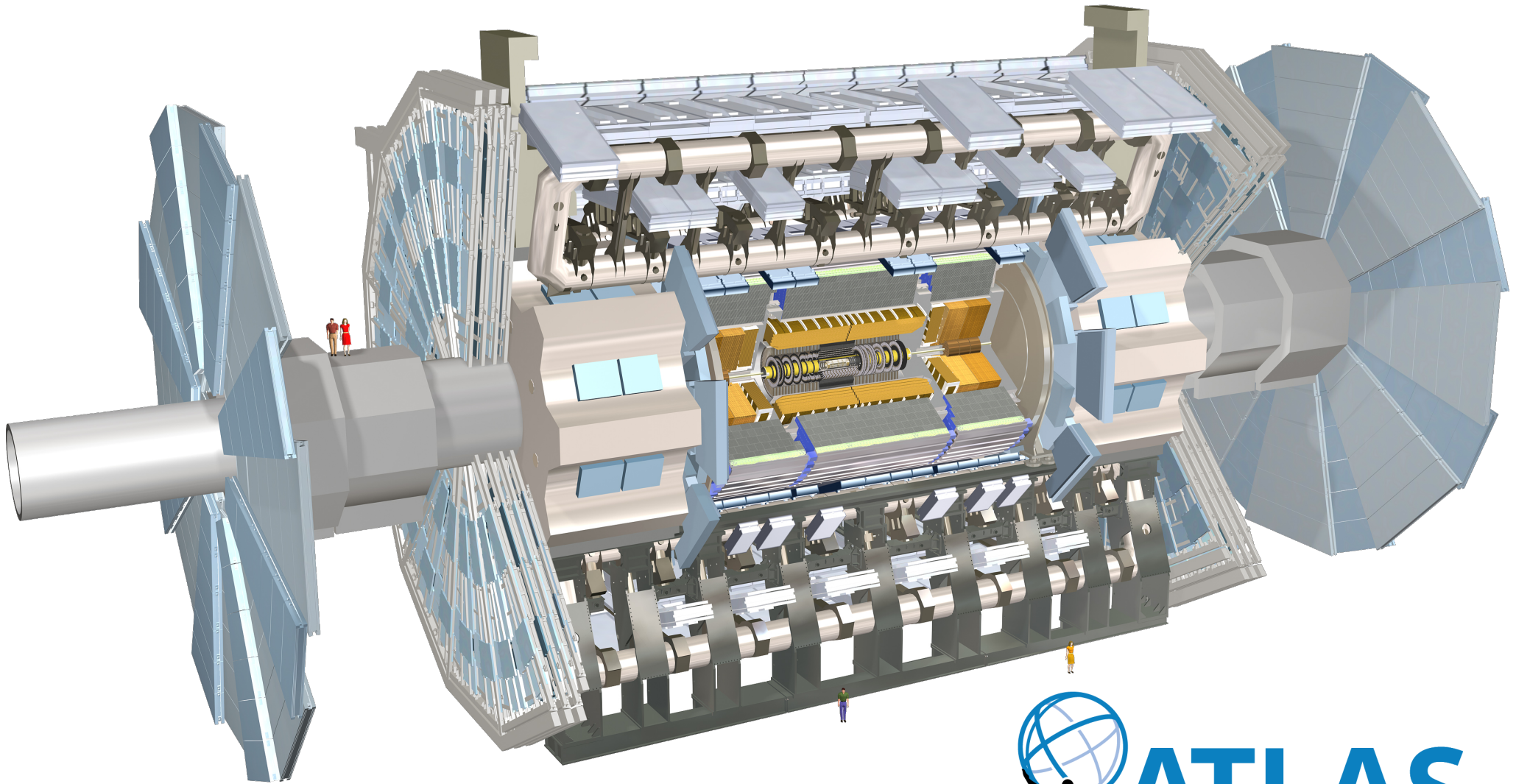




# Les détecteurs géants du LHC



# Le détecteur ATLAS



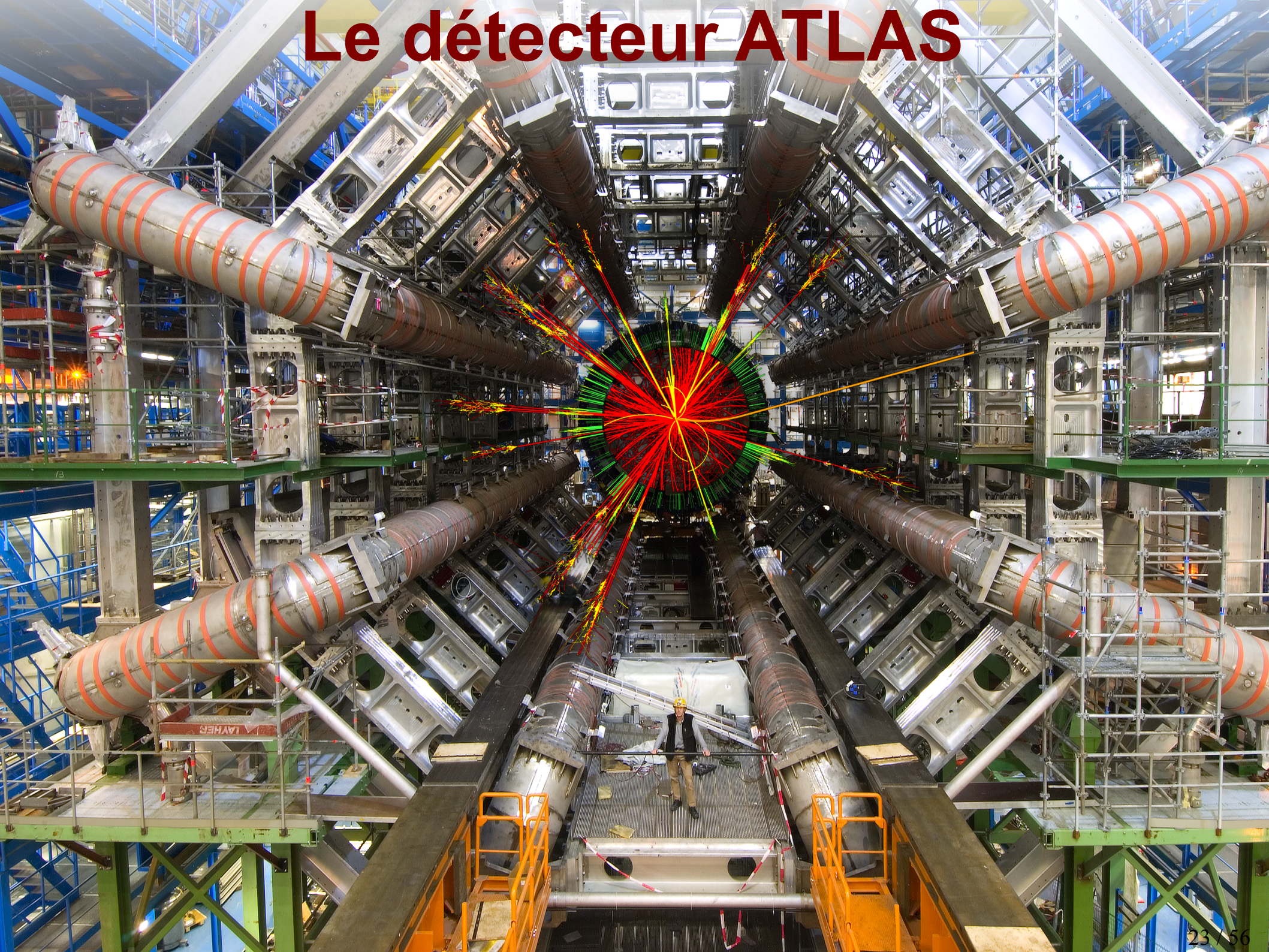
# La collaboration ATLAS



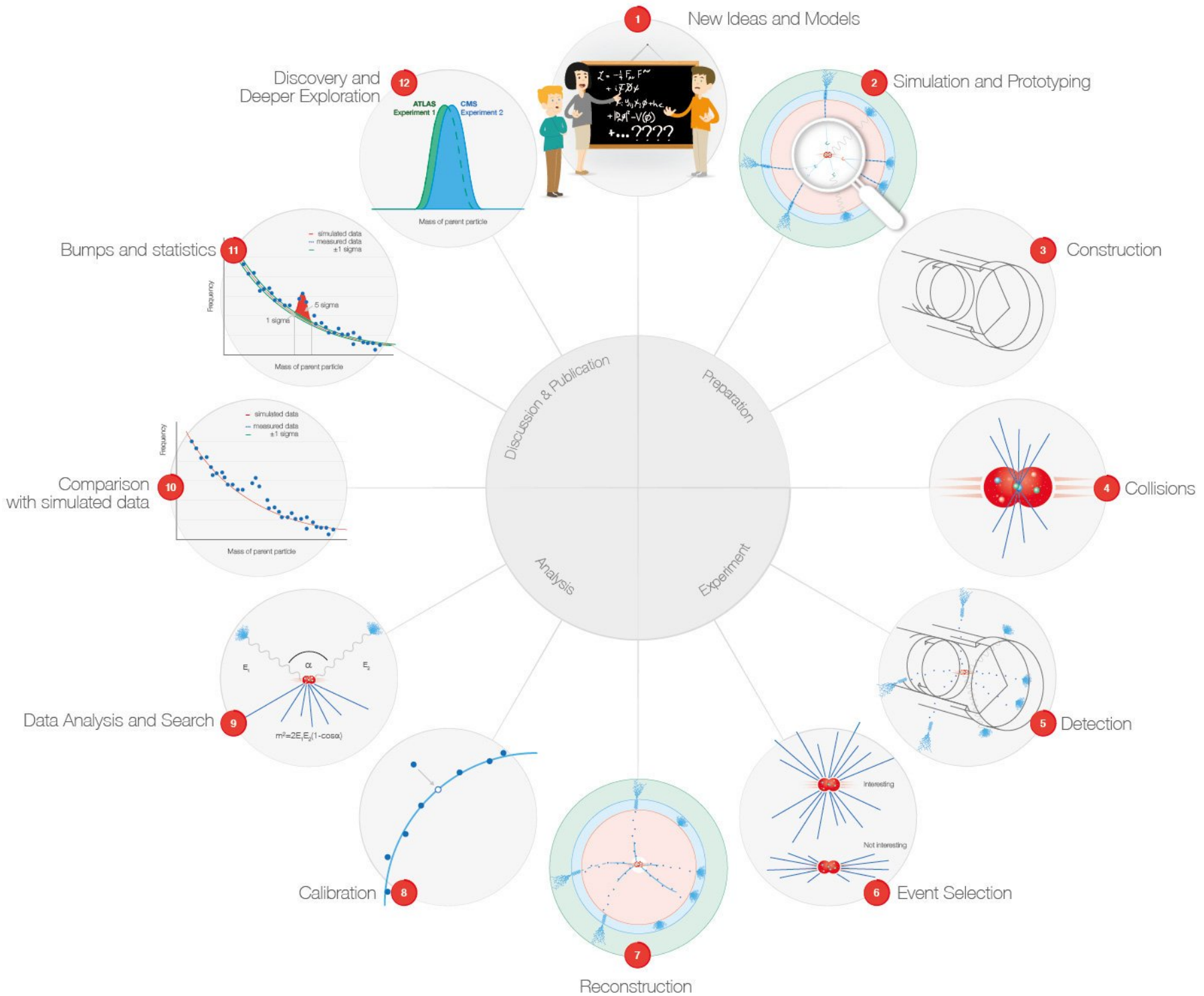
42 pays  
236 instituts  
2900 scientifiques  
<https://atlas.cern>

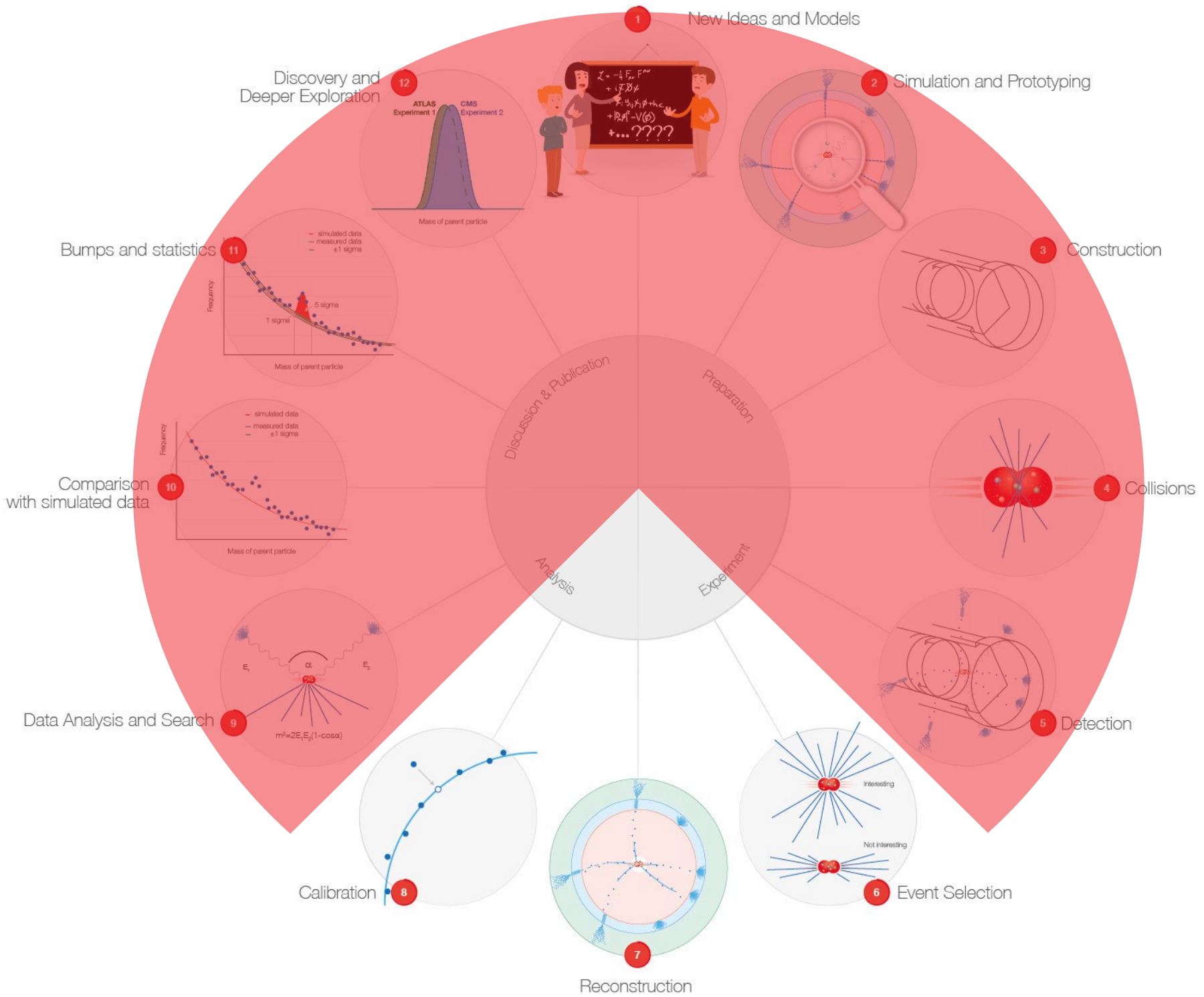


# Le détecteur ATLAS



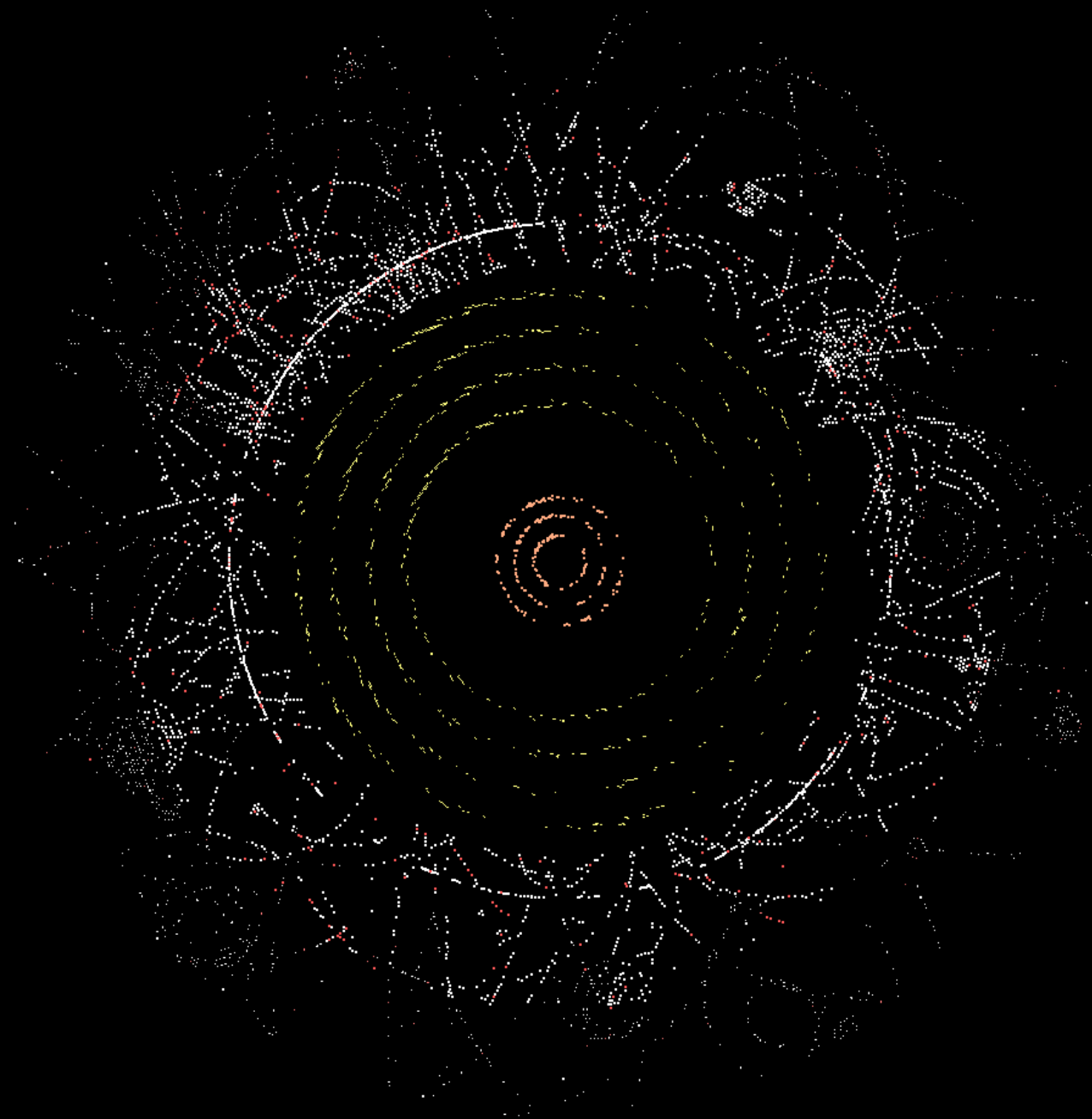








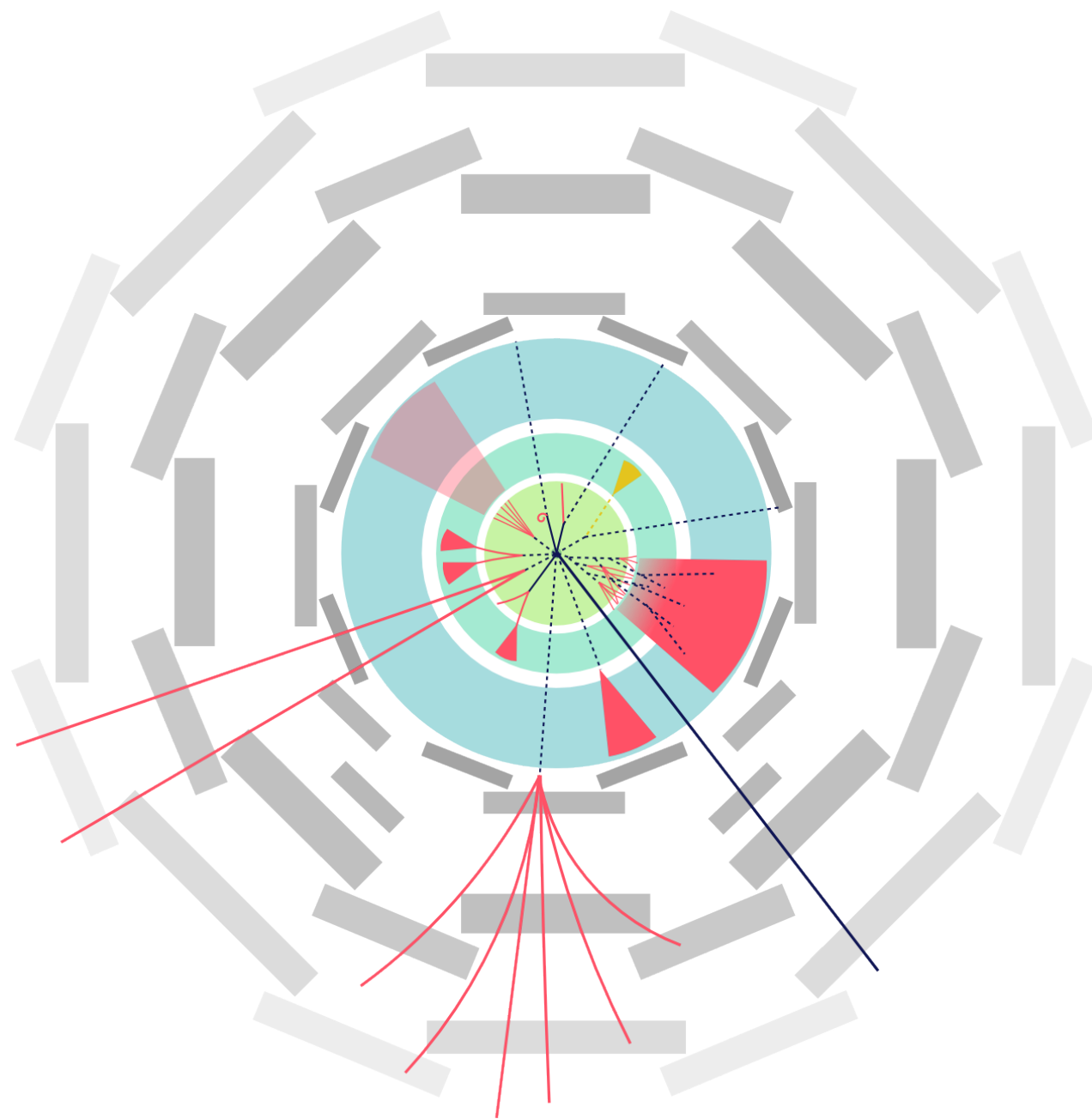
# Passage des particules

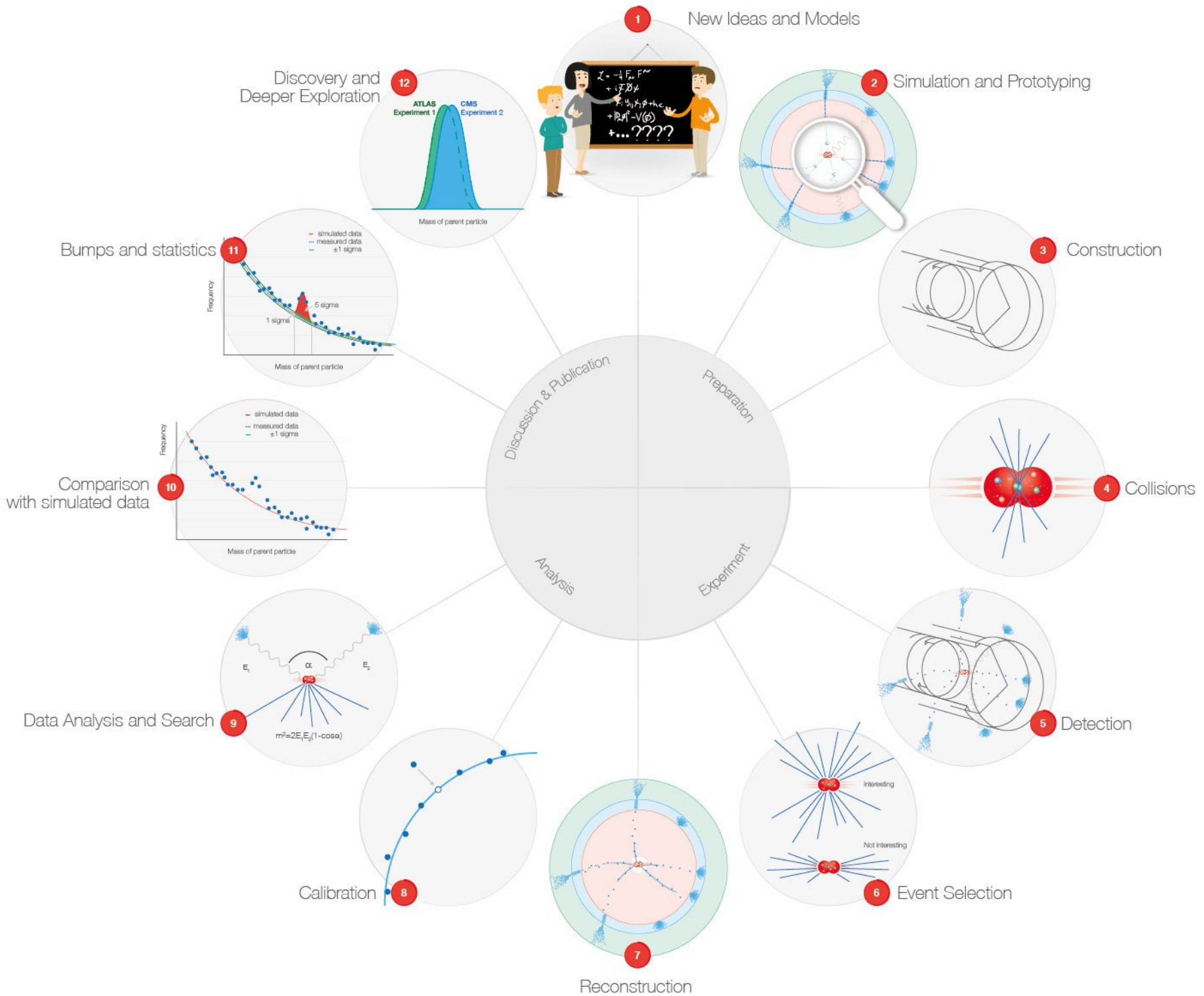


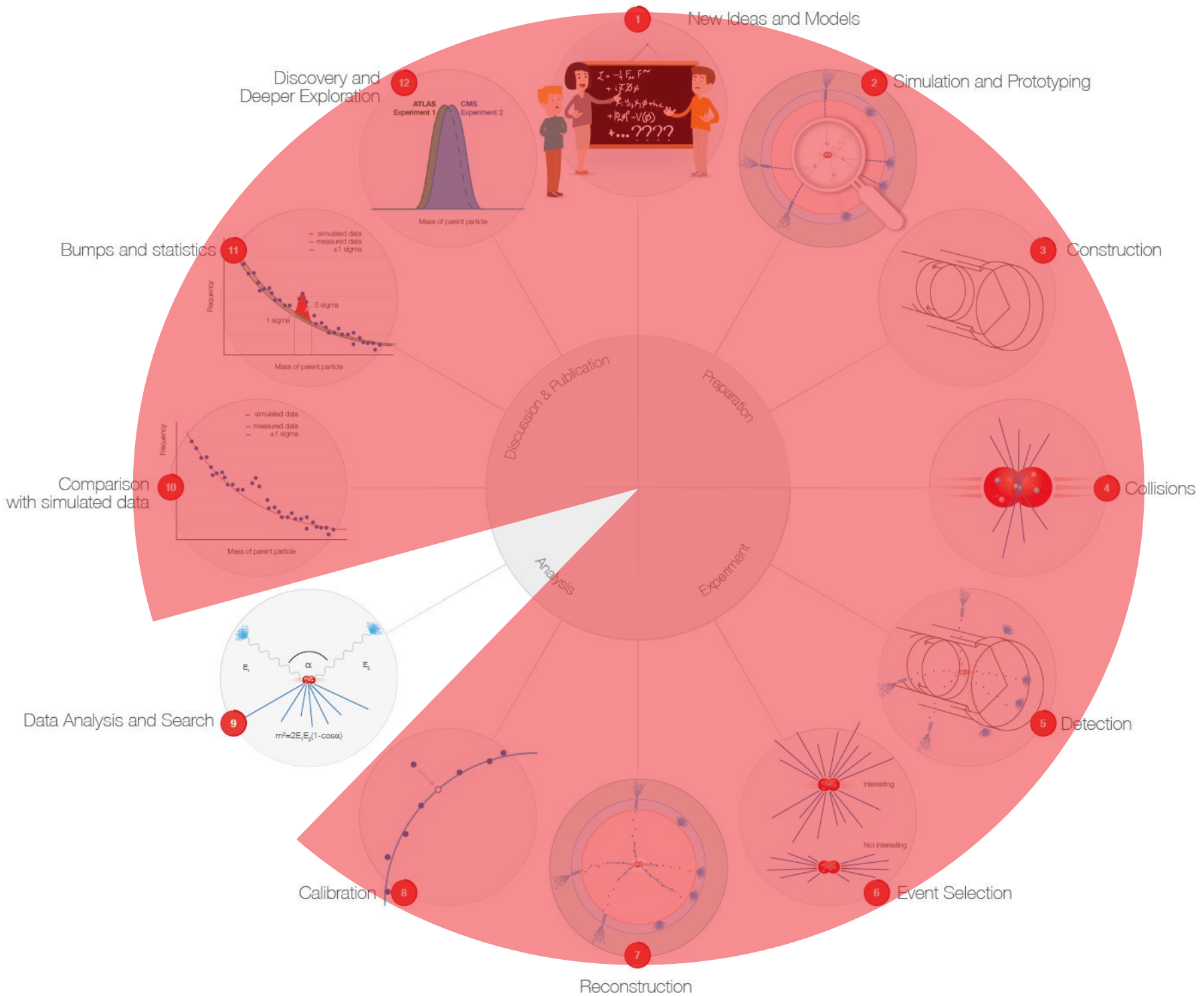
# Reconstruction des trajectoires



# Variété d'objets





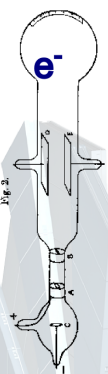




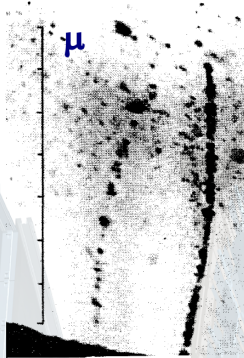
# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

Découverte historique



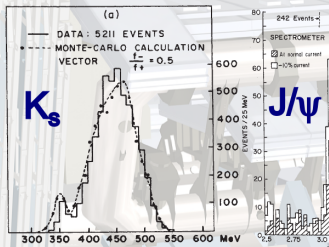
1897



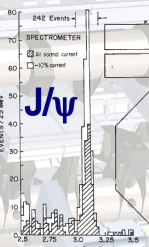
1937



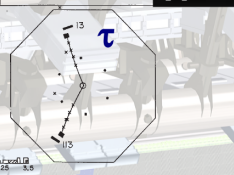
1947



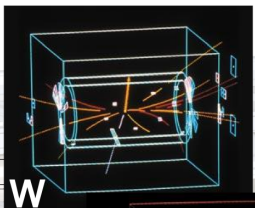
1964



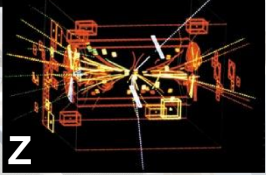
1974



1976

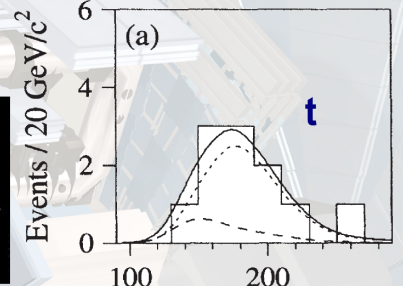


W



Z

1983

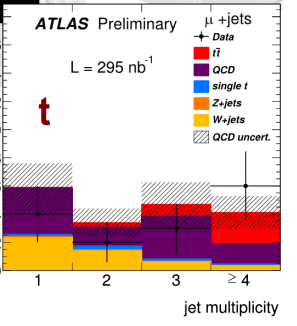
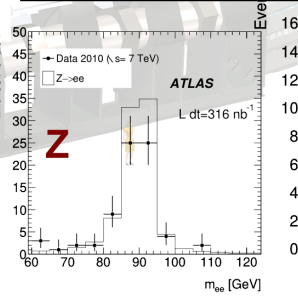
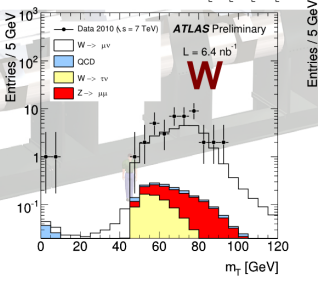
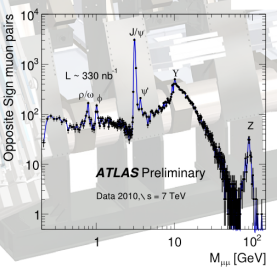
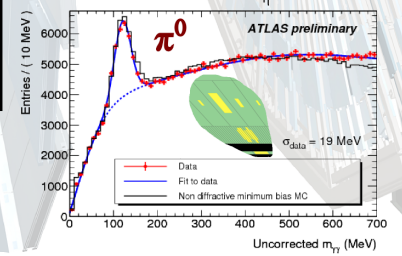
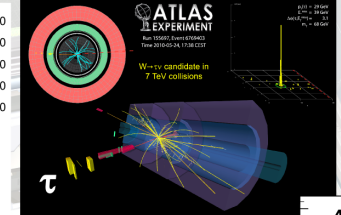
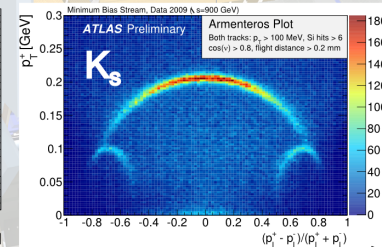
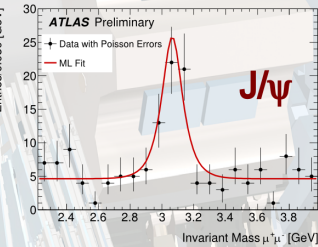
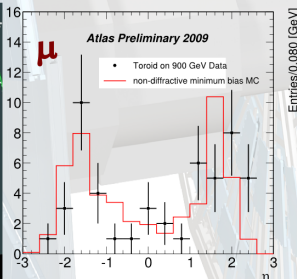
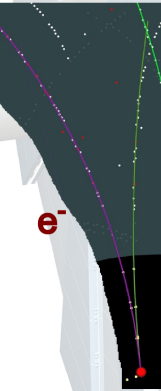


1995

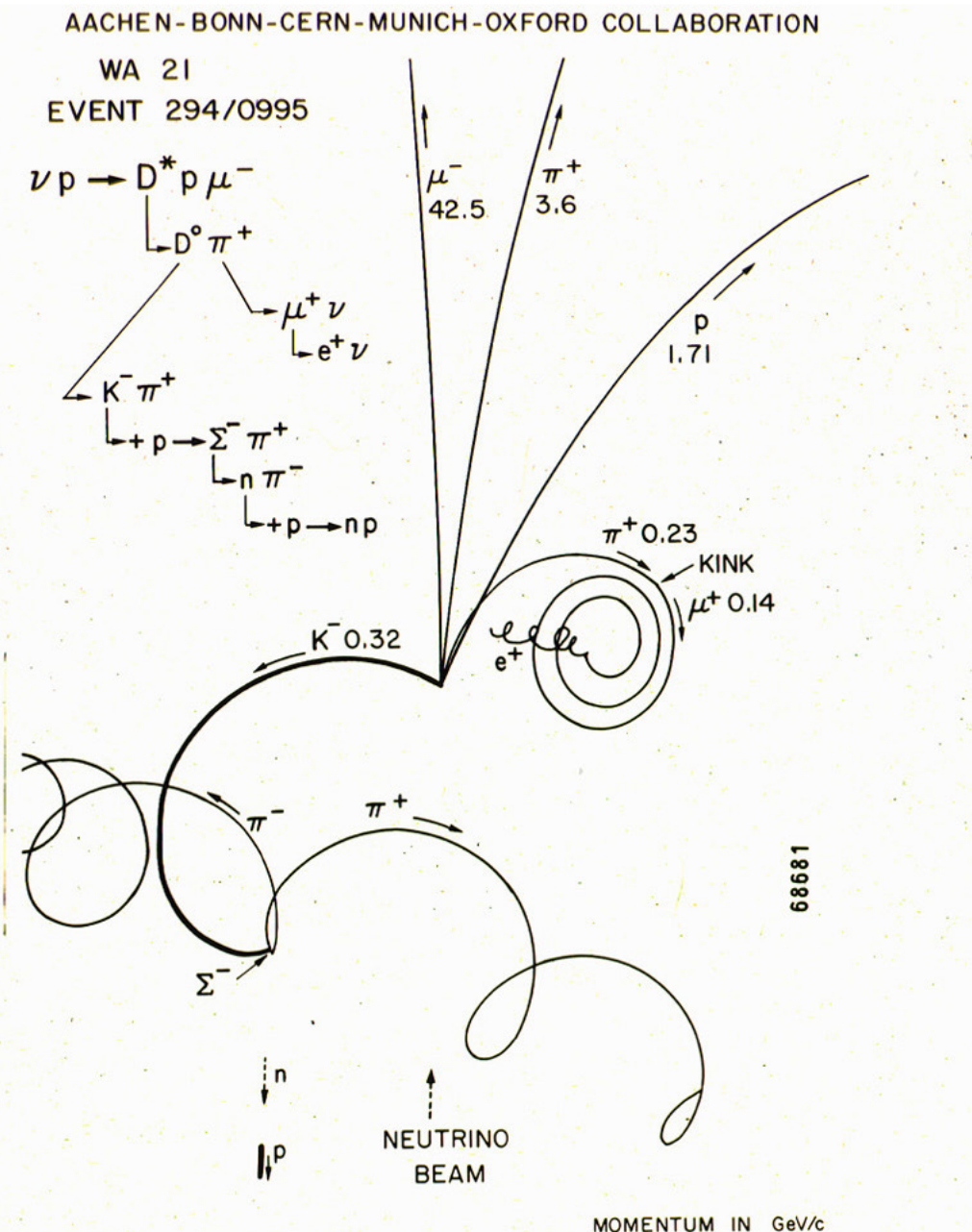
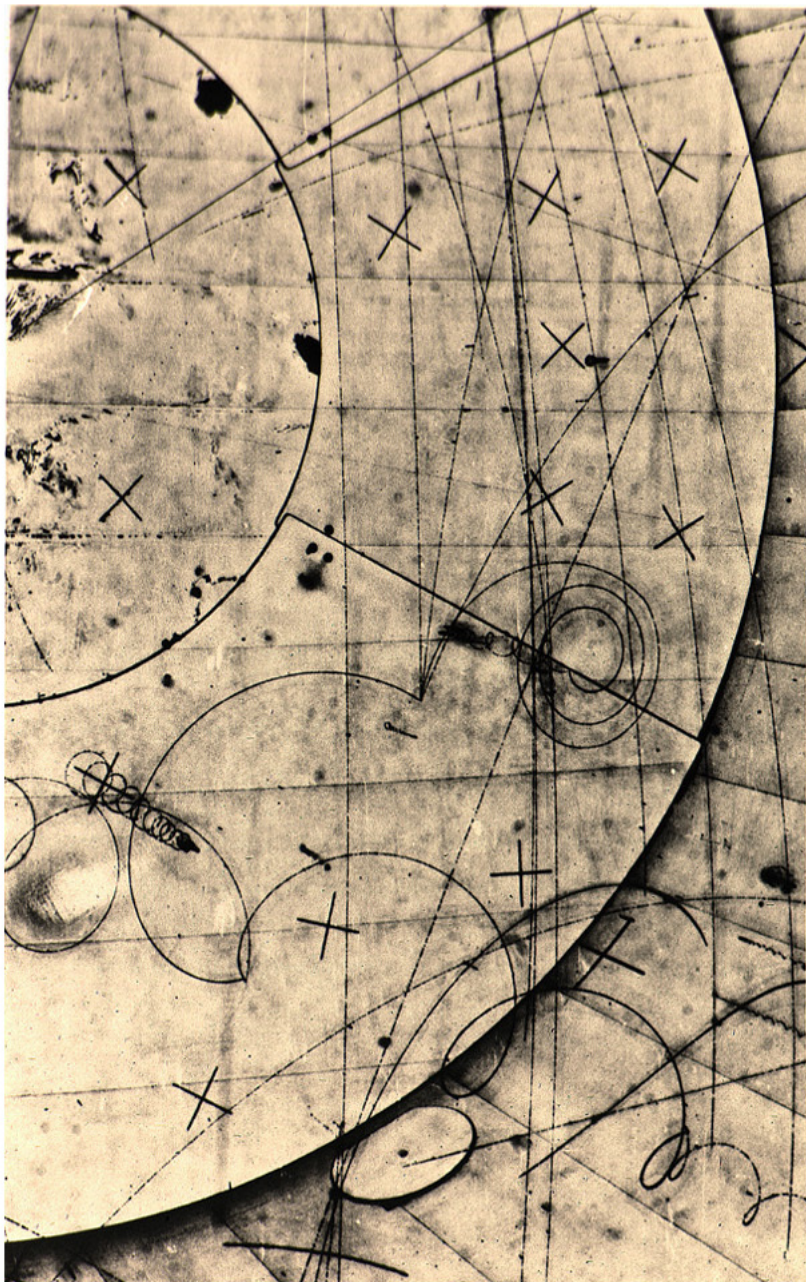
déc 2009

août 2010

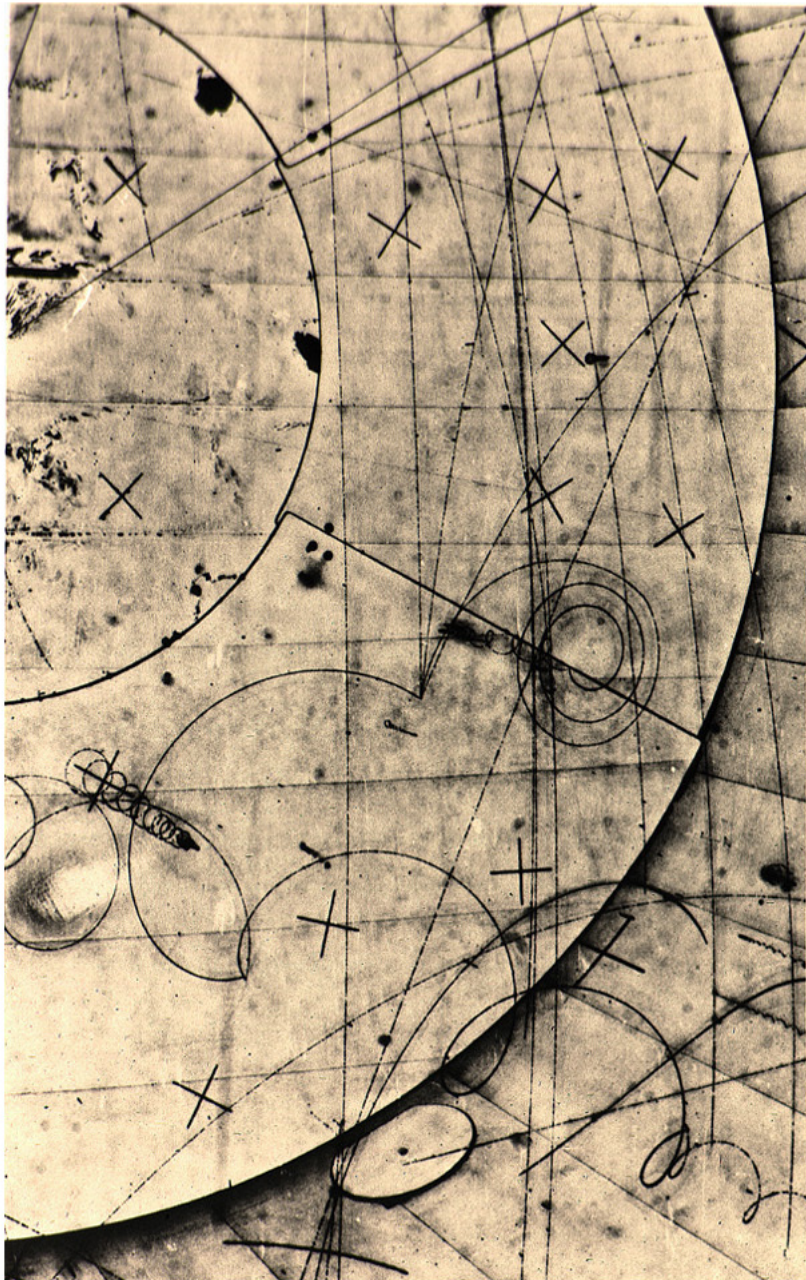
Redécouverte par ATLAS



# « Vraies » photographies



# « Vraies » photographies



AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION

EV  
 $\nu p$



KINK

.14



68681

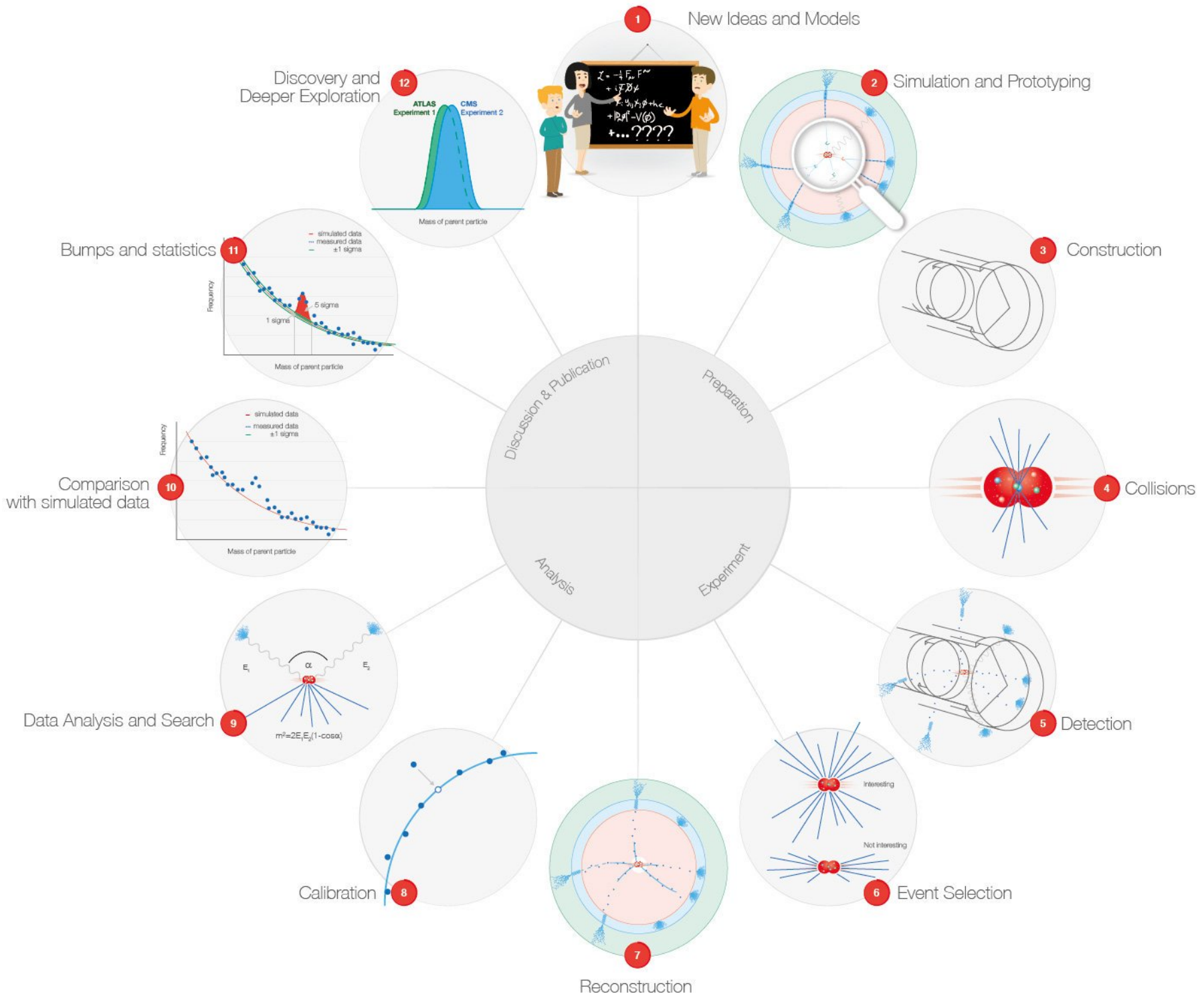
$n$   
 $p$

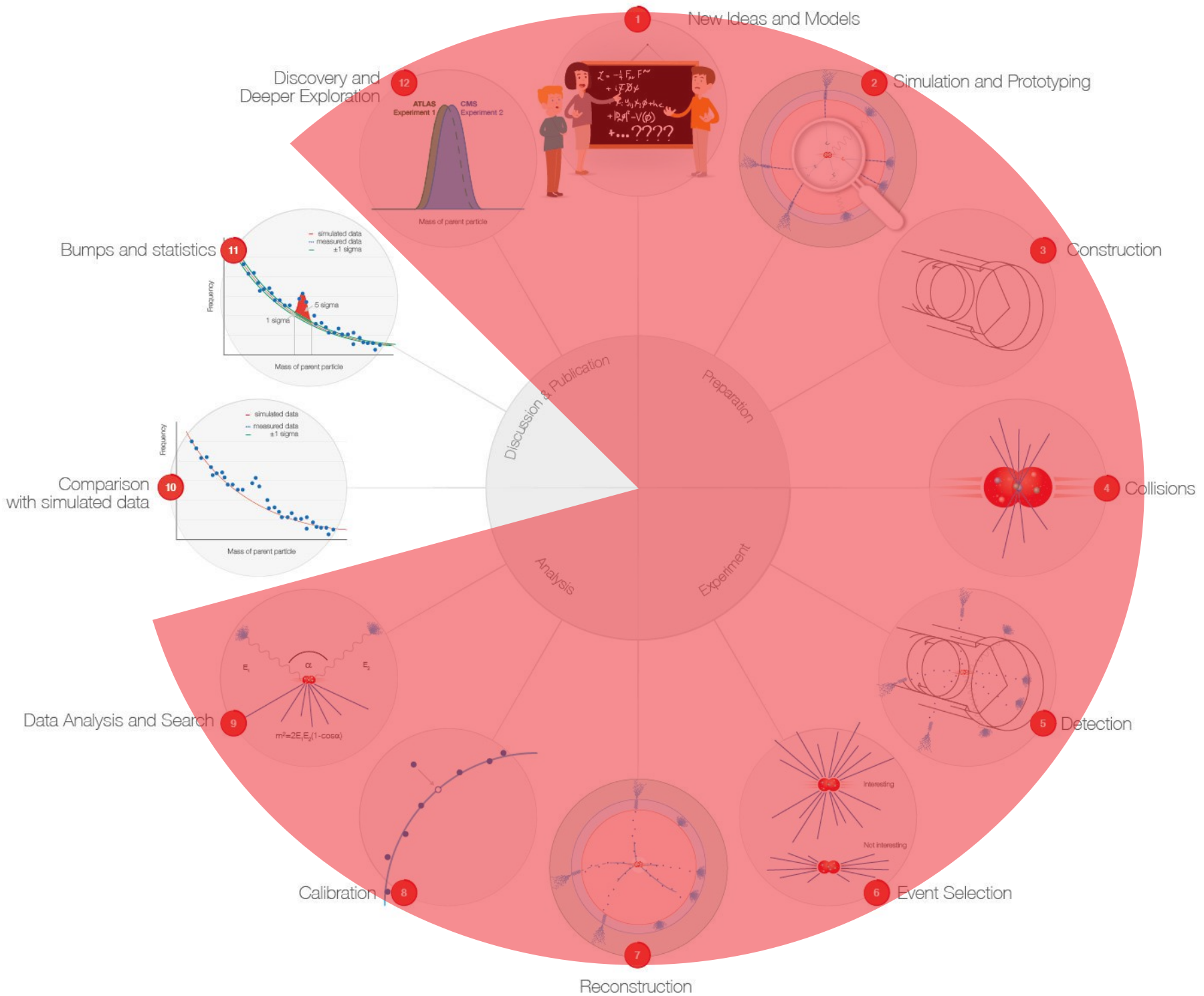
NEUTRINO  
BEAM

MOMENTUM IN GeV/c



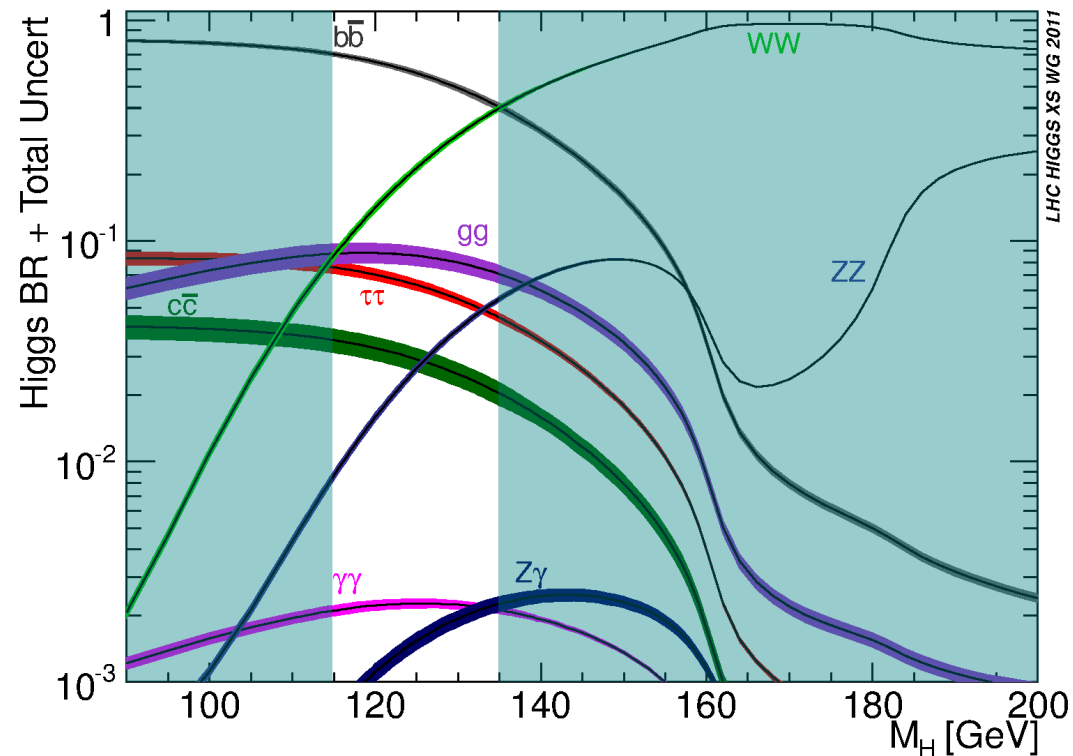
Accélérateur de science





# 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

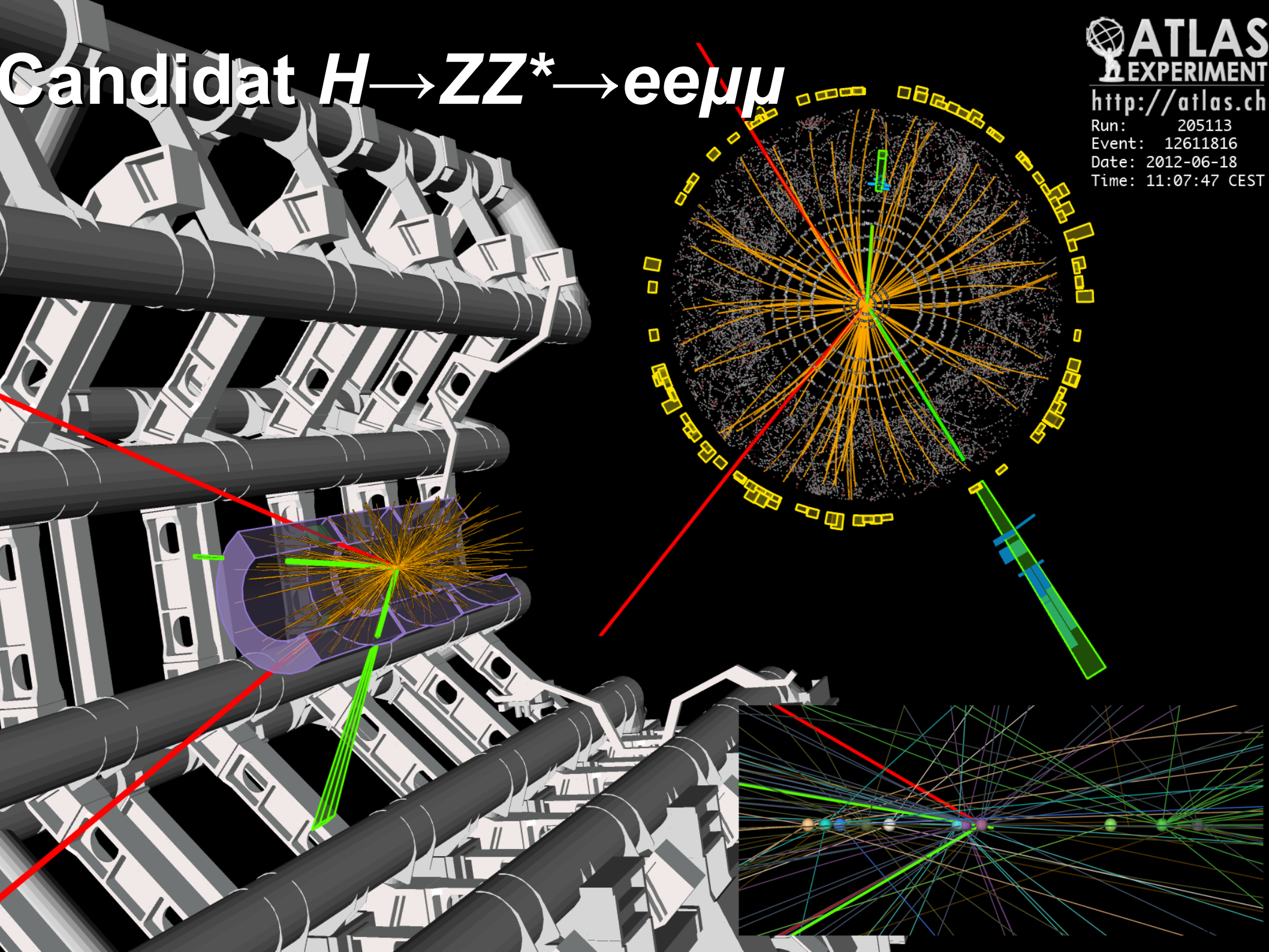




# Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

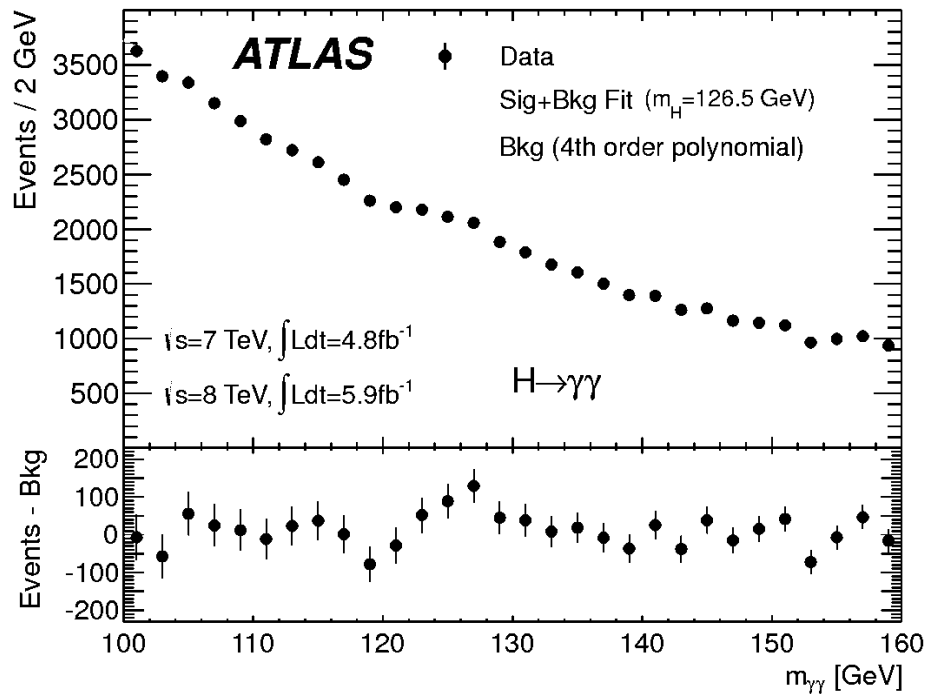


# Candidate $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow ee\mu\mu$



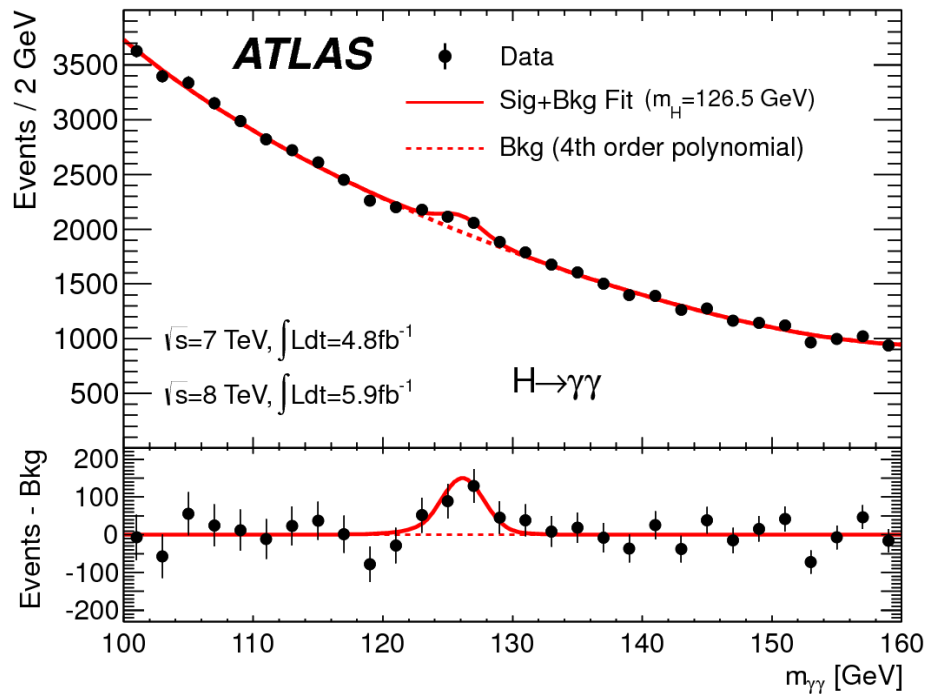
# Mesure

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



# Mesure

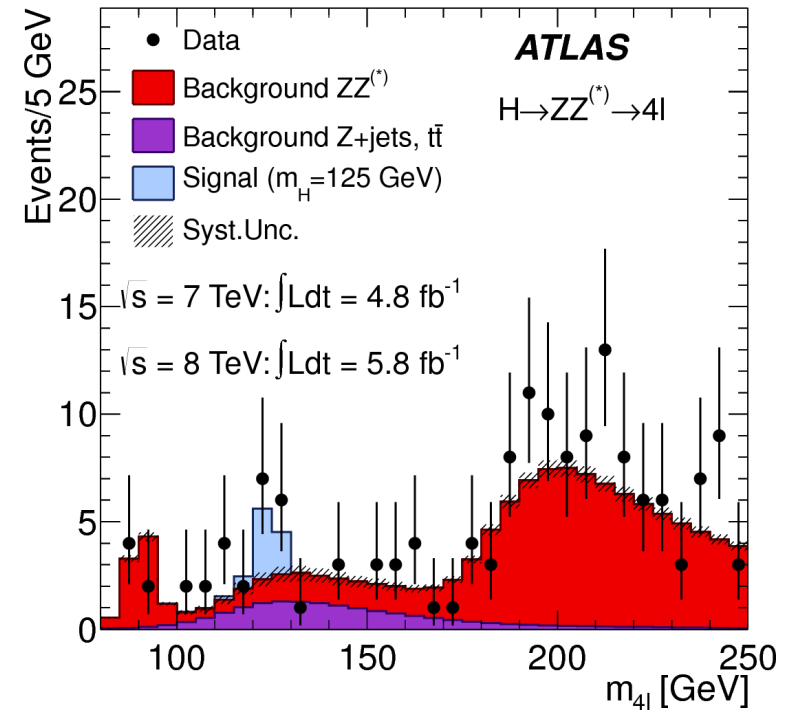
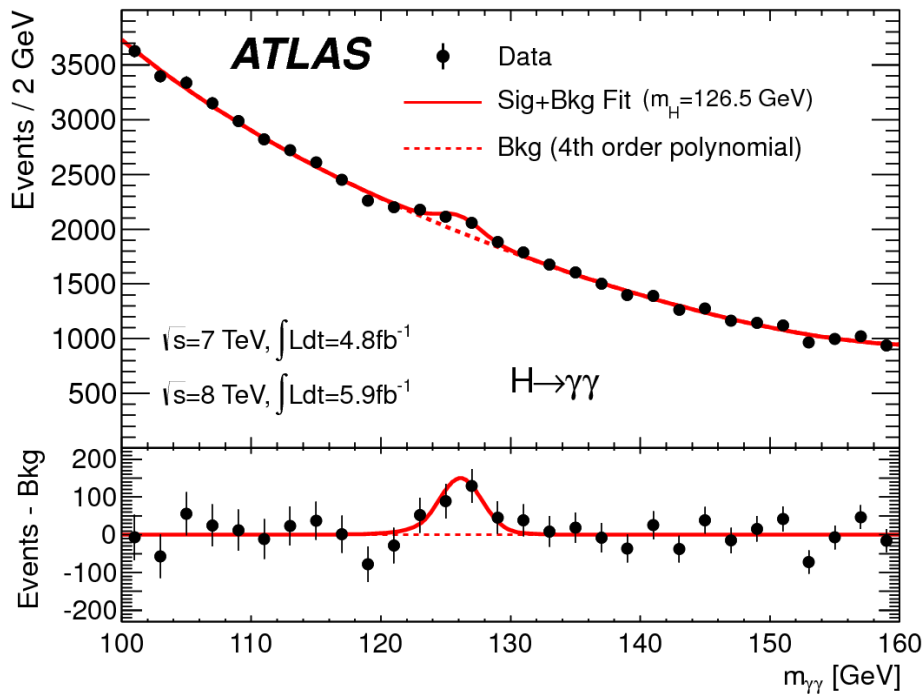
- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



# Mesure

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

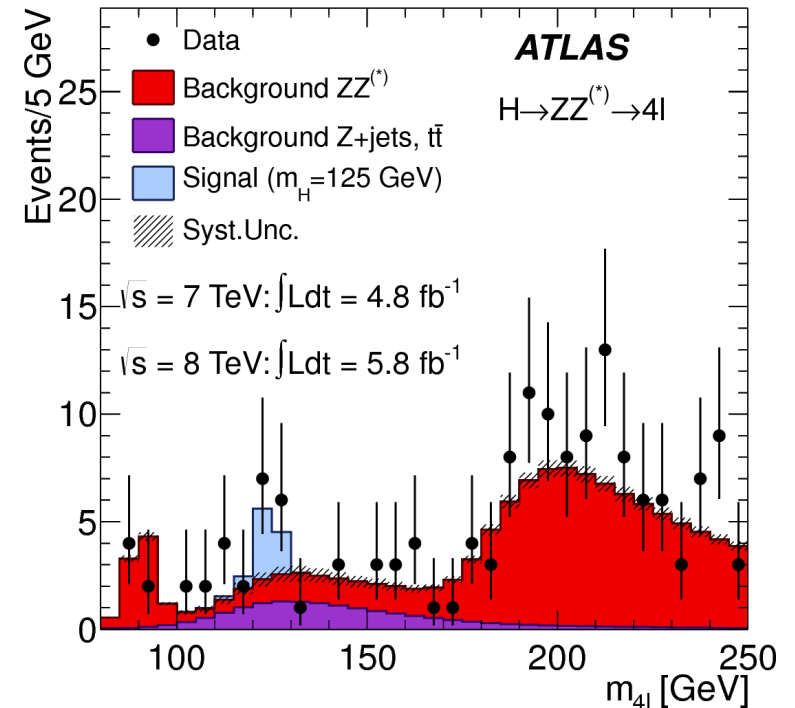
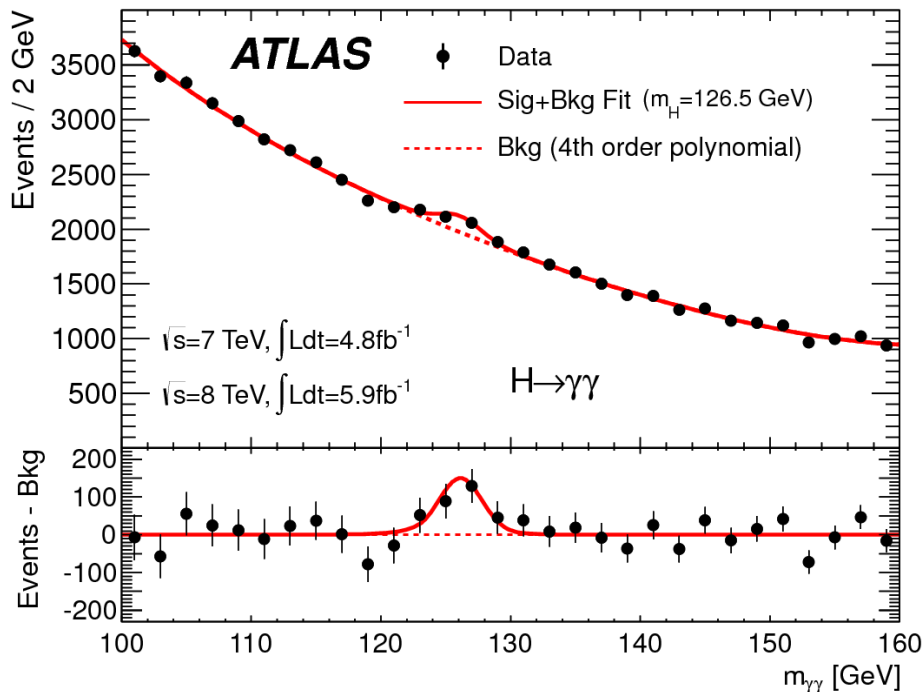
- Higgs en ZZ
  - ▶ Très peu de bruit de fond
  - ▶ Très peu d'événements



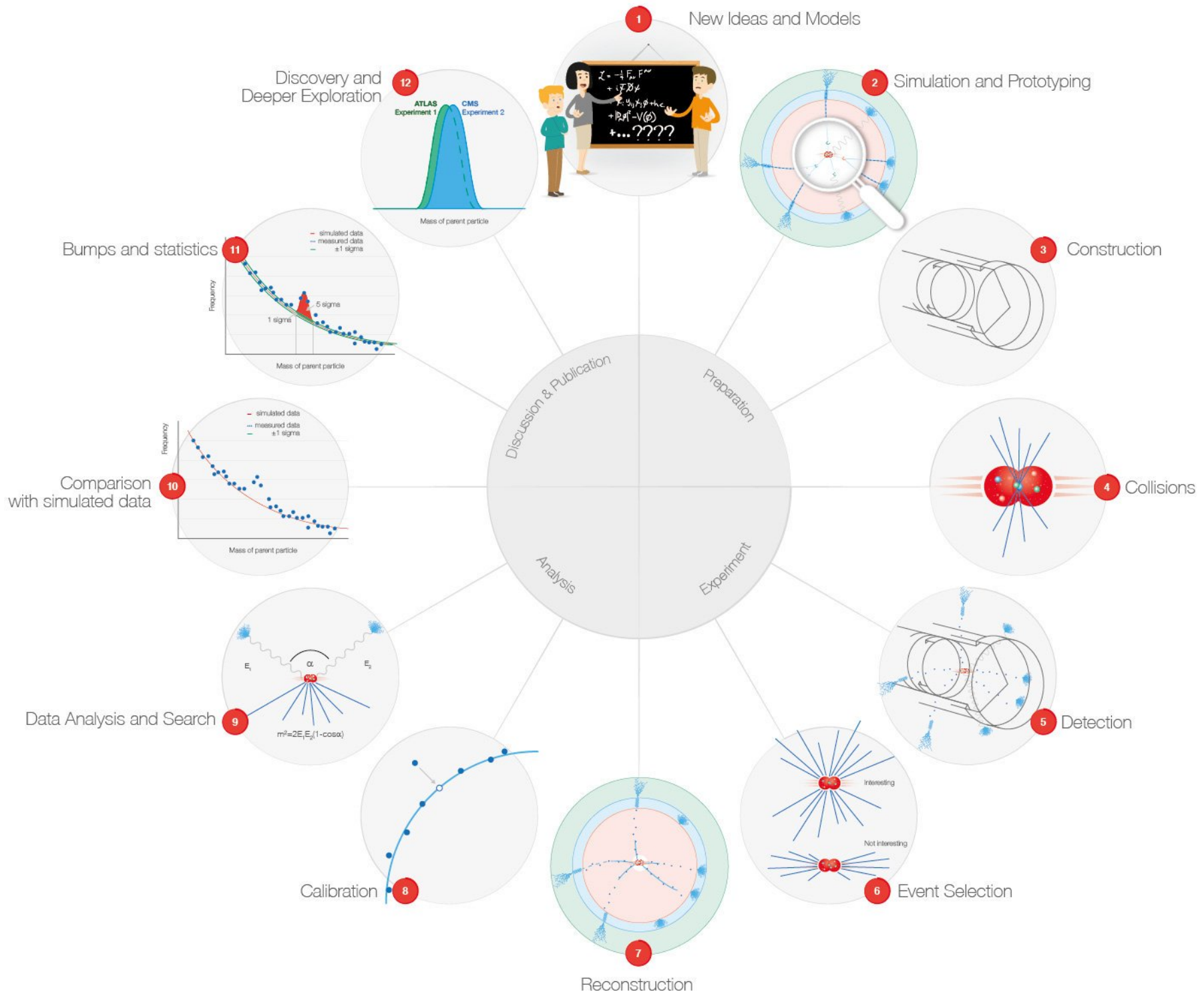
# Mesure

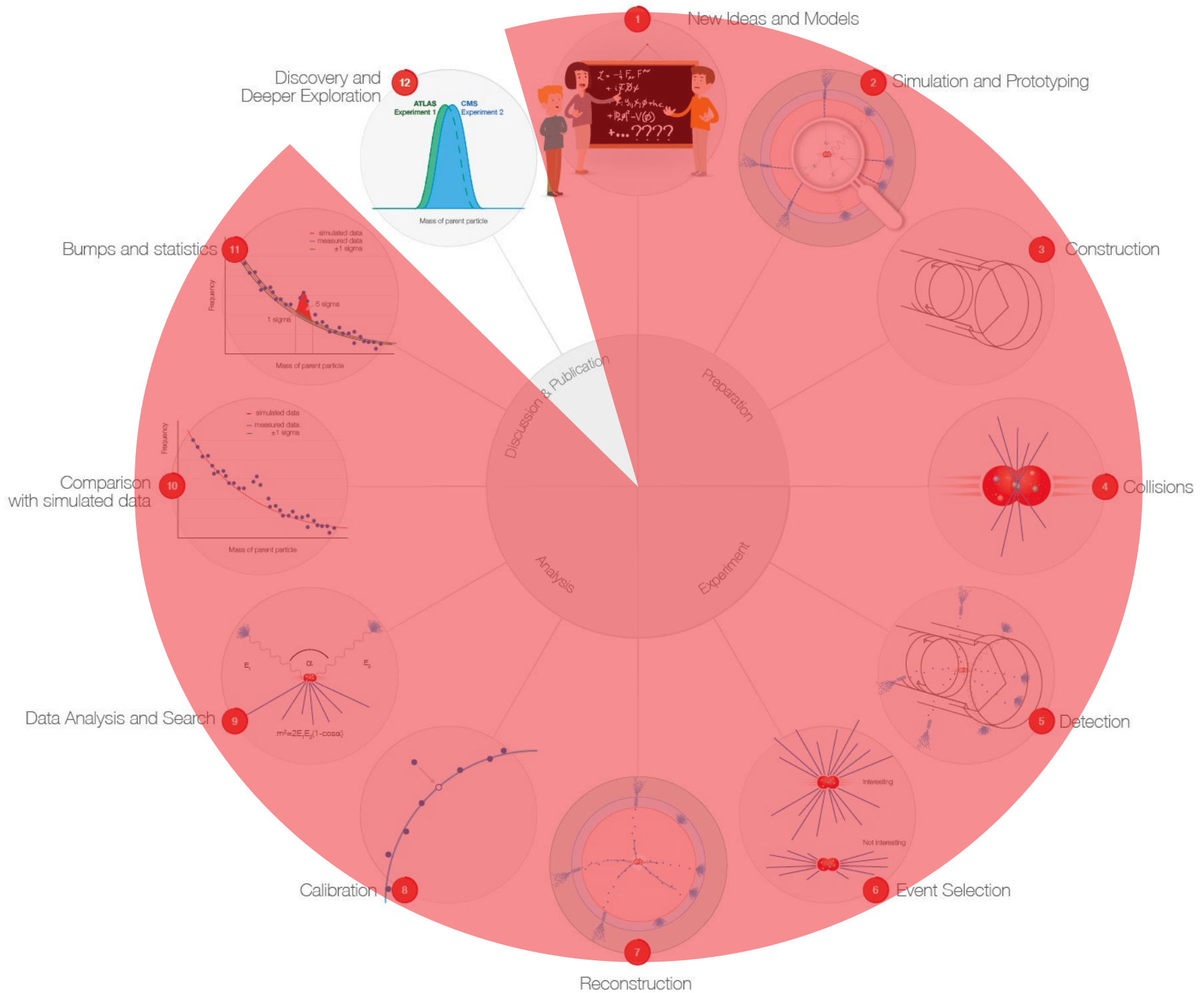
- Higgs en 2 photons
  - ▶ Bruit de fond important
  - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

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



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



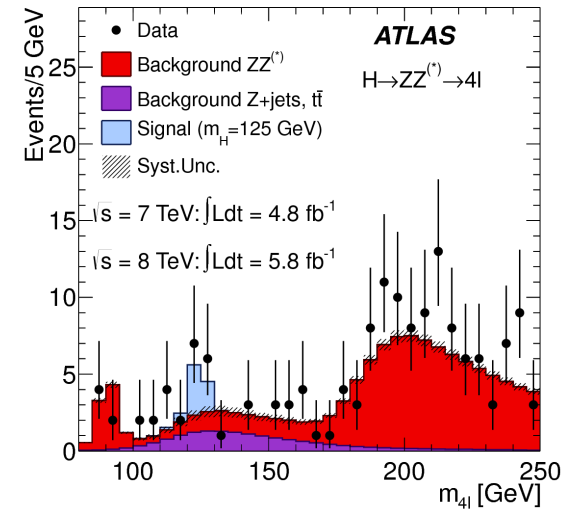
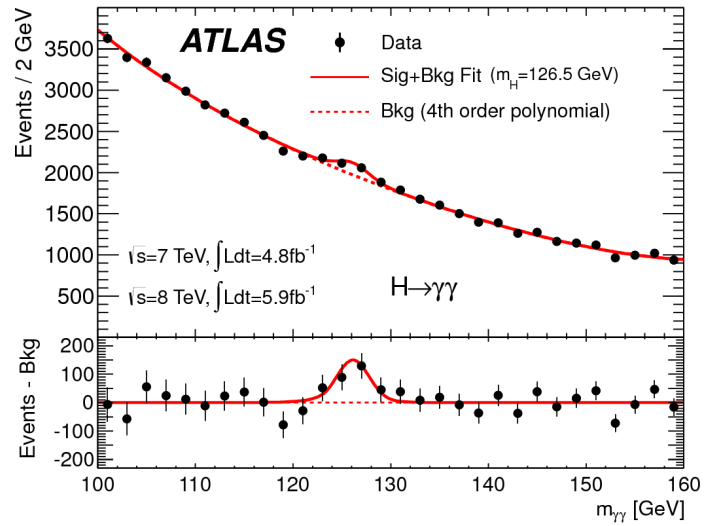




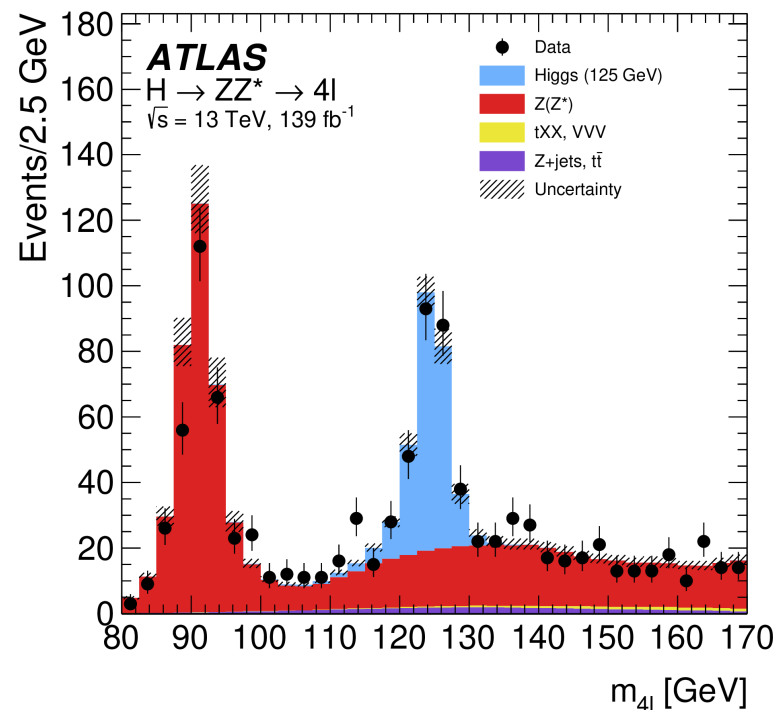
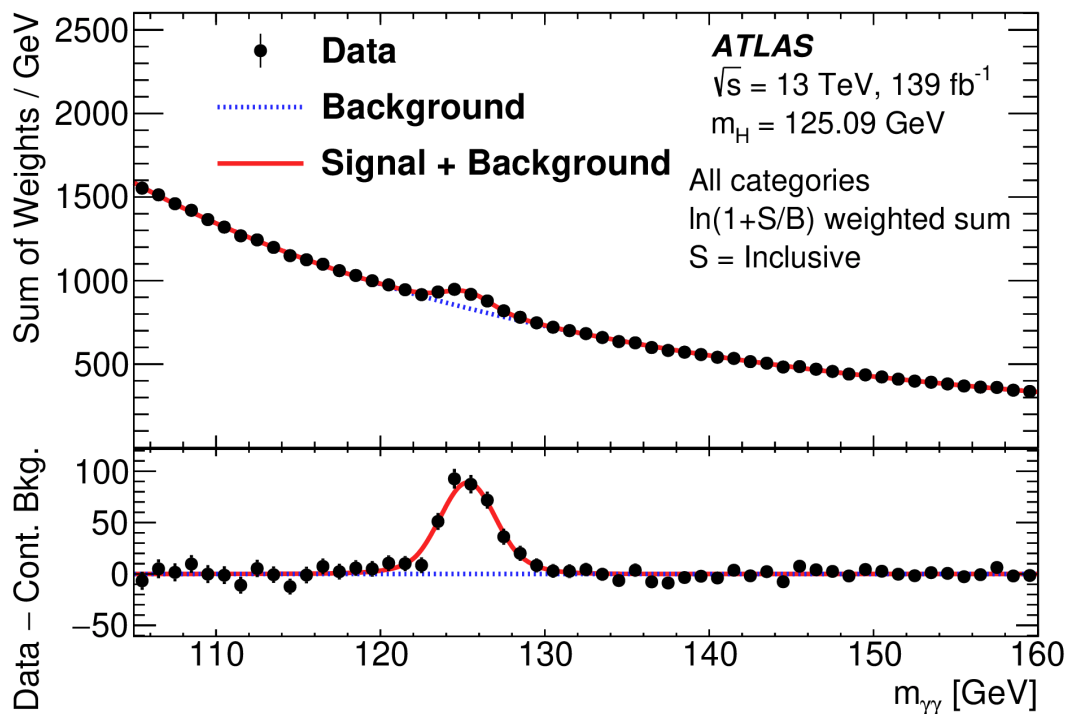
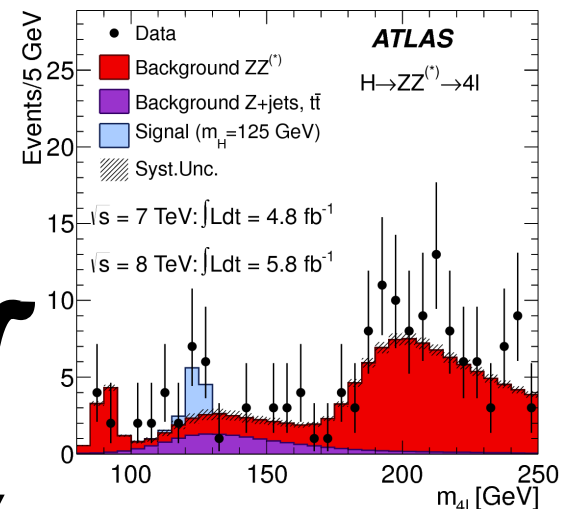
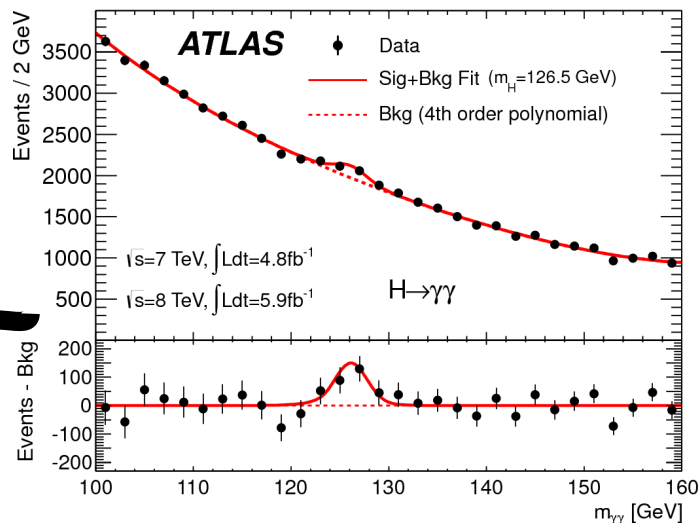
# Découverte du boson de Higgs annoncée le 4 juillet 2012



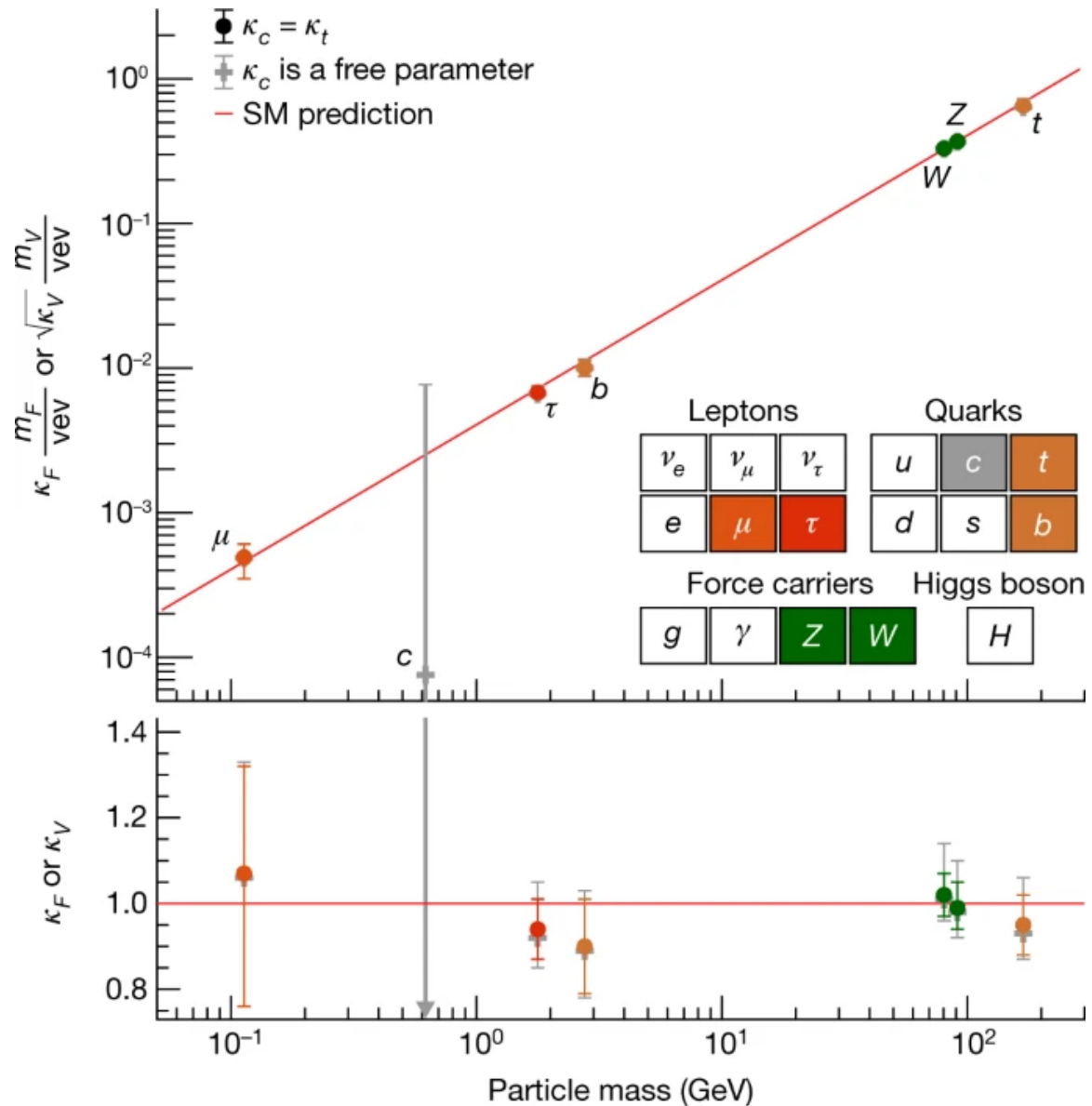
# Hier...



# Hier... et aujourd'hui



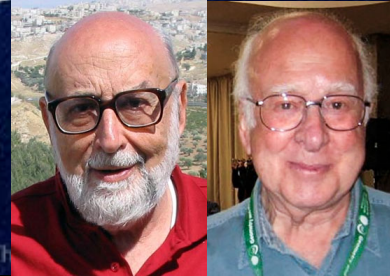
# Masse des particules et couplage au boson de Higgs



# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

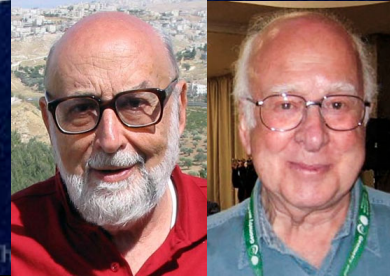


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

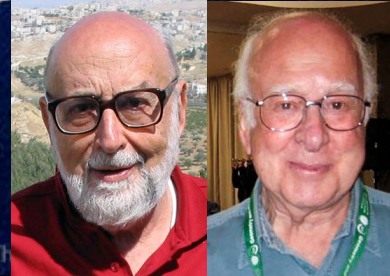


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



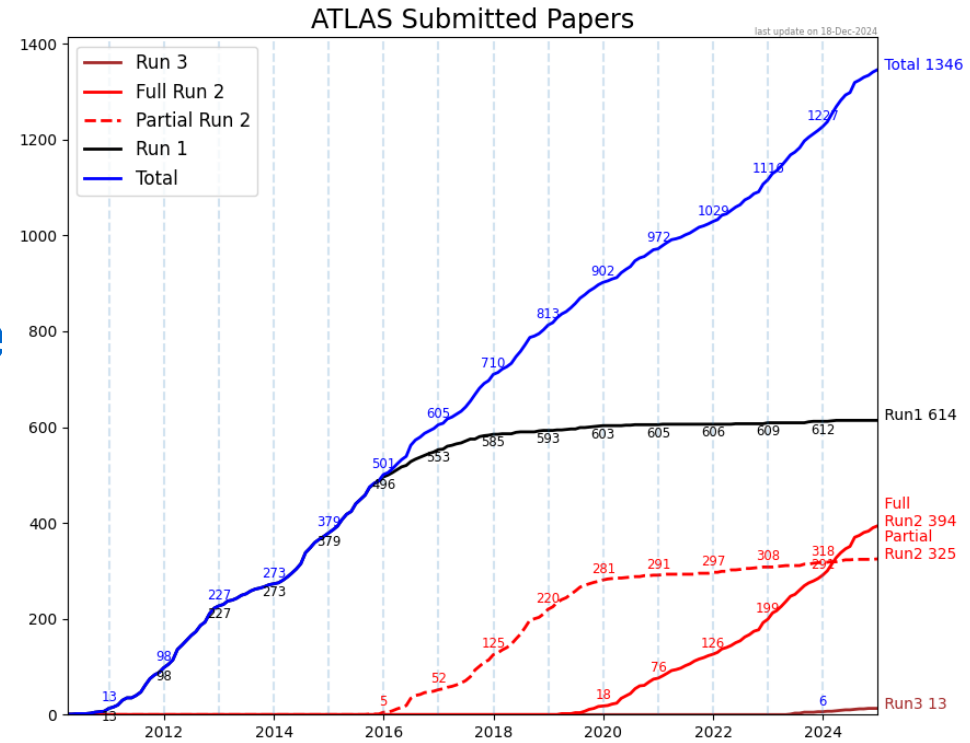
« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



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

# Publications

- ATLAS :
  - ▶ >1300 publications
  - ▶ >1200 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
  - ▶ ~700 publications
- ALICE :
  - ▶ > 470 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

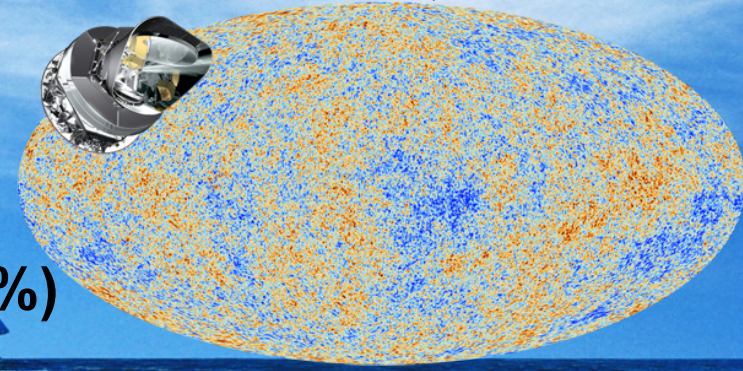
68% Énergie noire

Reste à découvrir !



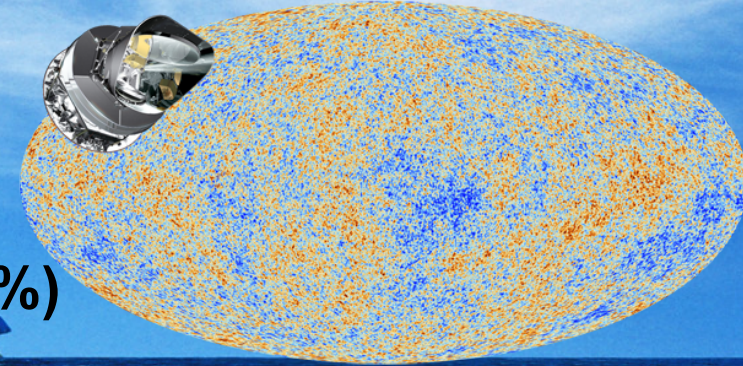
© Render by Jonathan Rey

**Ce que l'on connaît (5%)**



**27% Matière noire**

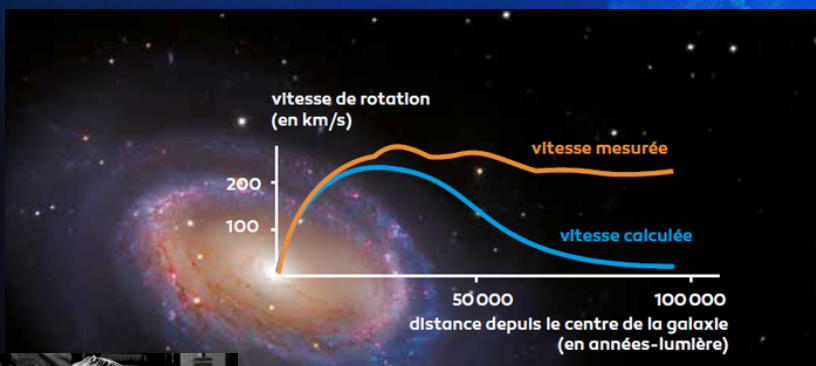
**68% Énergie noire**



Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

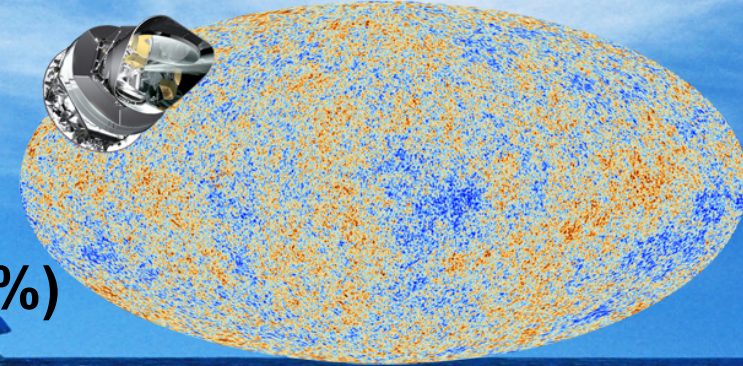
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



68% Énergie noire



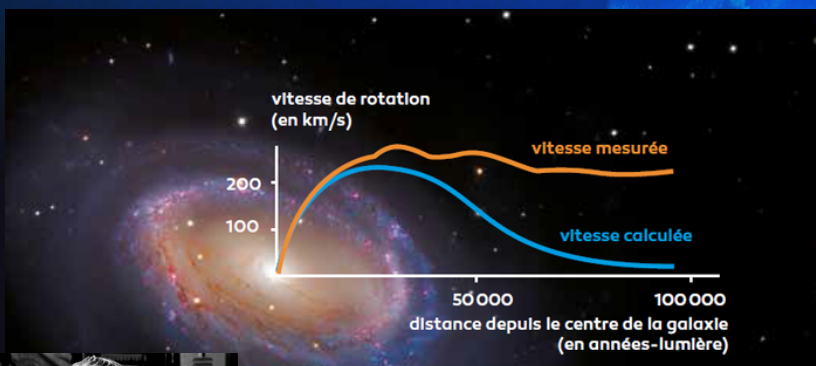
Vera Rubin



Ce que l'on connaît (5%)

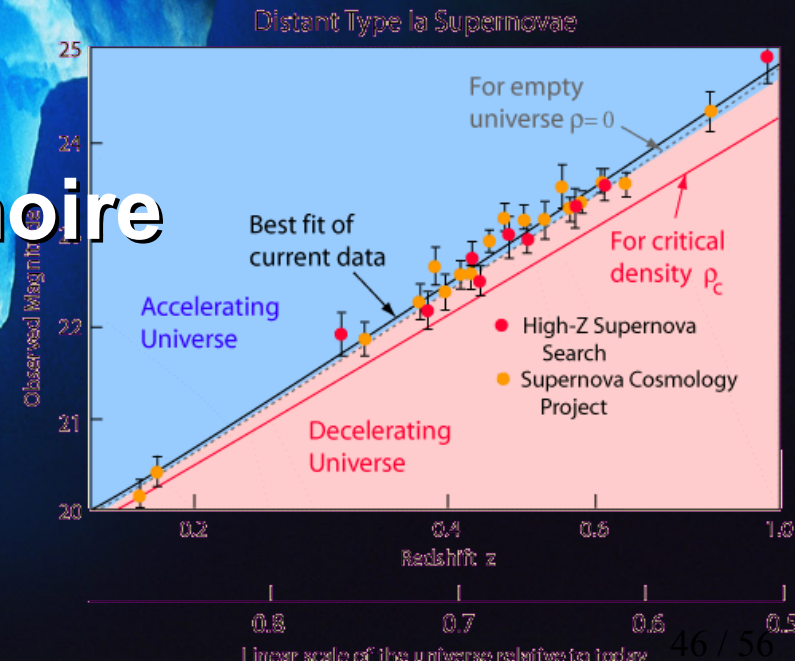
27% Matière noire

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



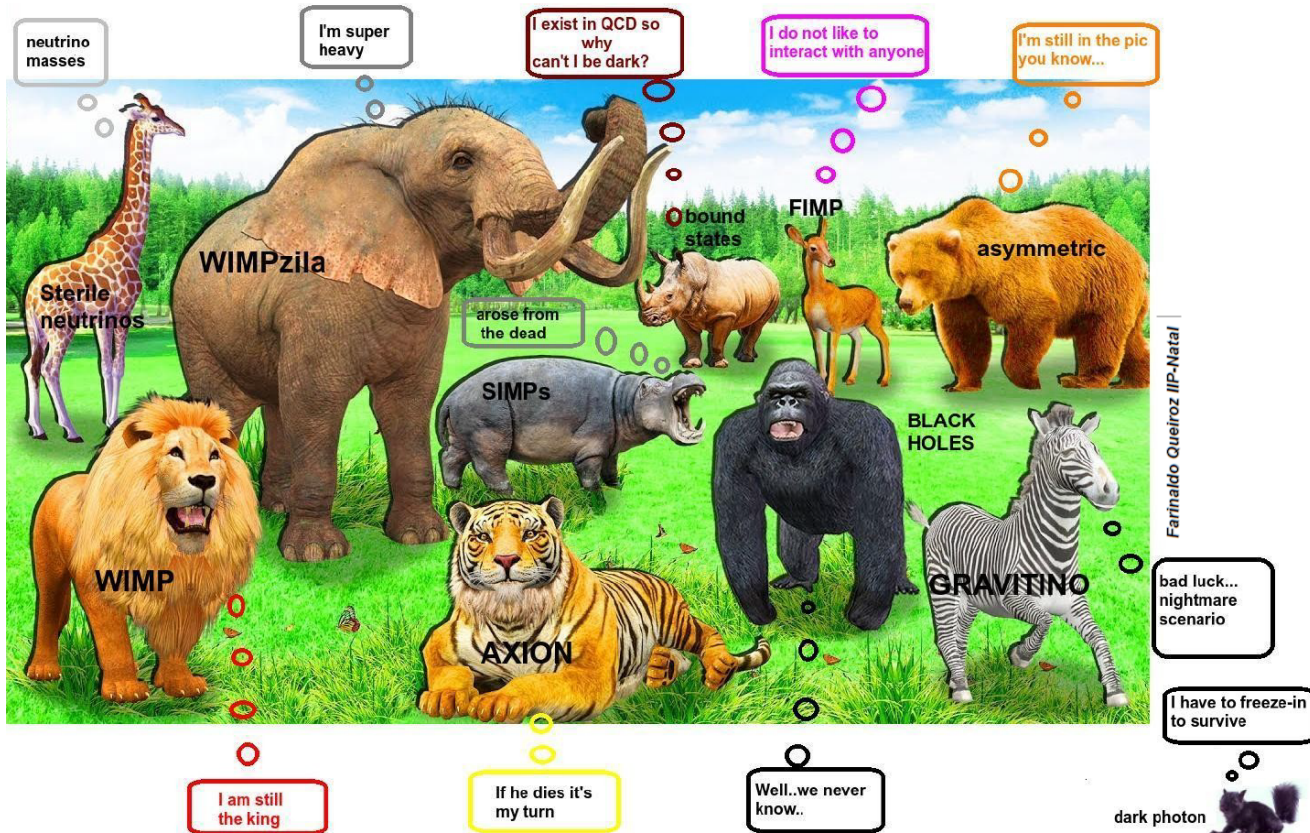
Vera Rubin

68% Énergie noire

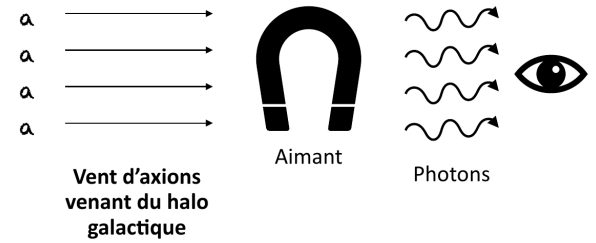


Pas la moindre idée de son origine !

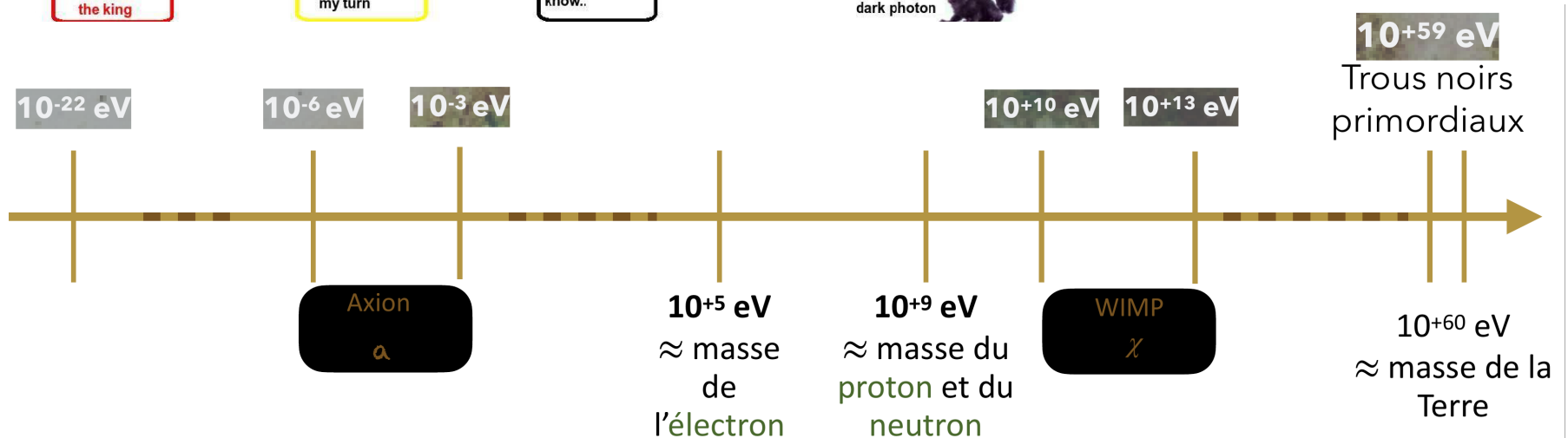
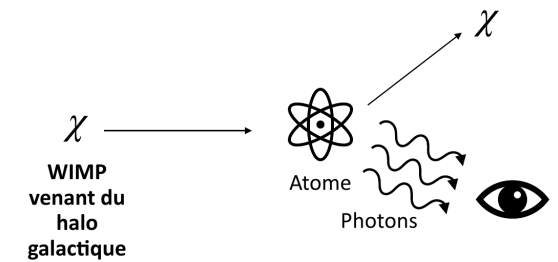
# Candidats matière noire

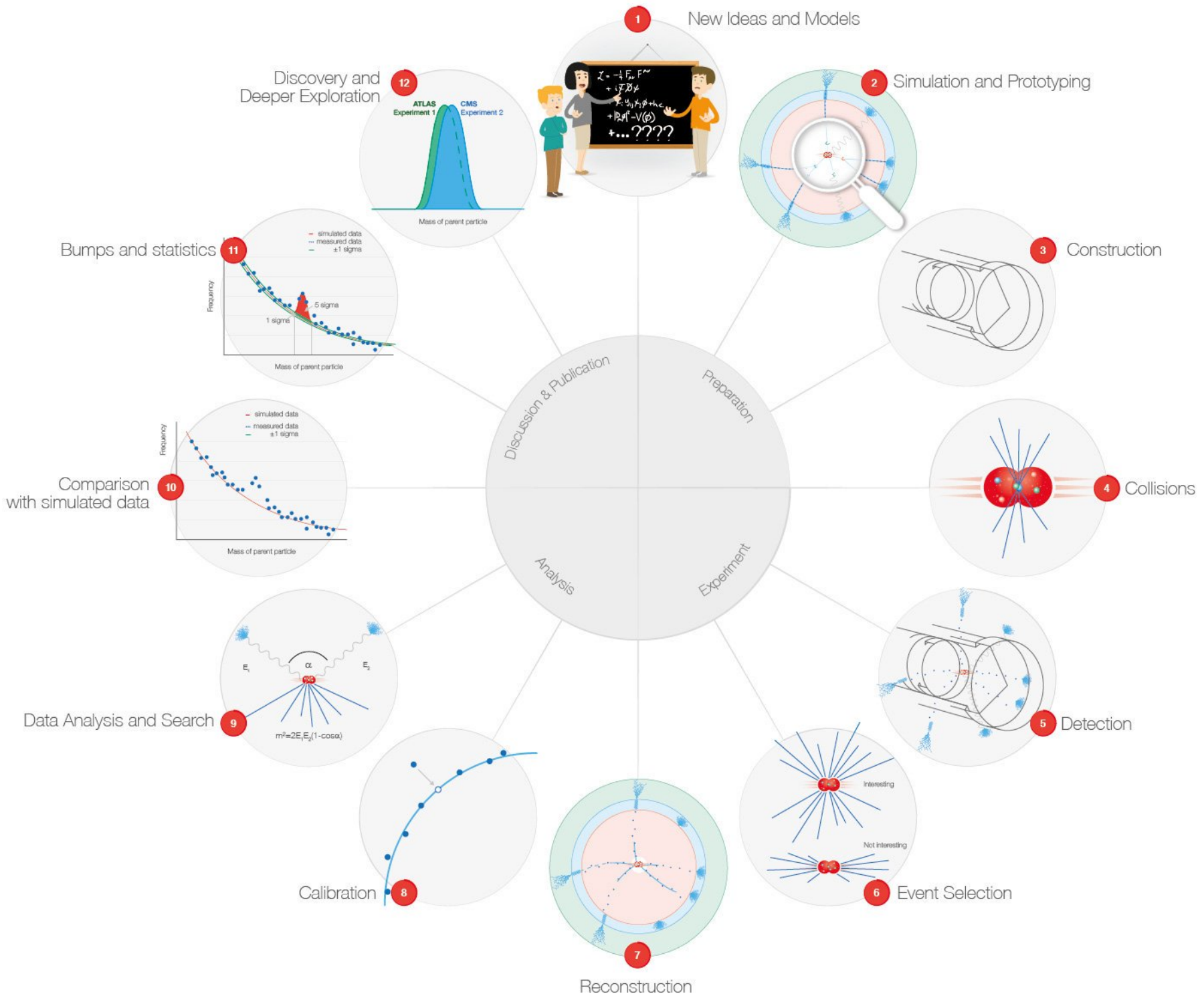


## L'axion

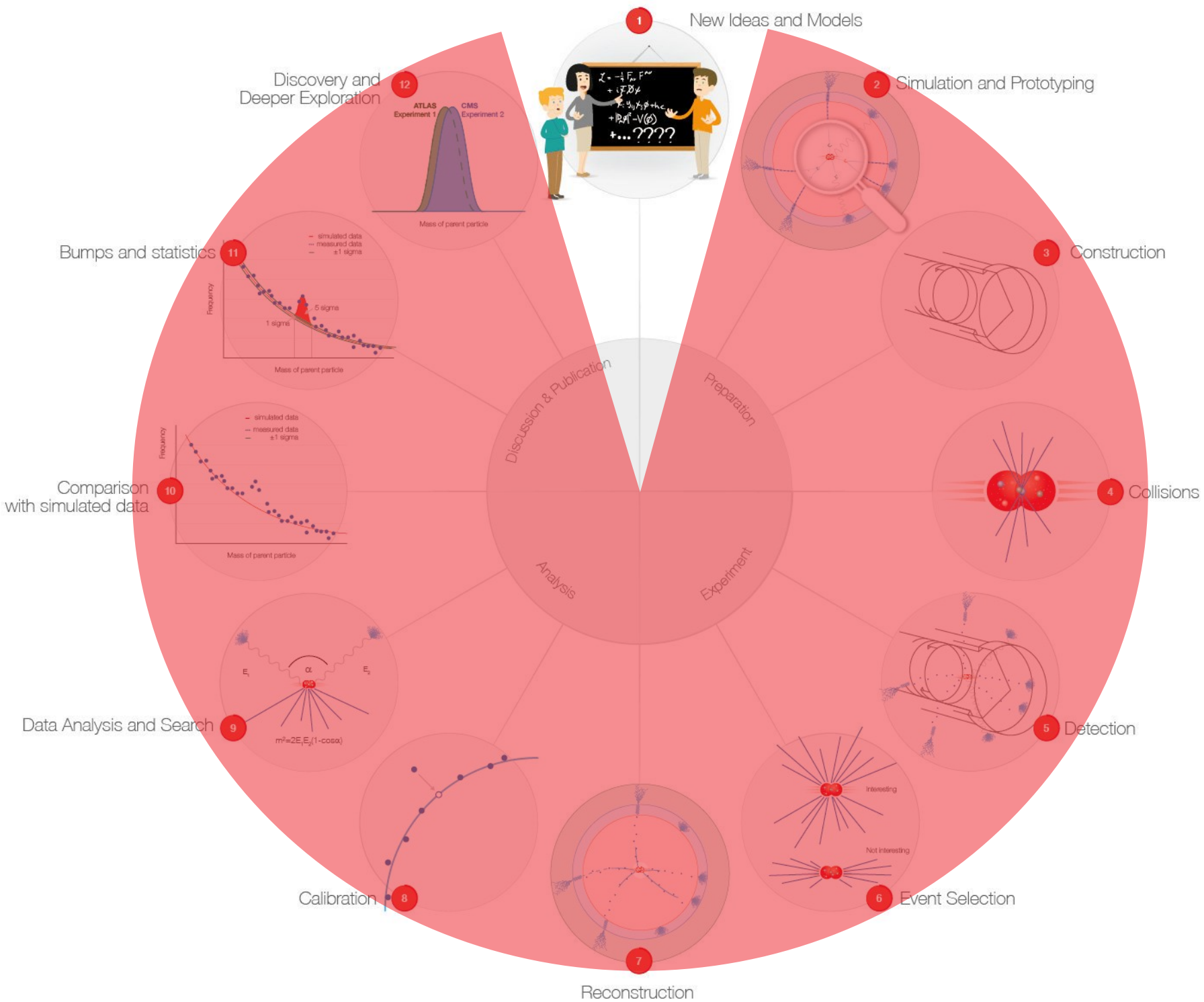


## Le WIMP



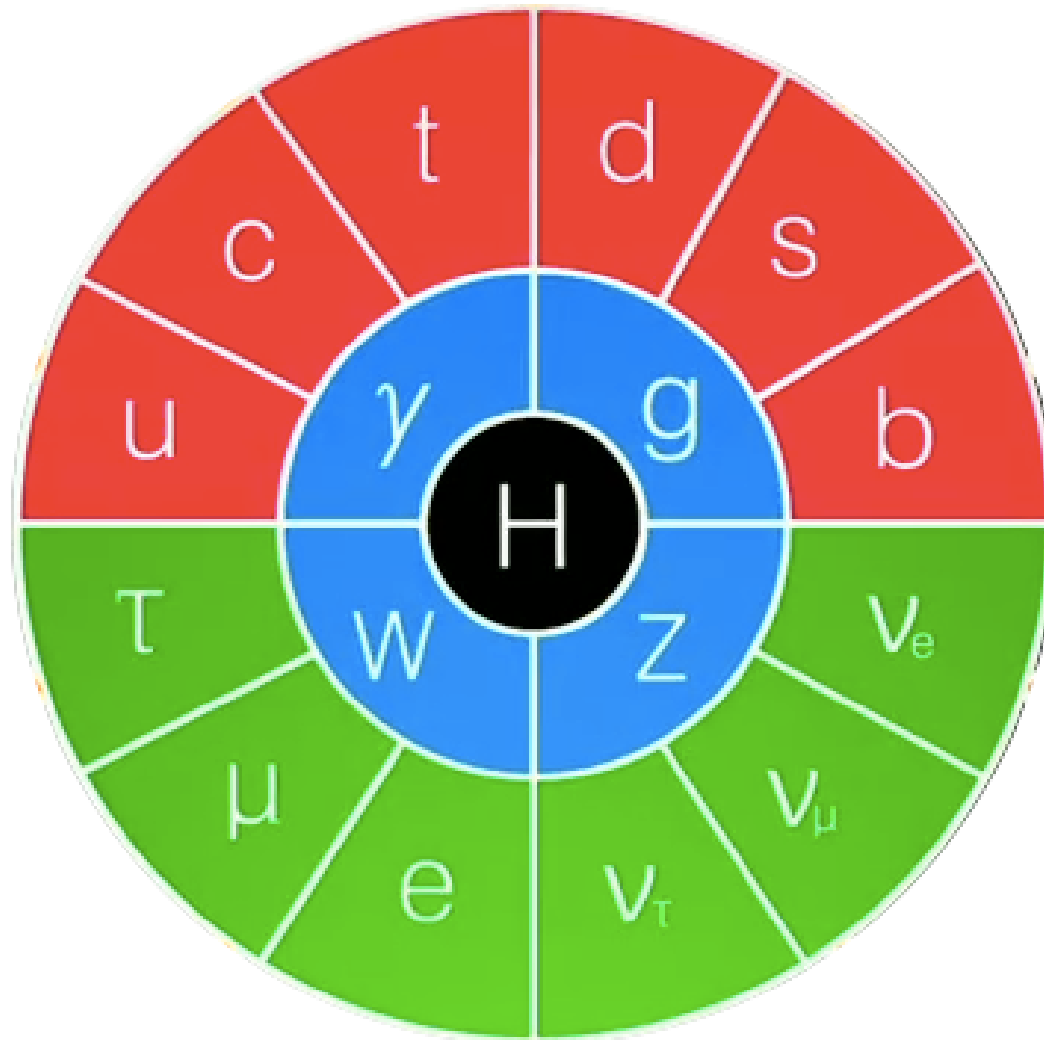


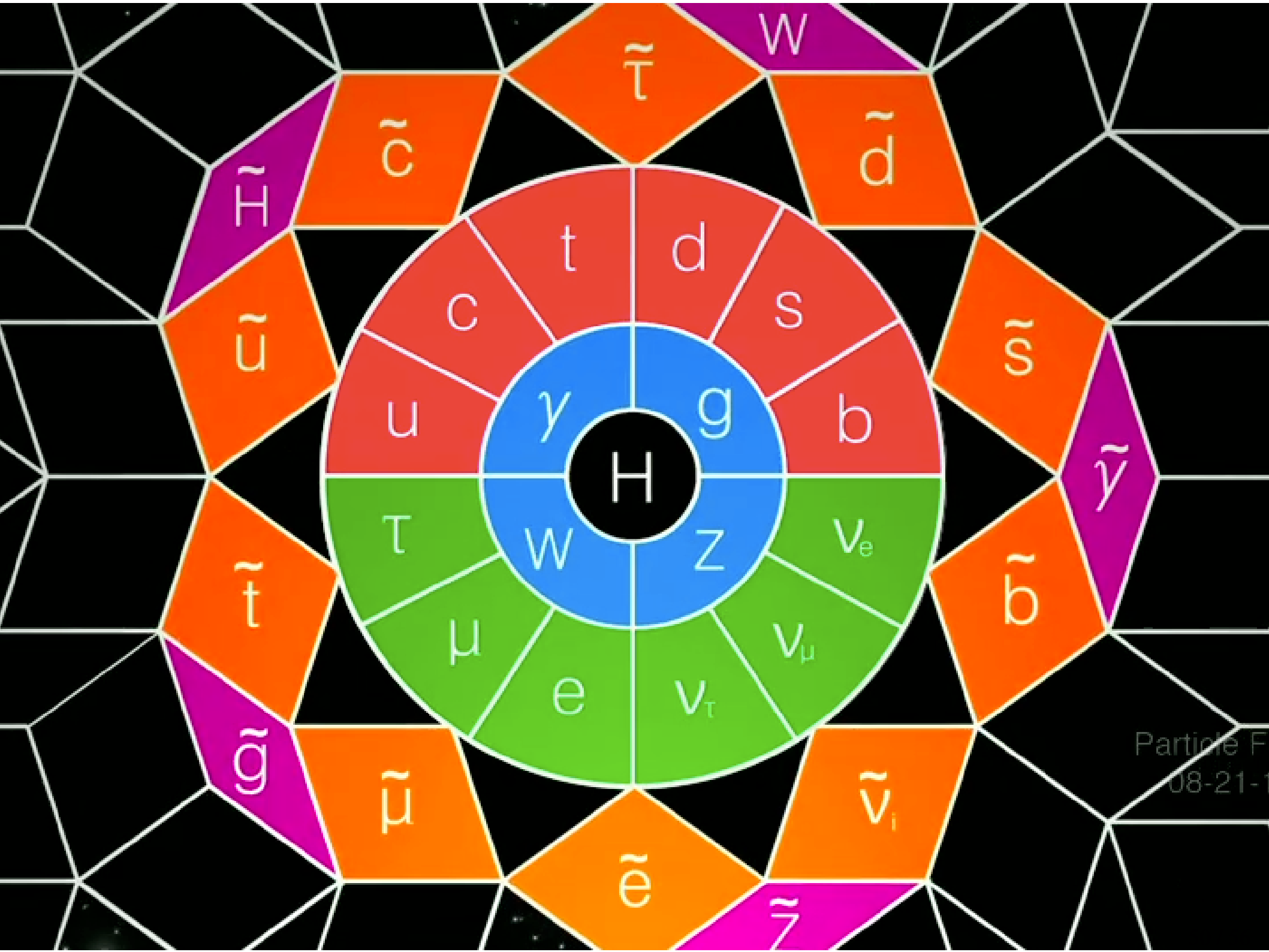




# Autres théories

- 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



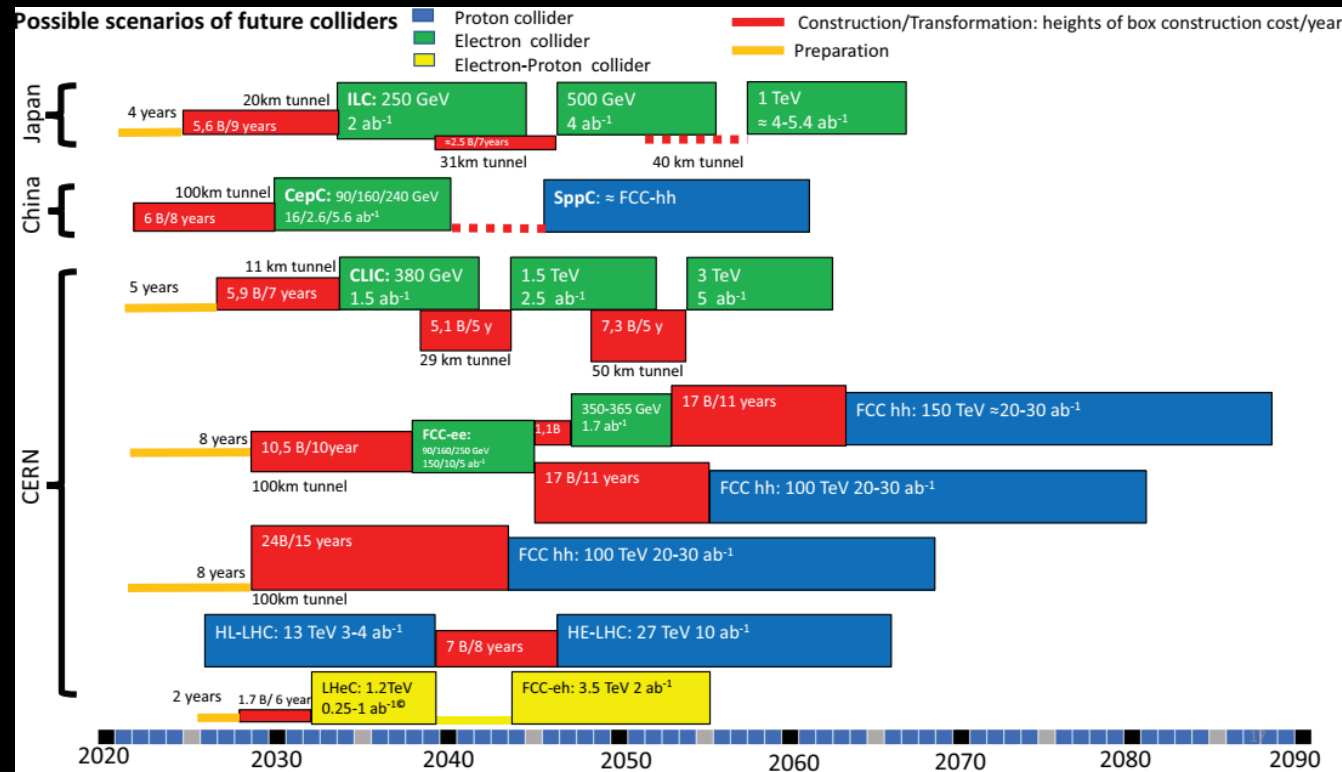
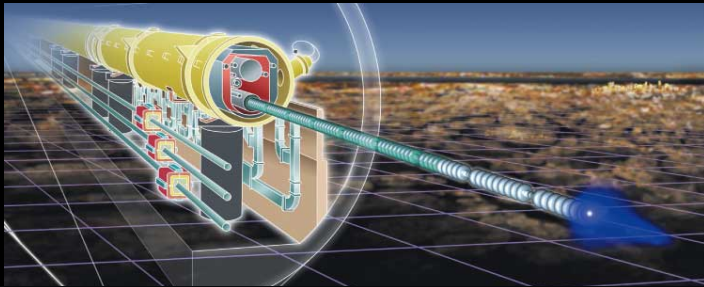


Particle F  
08-21-1





# Et après ?



- **Future Circular Collider (FCC)**

Circumference: 90 - 100 km  
Energy: 100 TeV (pp) 90-350 GeV (e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>)

- **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<sup>+</sup>e<sup>-</sup>)

- **Tevatron**

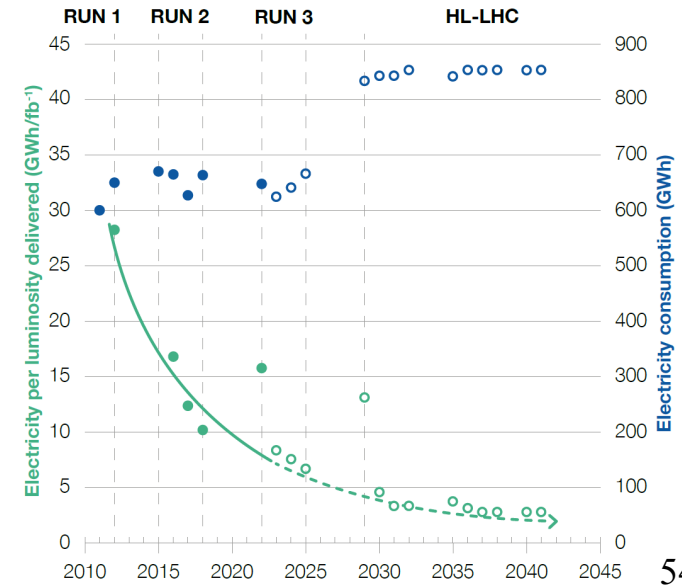
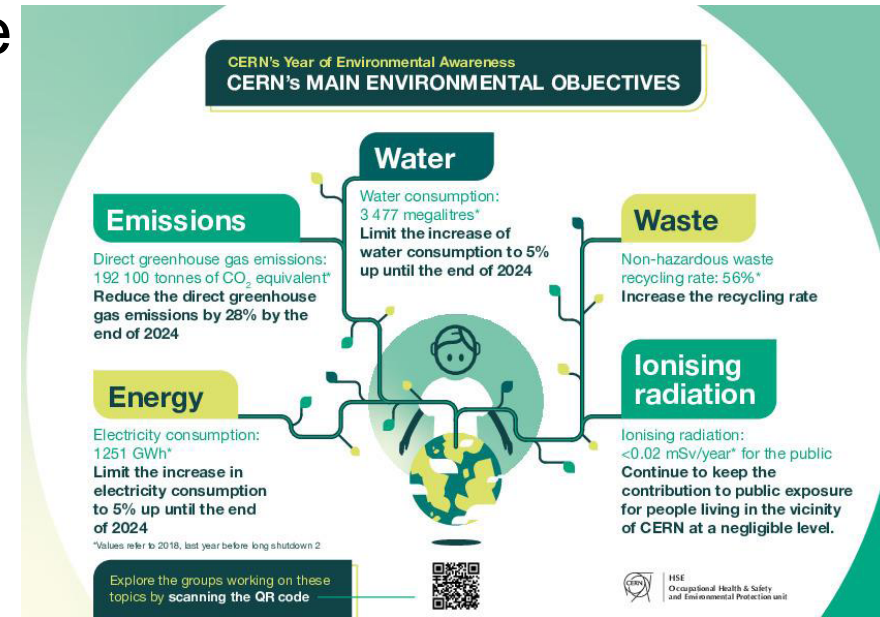
Circumference: 6.2 km  
Energy: 2 TeV (p $\bar{p}$ )

- **International Linear Collider (ILC), Japon, 31 km, 500 GeV (e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>)**

- **Compact Linear Collider (CLIC)**  
CERN, 11-50 km, 380-3000 GeV (e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>)














# Impact environnemental

- Consommation électrique importante
  - ▶ Cryogénie, expériences (90 %)
  - ▶ Informatique : ordinateurs, stockage, réseau
- Emissions de GES
  - ▶ Gaz de détection / refroidissement
- Transports
  - ▶ Laboratoire mondial
- Améliorations
  - ▶ Efficacité des accélérateurs / centre de calcul
  - ▶ Récupération de chaleur
  - ▶ Coût énergétique / GES des futurs projets (FCC?)
  - ▶ Temporaire : arrêt plus long du LHC





# Liens

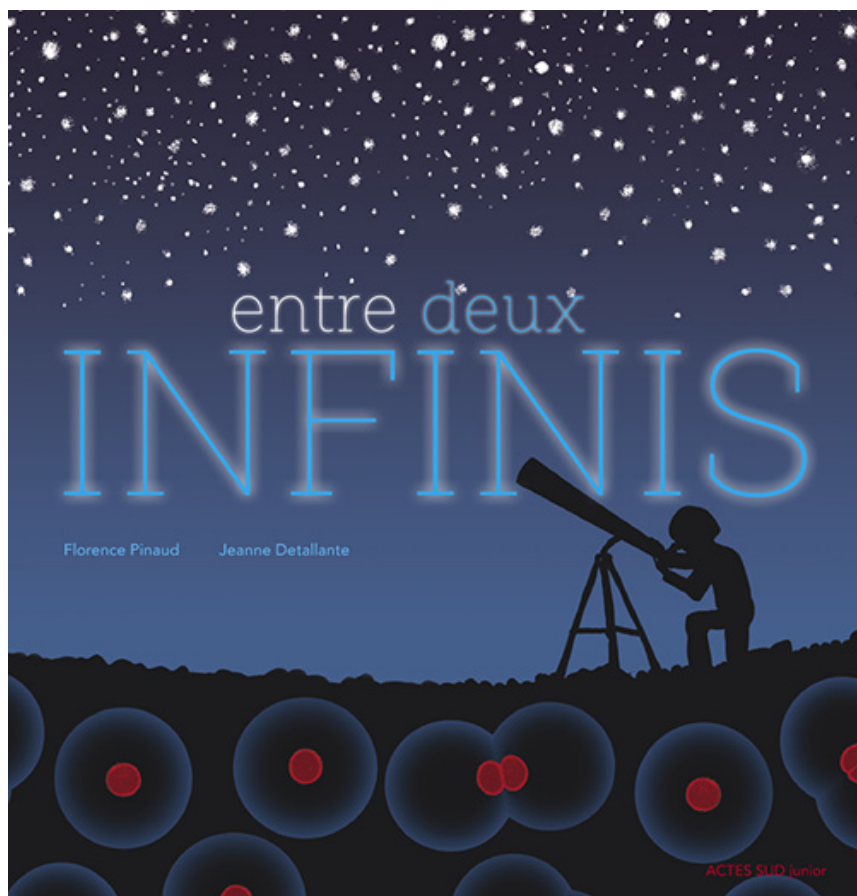
ATLAS@home		<a href="https://atlasathome.cern.ch">atlasathome.cern.ch</a>
ATLAS grand public		<a href="https://atlas.cern">atlas.cern</a>
ATLAS en direct		<a href="https://atlas-live.cern.ch">atlas-live.cern.ch</a>
ATLAS sur		<a href="https://x.com/ATLASexperiment">x.com/ATLASexperiment</a>
ATLAS sur		<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://x.com/cppmluminy">x.com/cppmluminy</a>
Le CERN sur		<a href="https://www.facebook.com/cern">www.facebook.com/cern</a>
		<a href="https://www.linkedin.com/company/cern">www.linkedin.com/company/cern</a>
Modèle standard		<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 ?](#)



# Livre à partir de 10 ans

## Entre deux infinis

FLORENCE PINAUD

JEANNE DETALLANTE - ILLUSTRATEUR



Actes Sud Junior

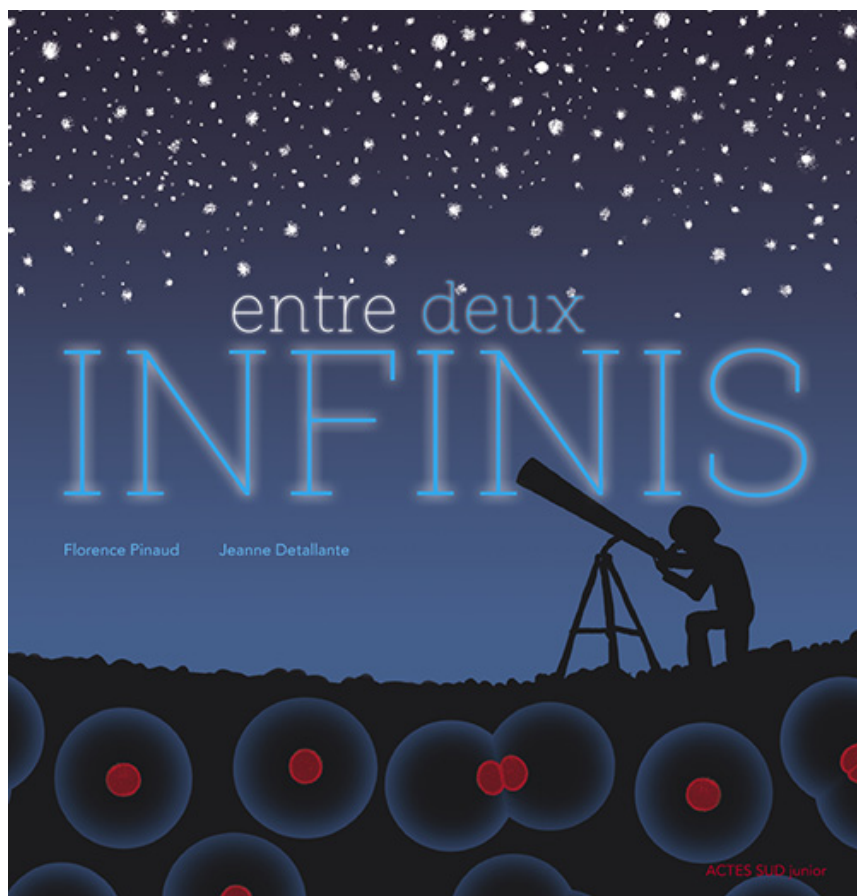
Hors collection

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

ISBN 978-2-330-12102-0

prix indicatif : 15, 90€

> [Où trouver ce livre ?](#)



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.