

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

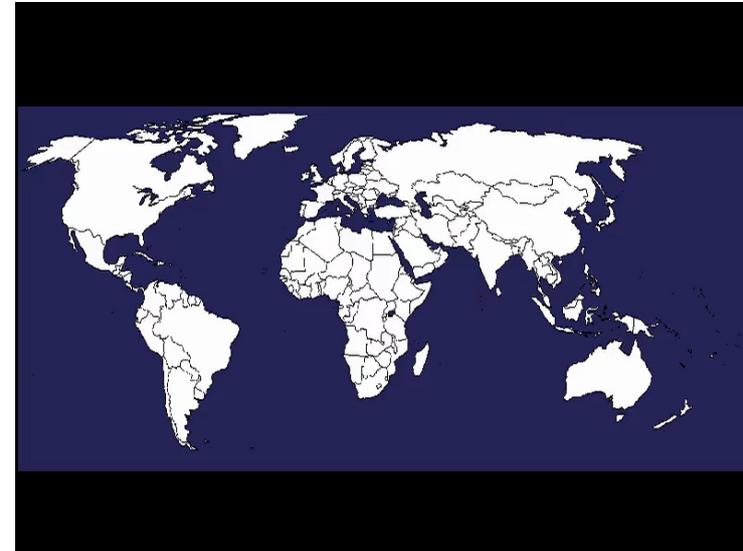
Marseille

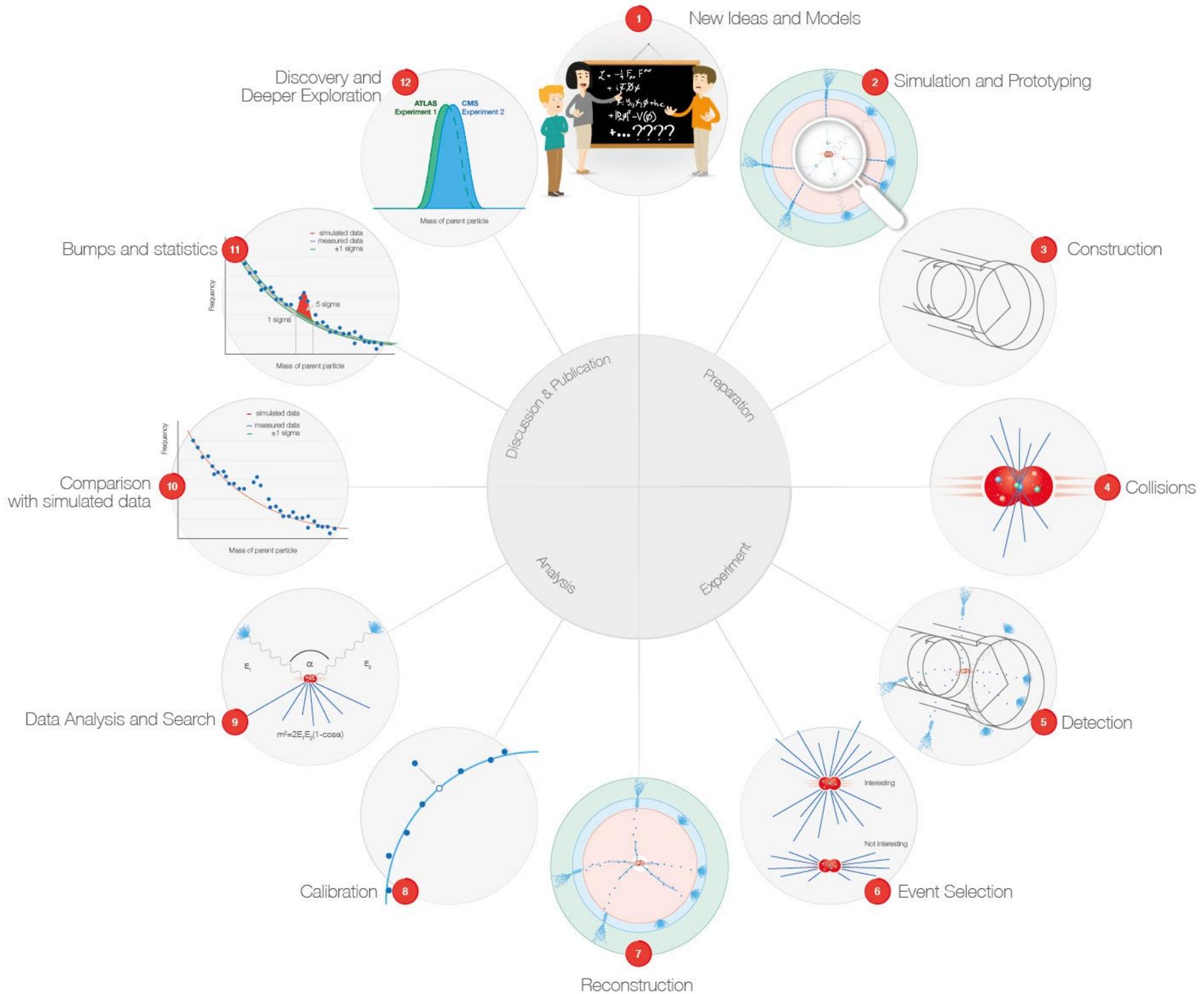
Université

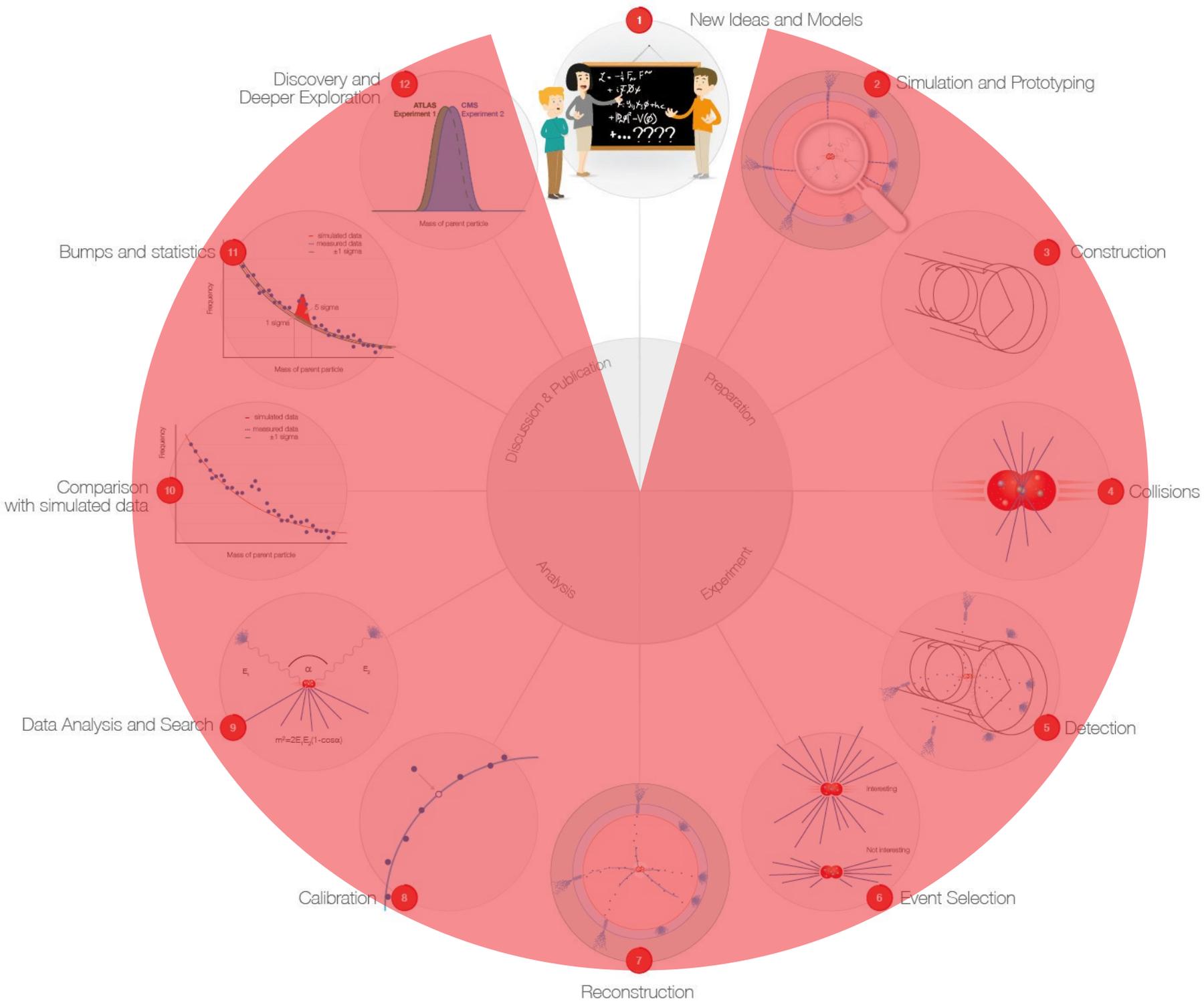


Yann Coadou

- 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

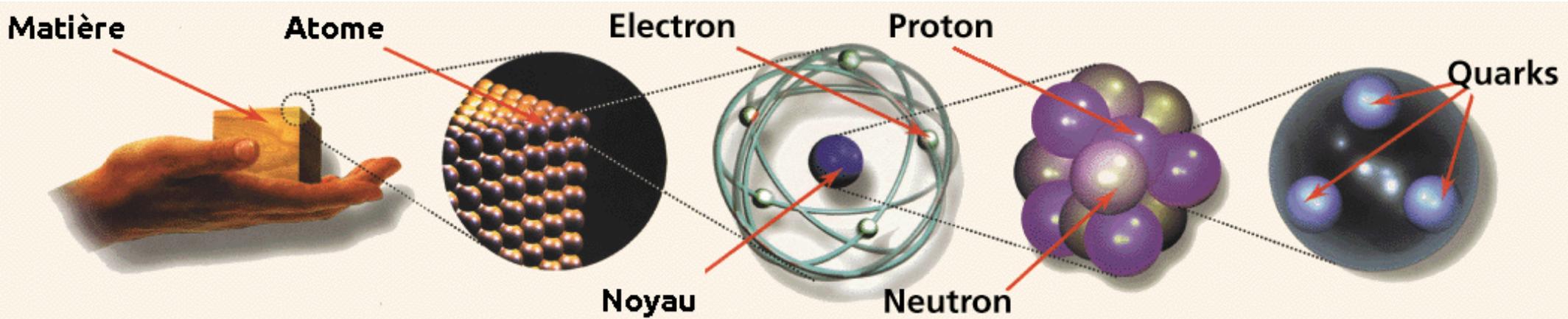




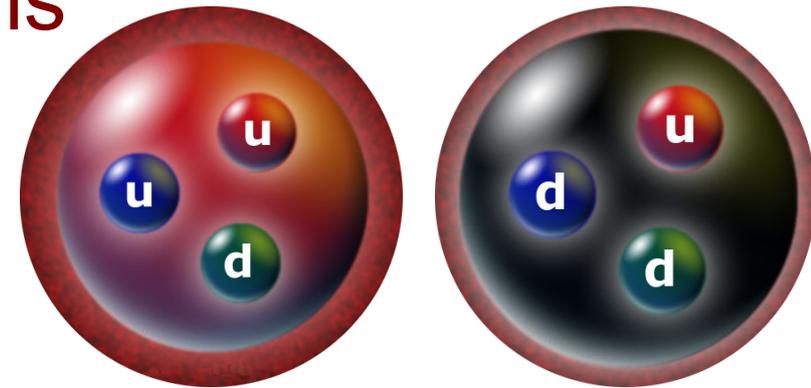


*De l'infiniment grand
à l'infiniment petit...*

De quoi est fait l'Univers visible ?

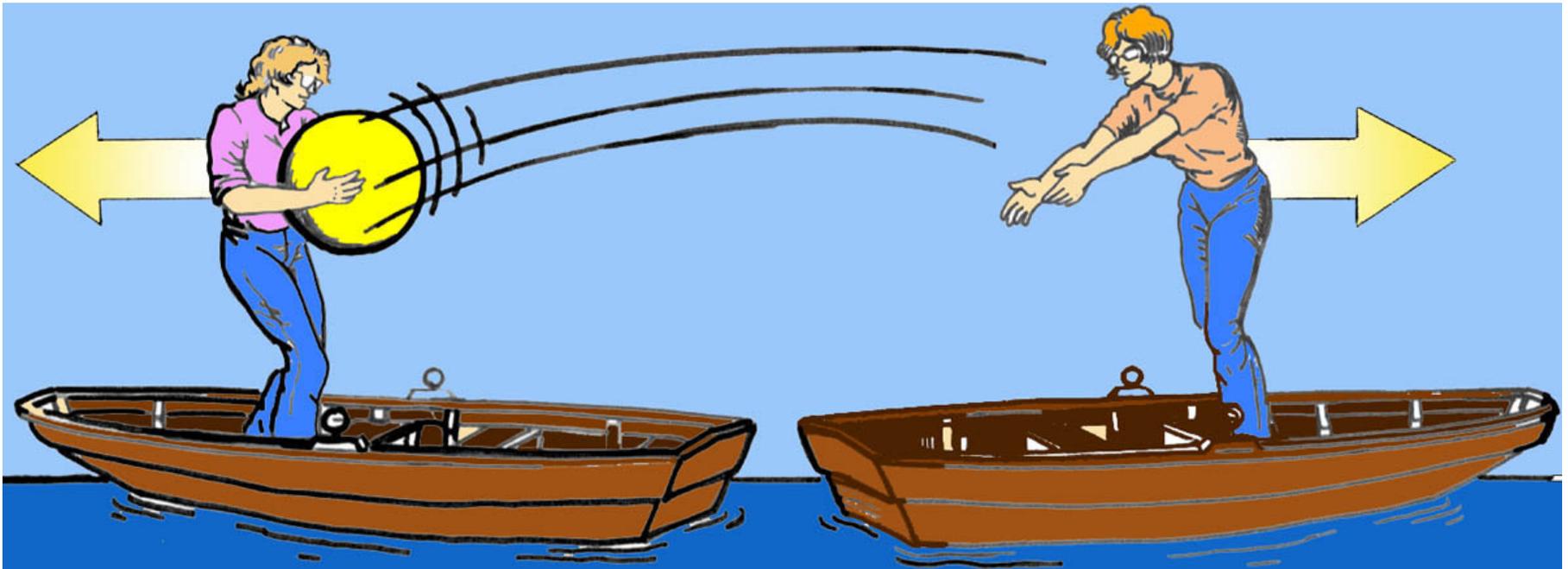


- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**
- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks
- Ils composent les noyaux
- Les électrons forment un nuage autour des noyaux
- Des **neutrinos** sont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



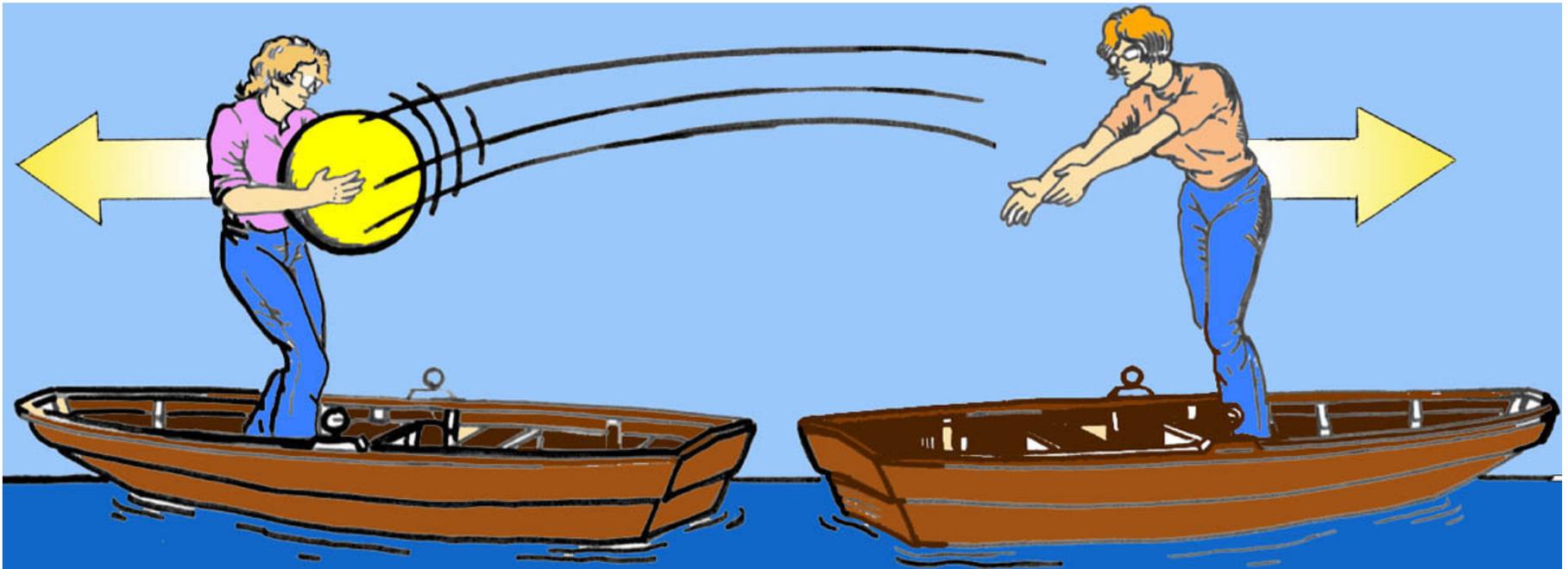
Interaction fondamentale

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

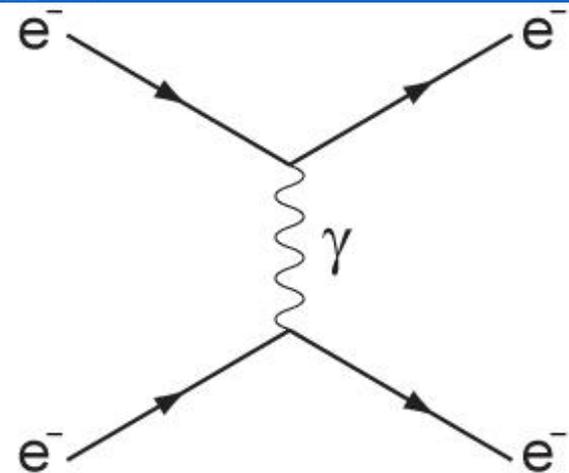


Interaction fondamentale

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

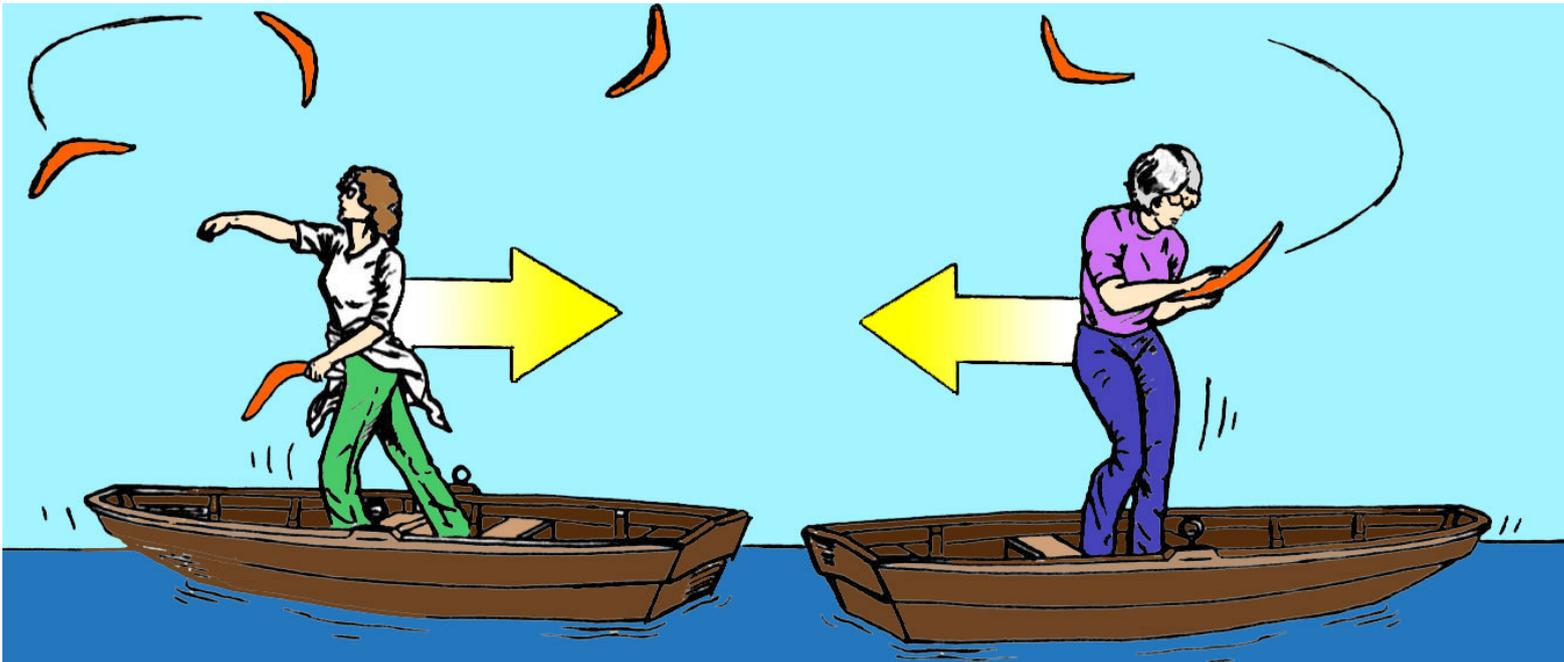


En physique des particules :

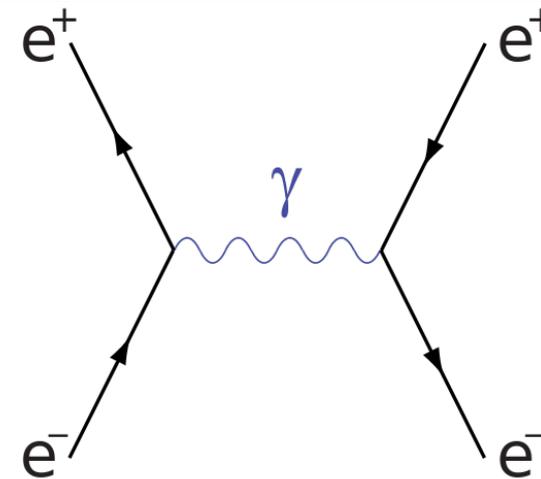


Interaction fondamentale

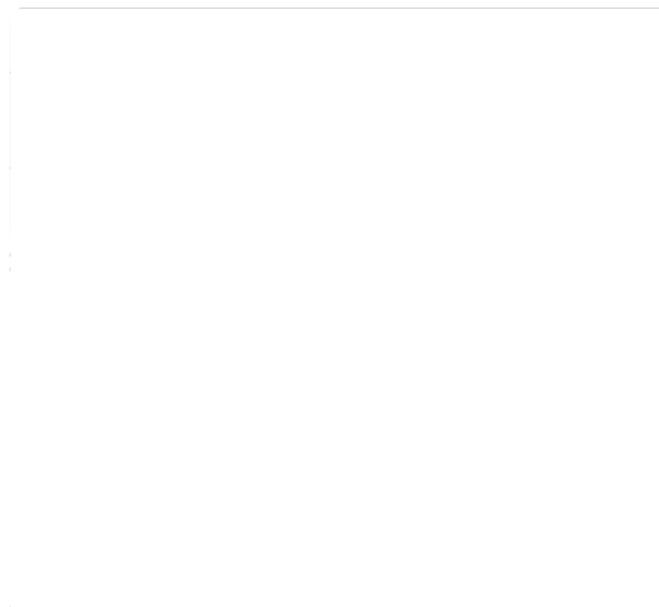
Échange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)



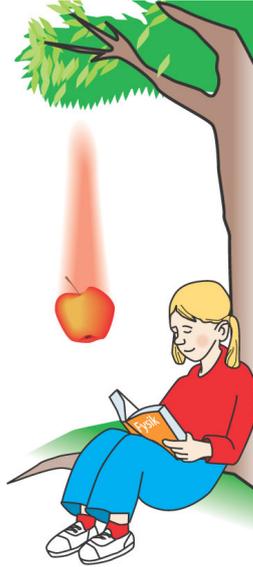
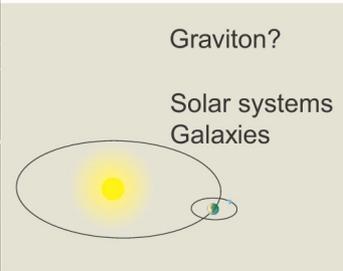
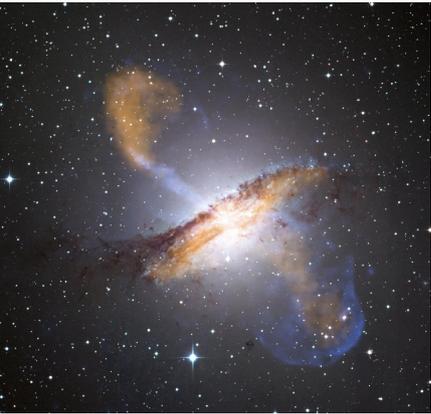
En physique des particules :



Les forces

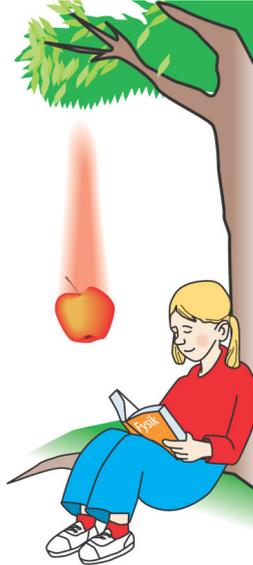


Les forces



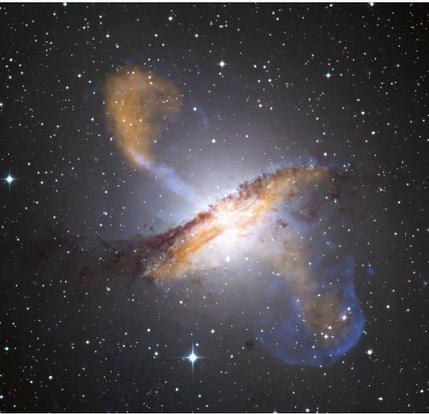
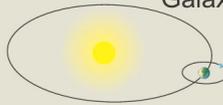
Force gravitationnelle

Les forces

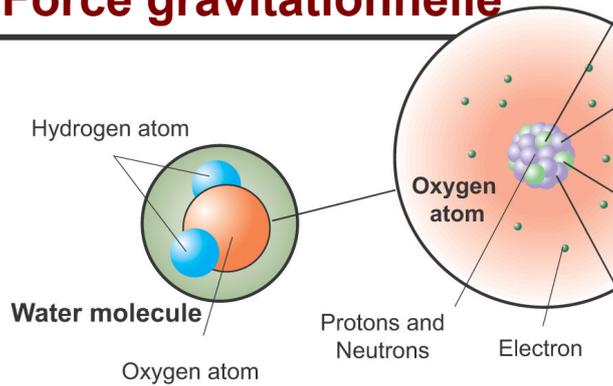


Graviton?

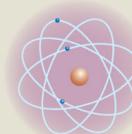
Solar systems
Galaxies



Force gravitationnelle



Photon



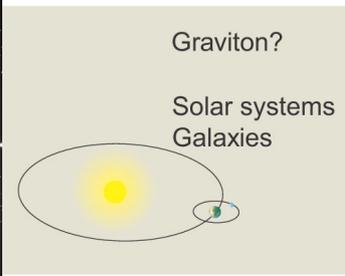
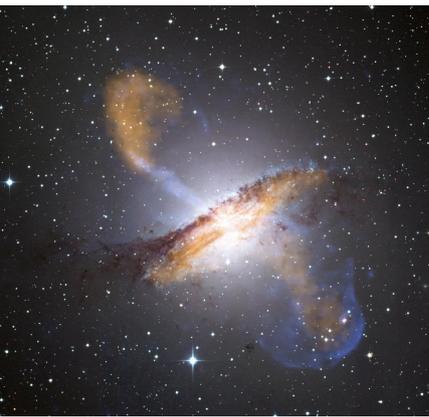
Atoms
Light
Chemistry
Electronics



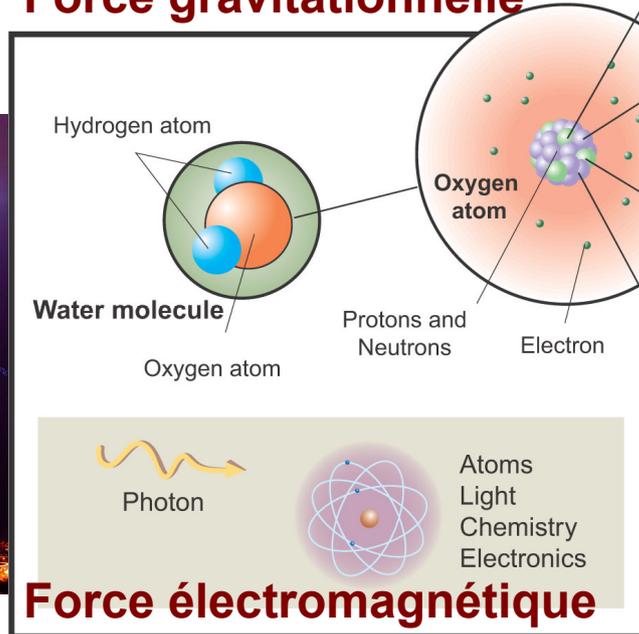
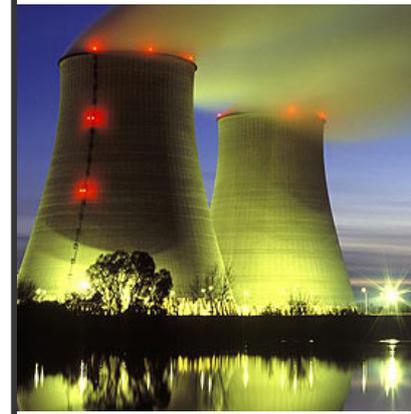
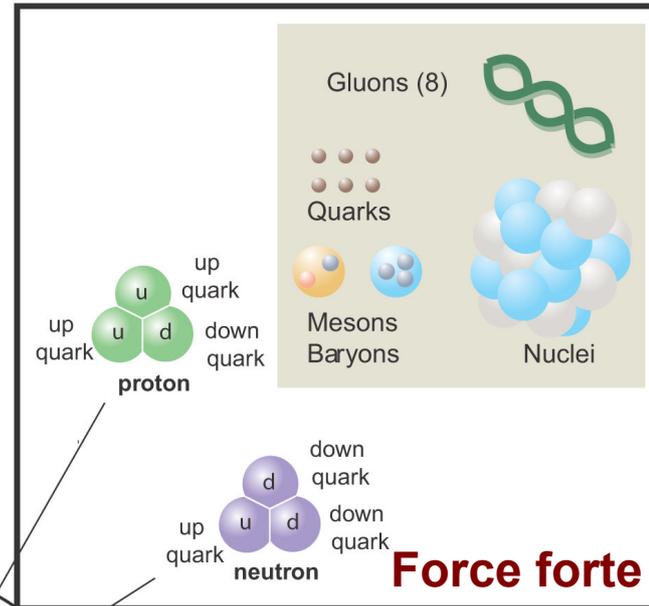
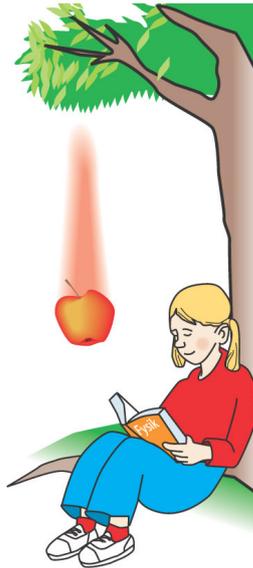
Force électromagnétique

Les forces

Illustration: Typoform

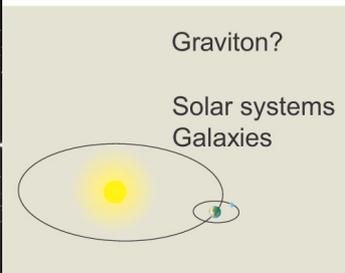
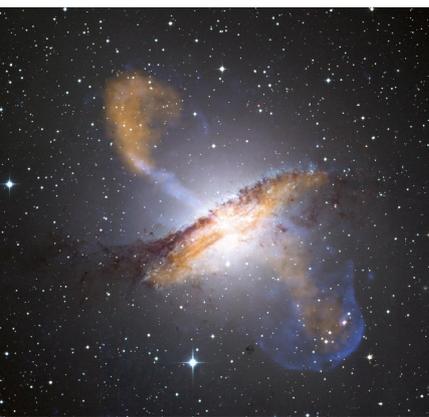


Force gravitationnelle

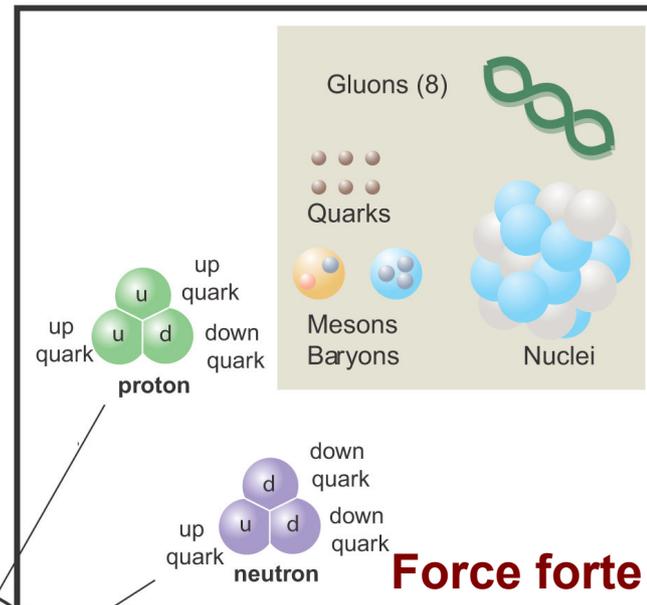
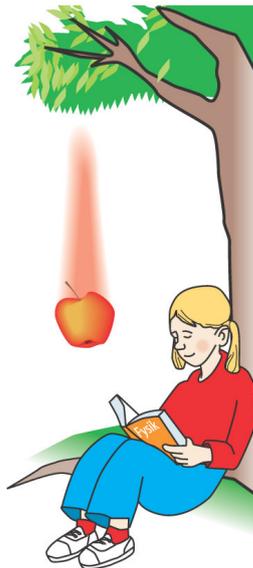


Les forces

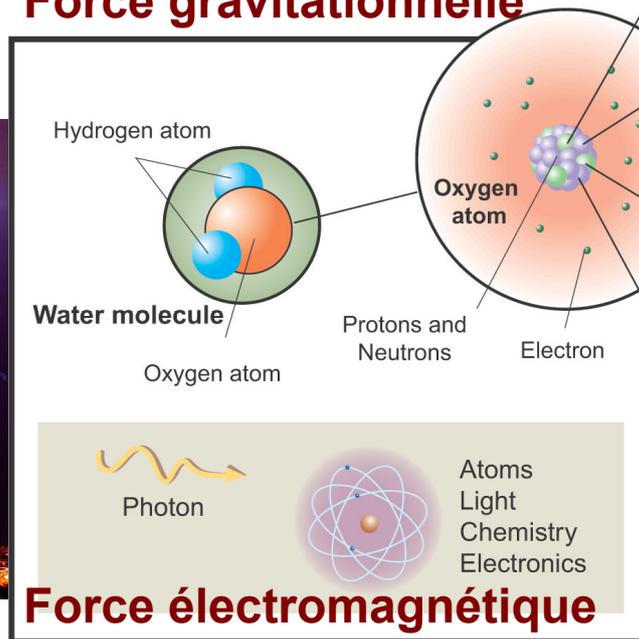
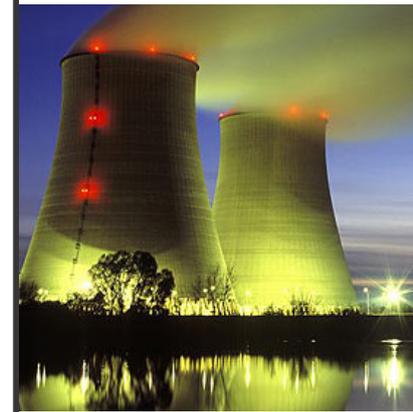
Illustration: Typoform



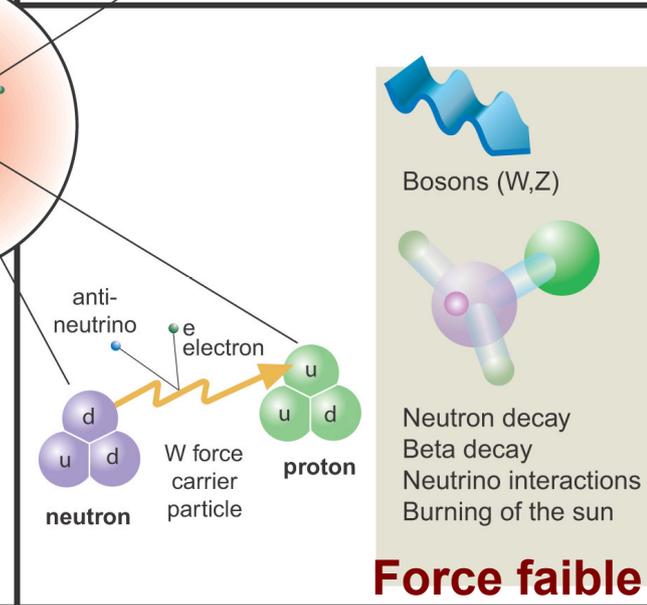
Force gravitationnelle



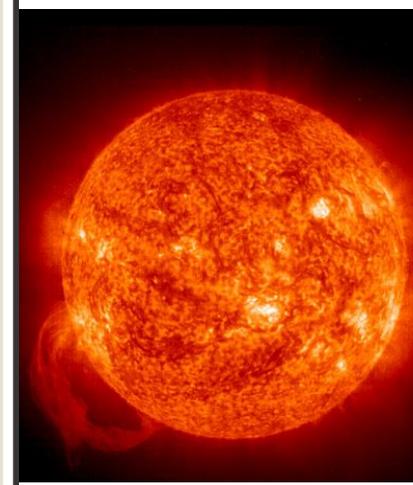
Force forte



Force électromagnétique

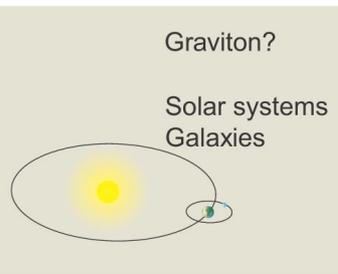
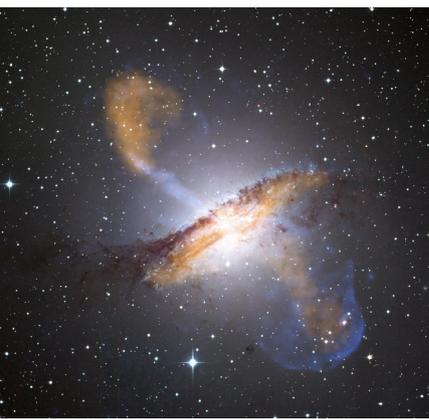


Force faible

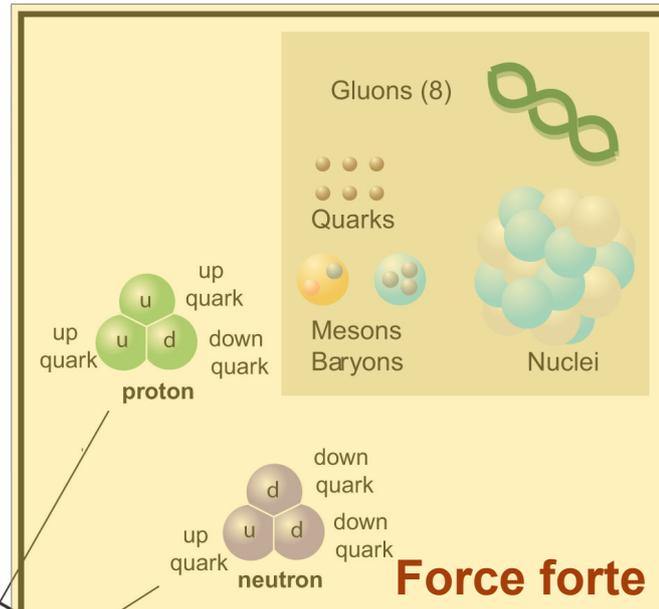
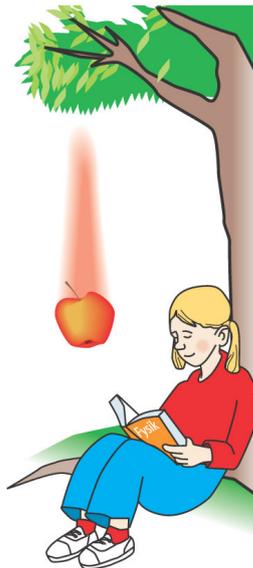


Les forces

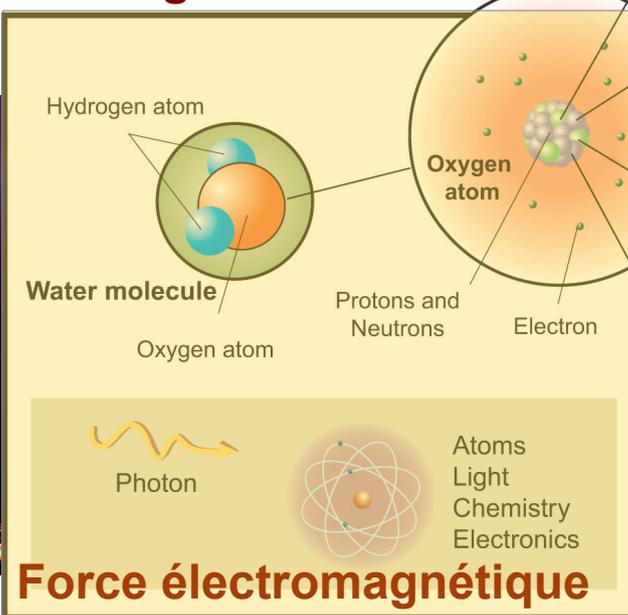
Illustration: Typoform



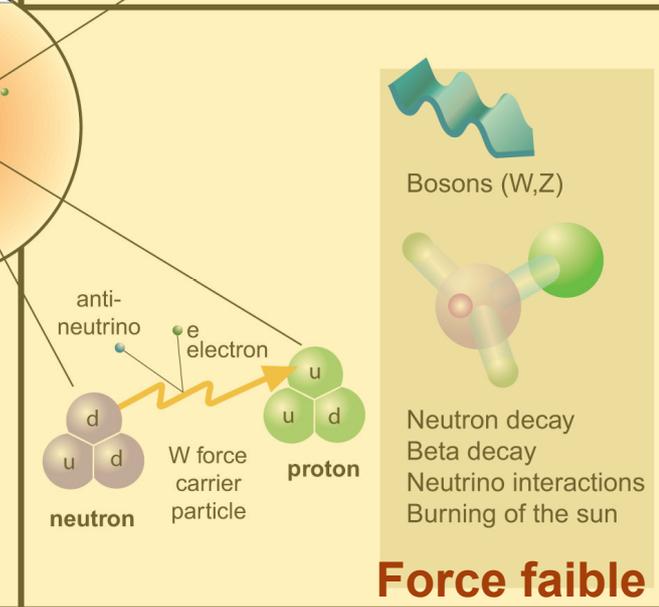
Force gravitationnelle



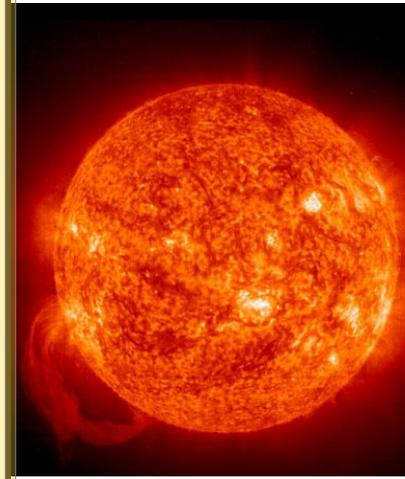
Force forte



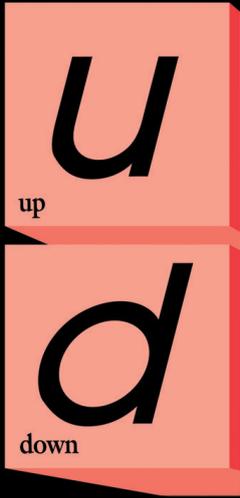
Force électromagnétique



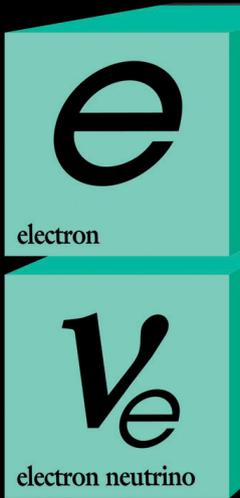
Force faible



Quarks



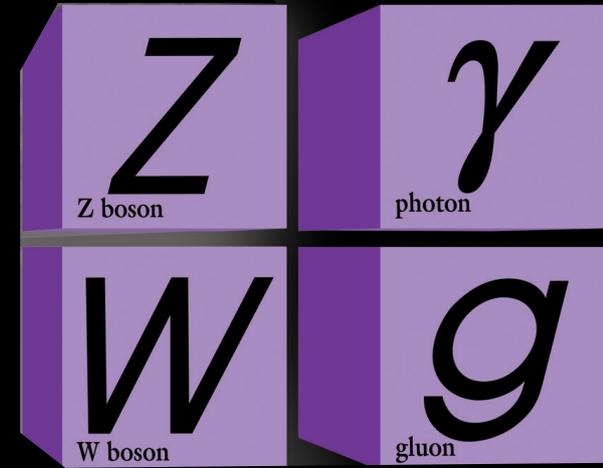
+ anti-matière



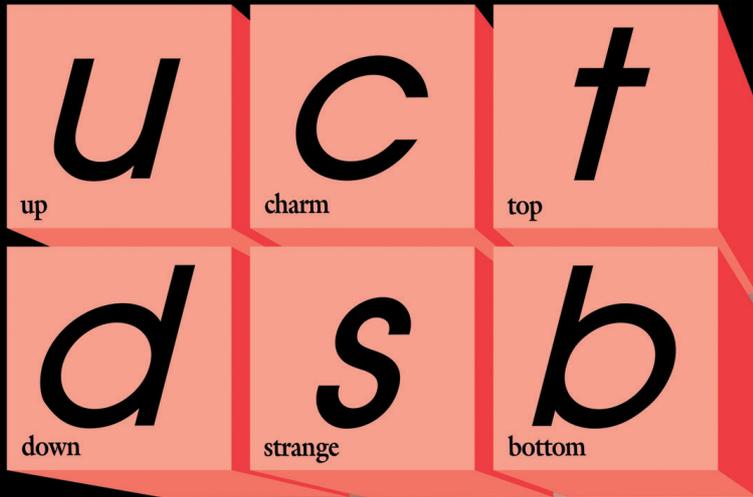
Leptons

Le modèle standard

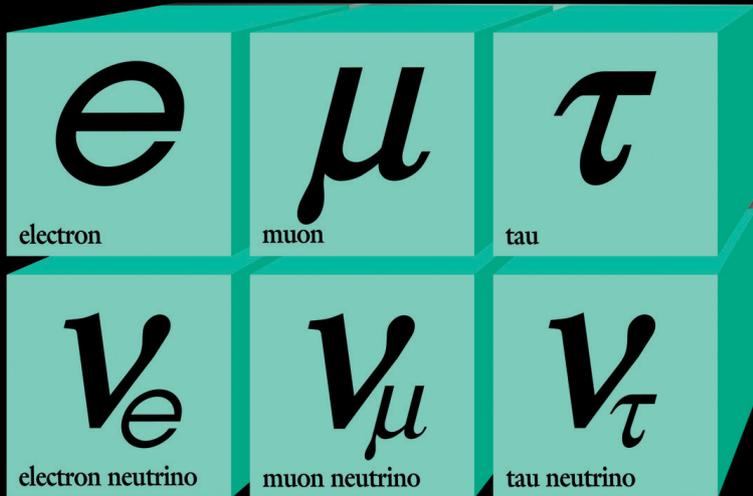
Forces



Quarks



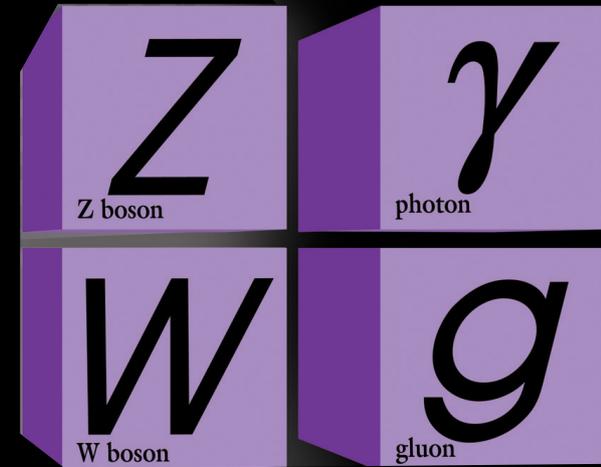
+ anti-matière



Leptons

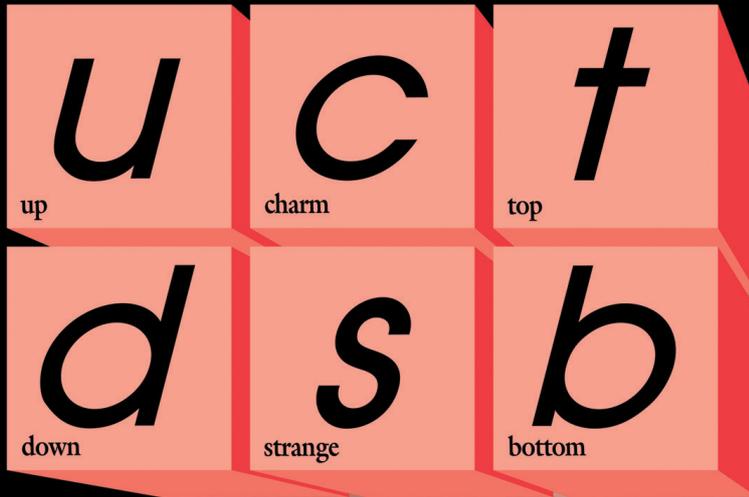
Le modèle standard

Forces



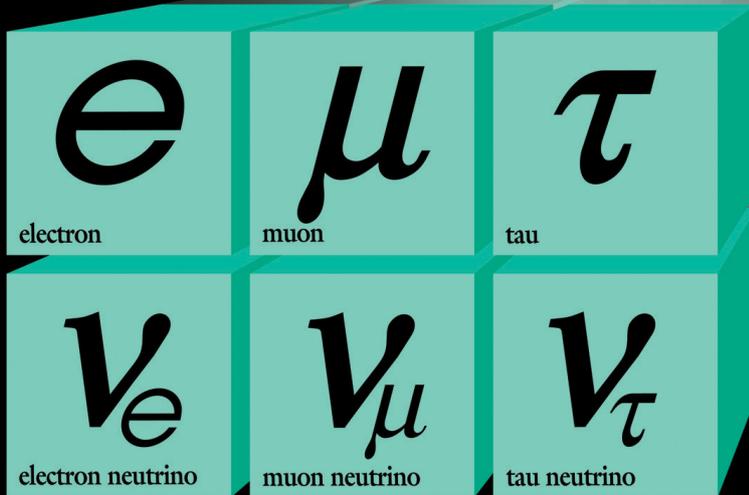
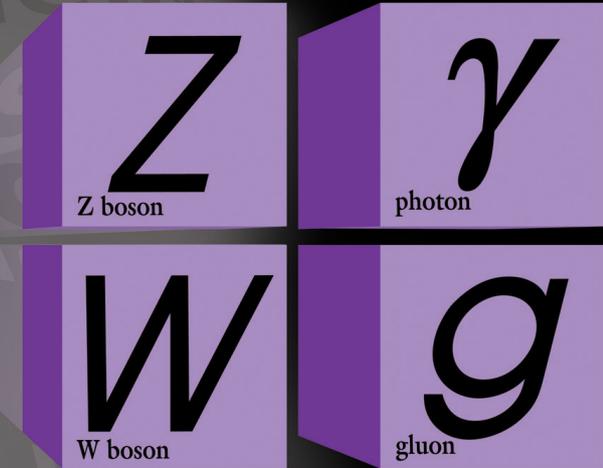
Quarks

Le modèle standard



+ anti-matière

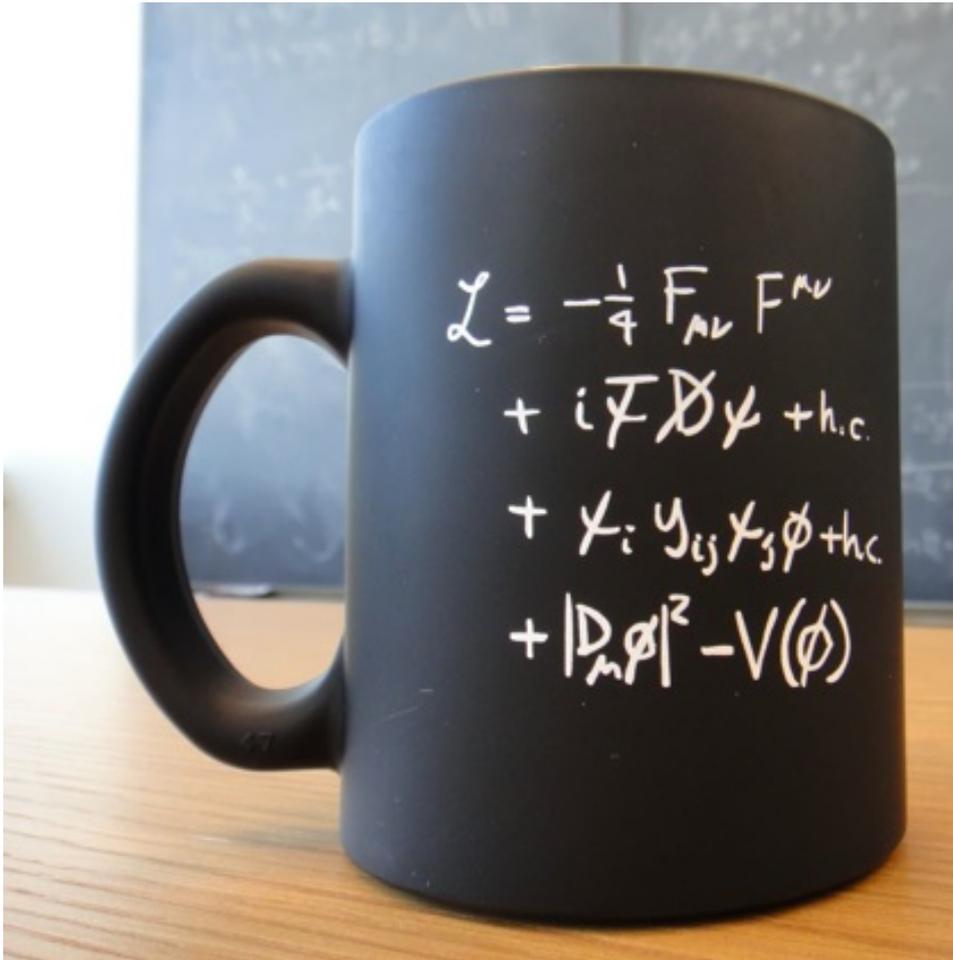
Forces



Leptons

Le modèle standard

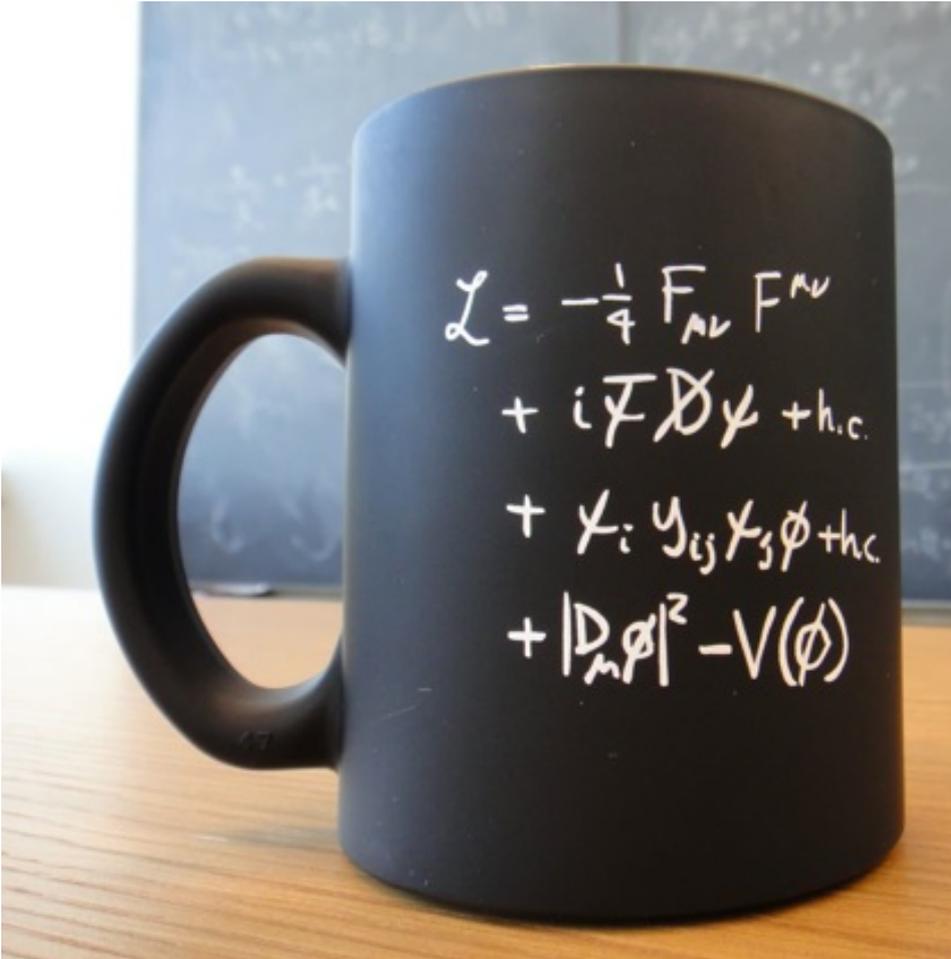
- Version synthétique



Le modèle standard

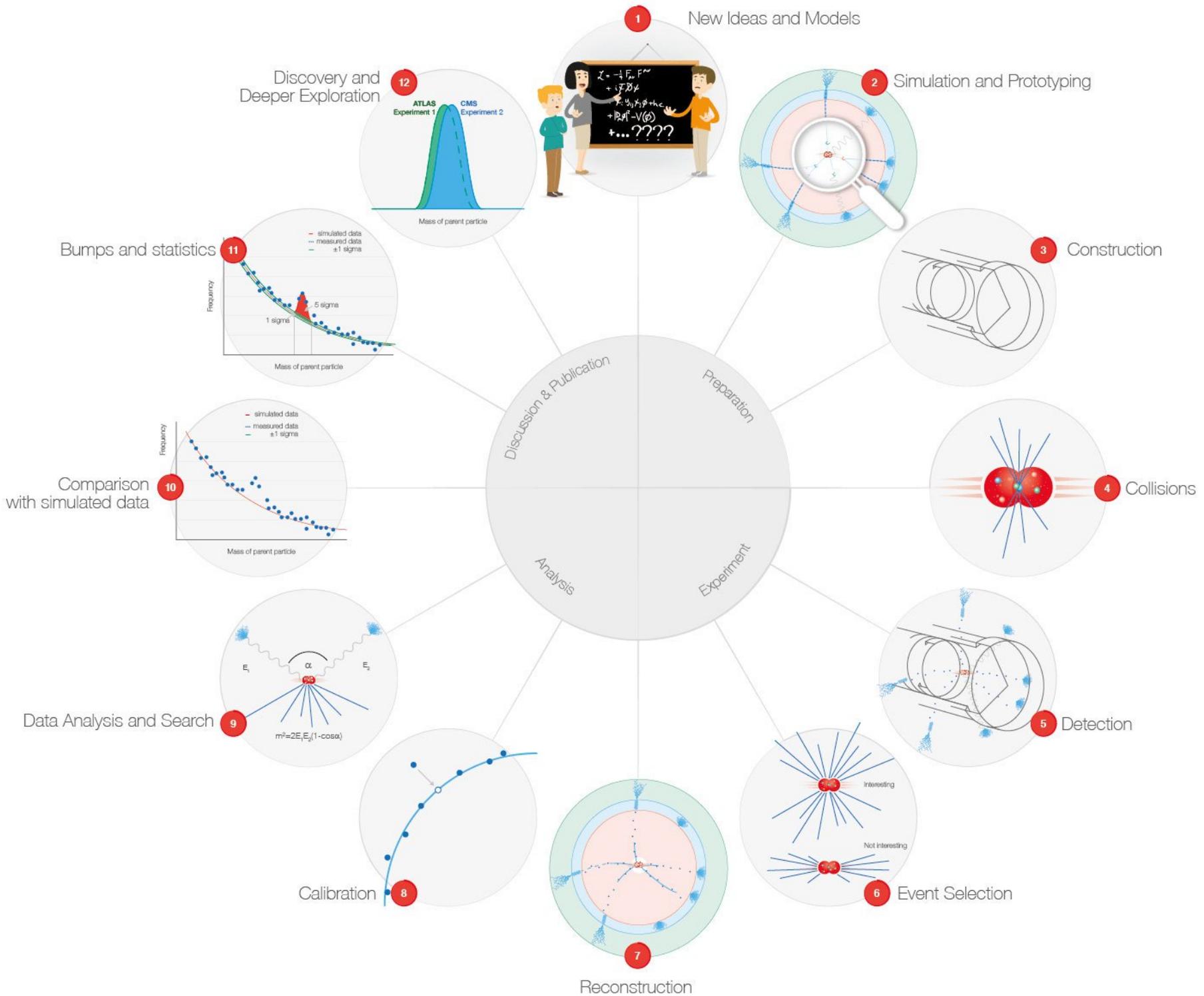
- Version synthétique

- Version développée...

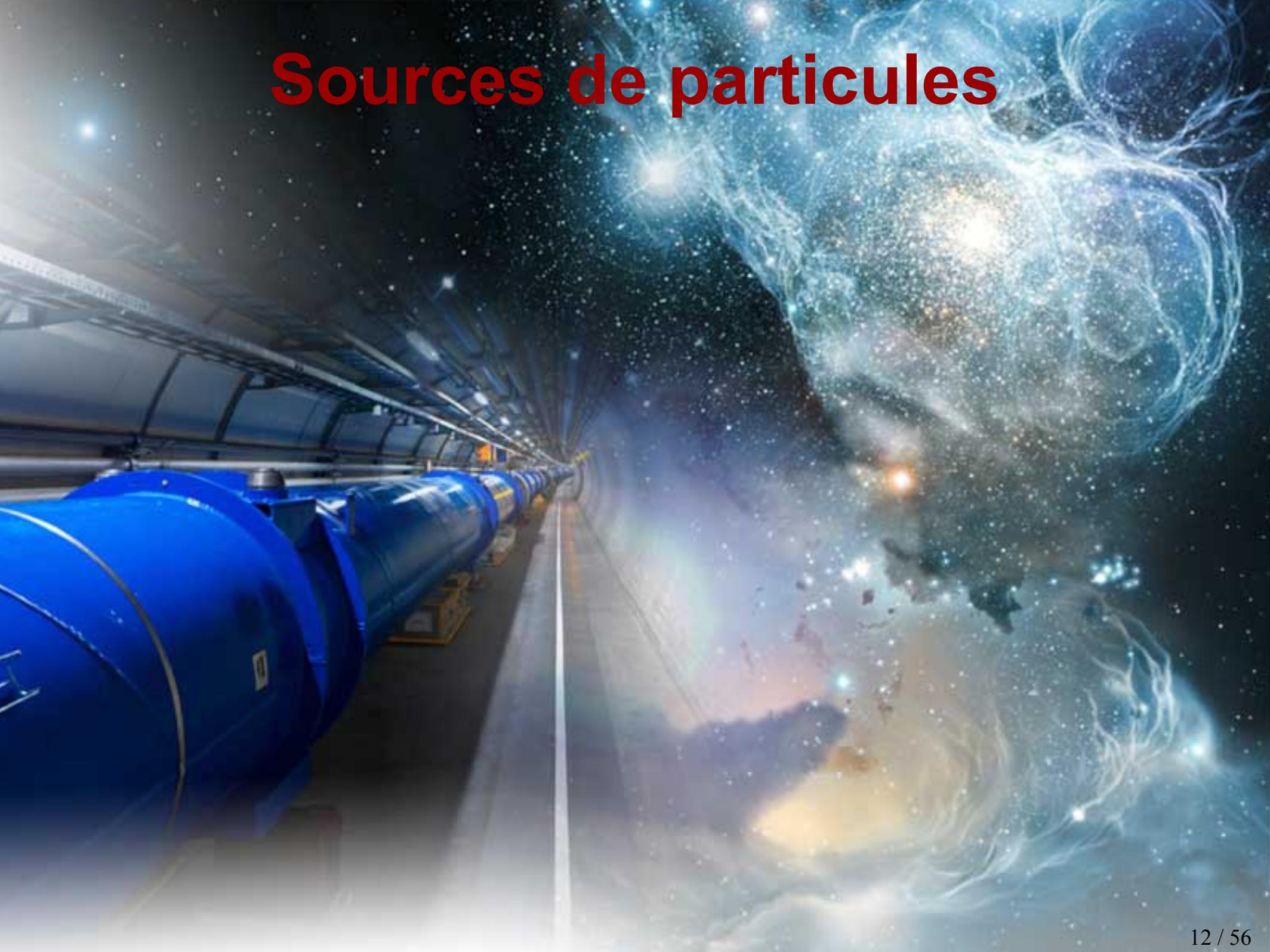


$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^\alpha + \bar{G}^a \partial^2 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] - gM 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^- - 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 [-(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}gM [\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} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

Interactions avec le boson de Higgs



Sources de particules

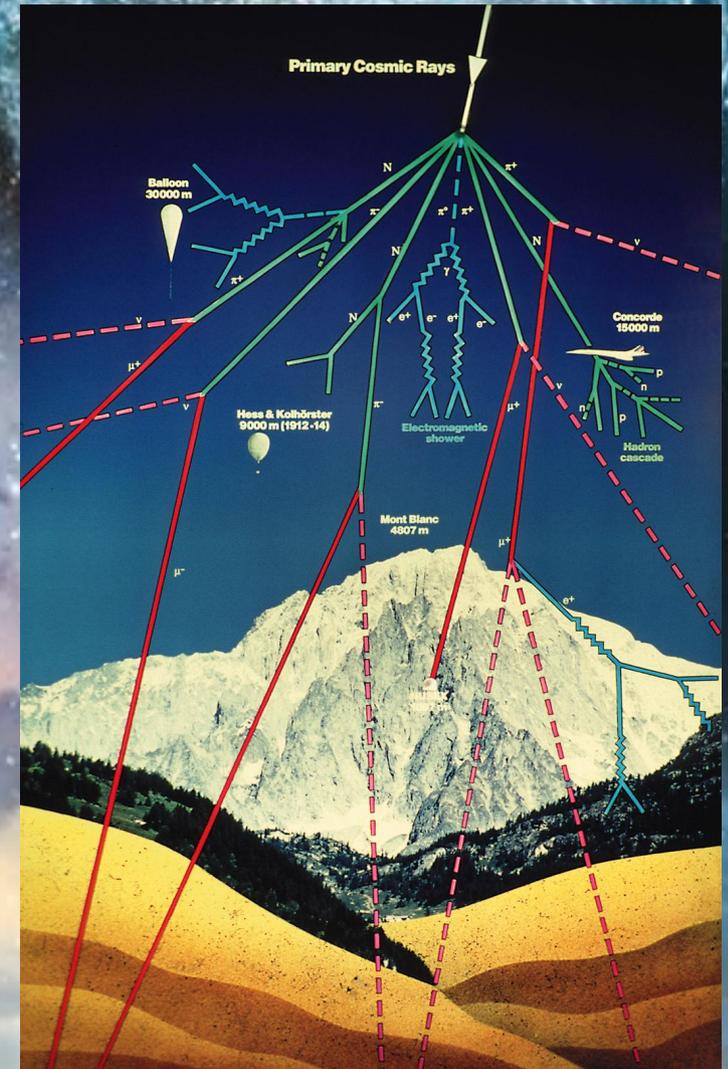


Sources de particules

**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)

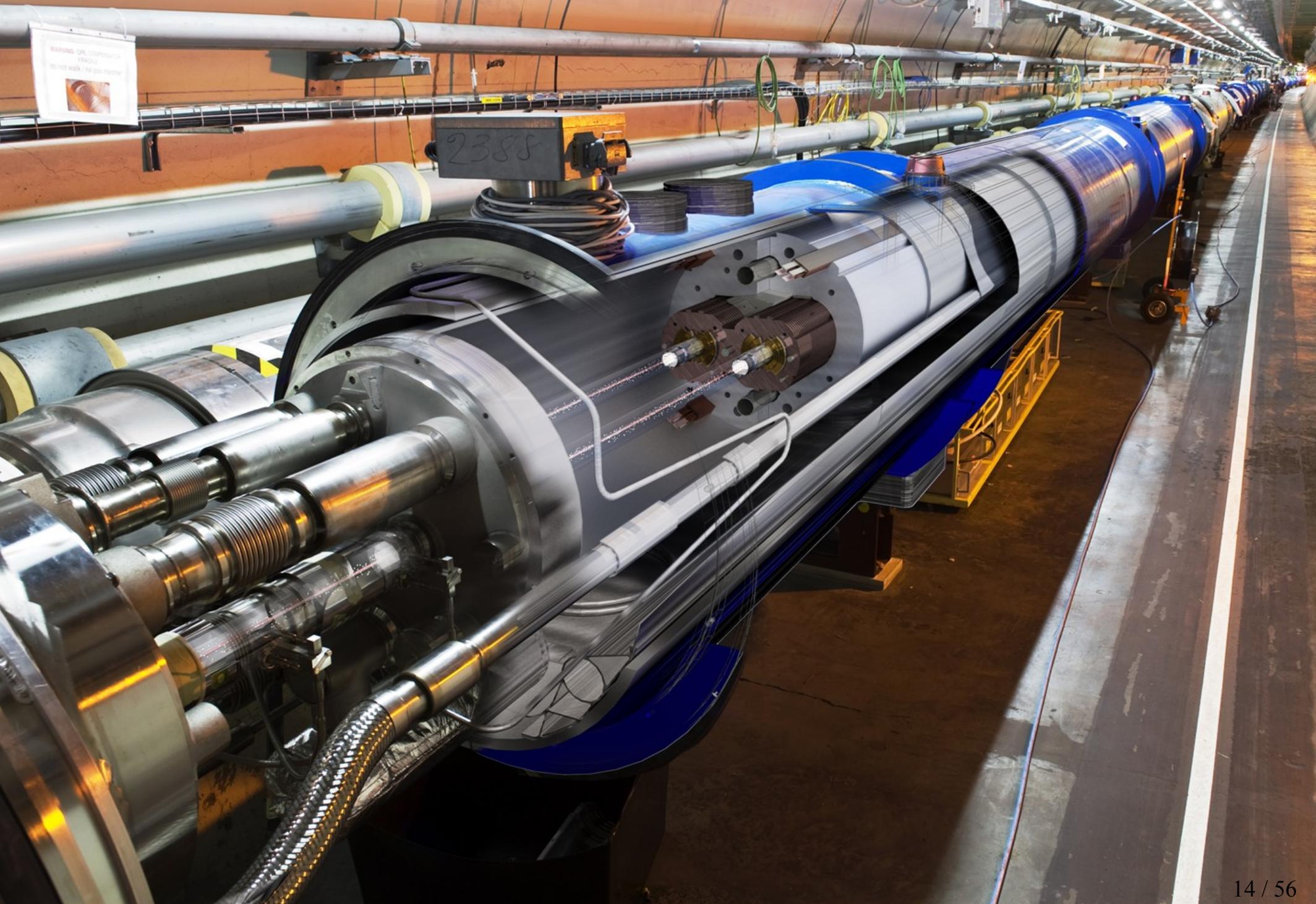


Le LHC

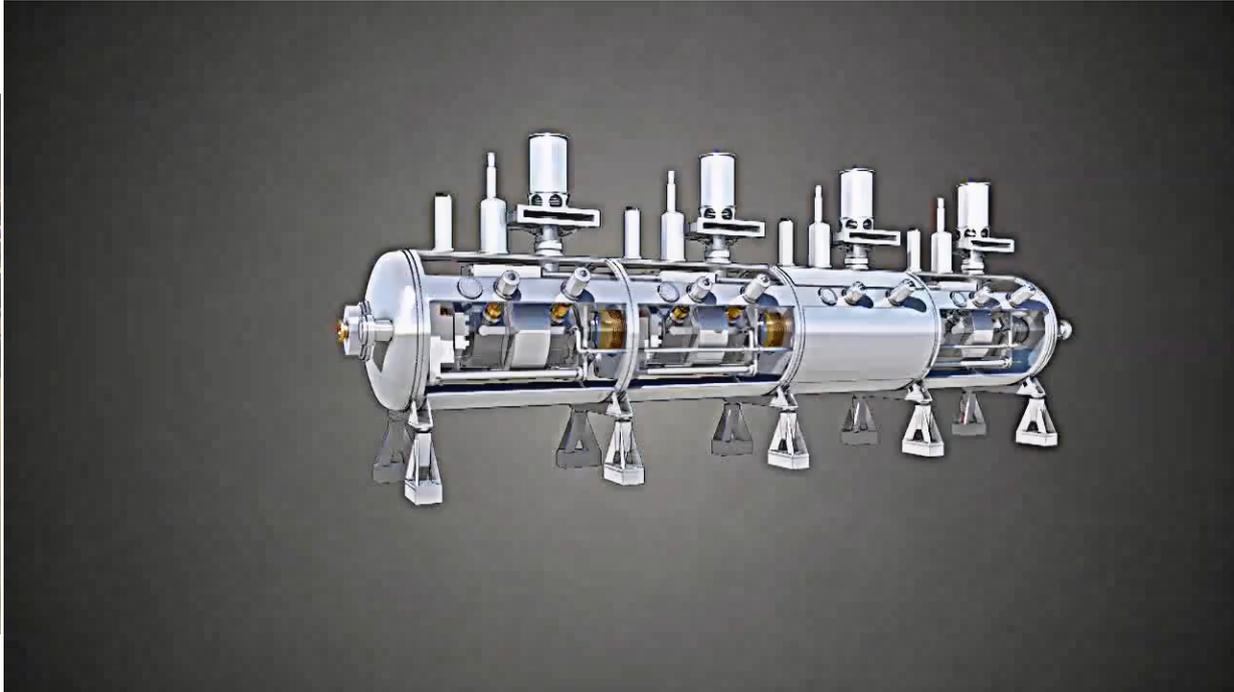
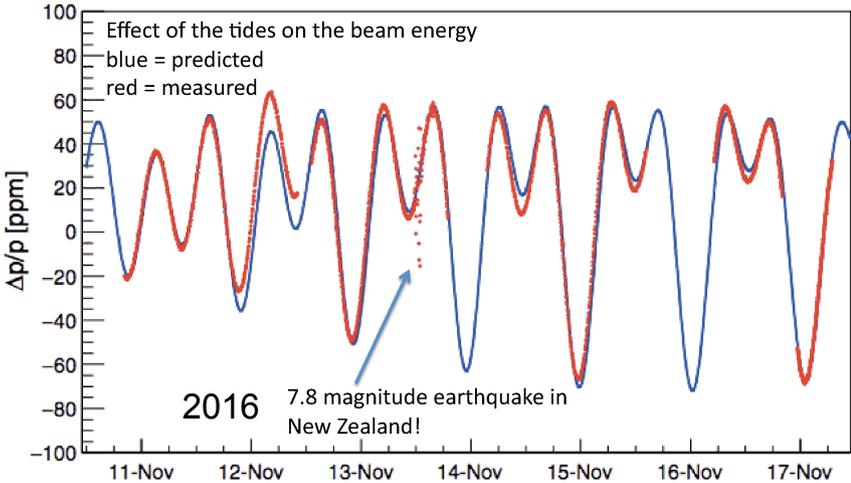
(grand collisionneur de hadrons)



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)



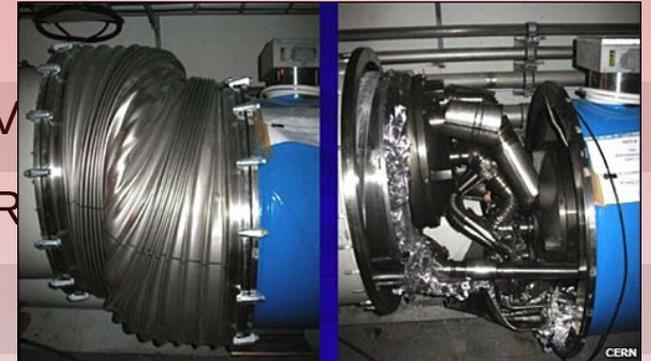
Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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



onnées)

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

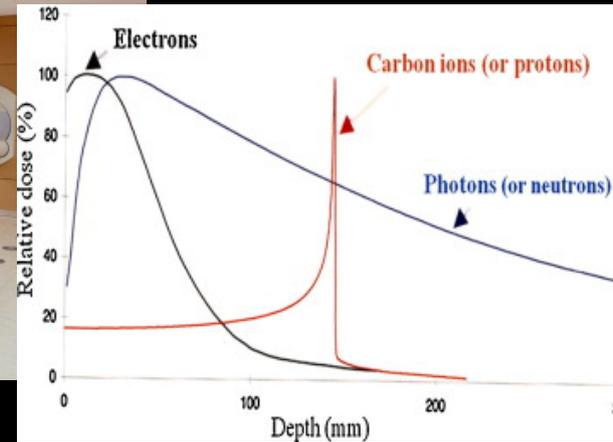
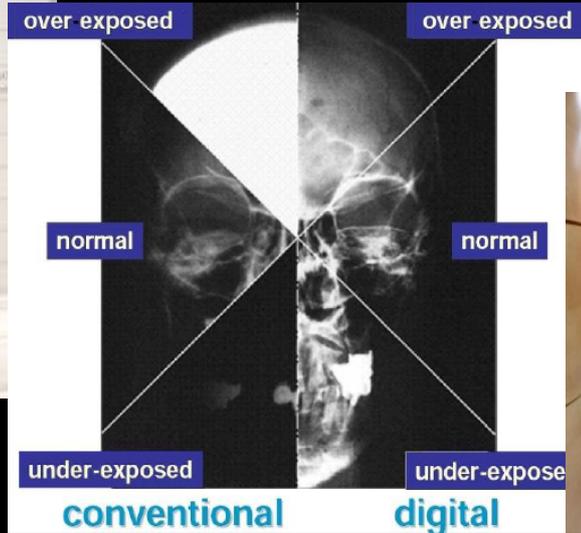
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
Fin 2018	Fin du Run 2
Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
Juin 2026	Fin des collisions à luminosité nominale
2030-2041	Phase à haute luminosité HL-LHC (10 fois plus de données)



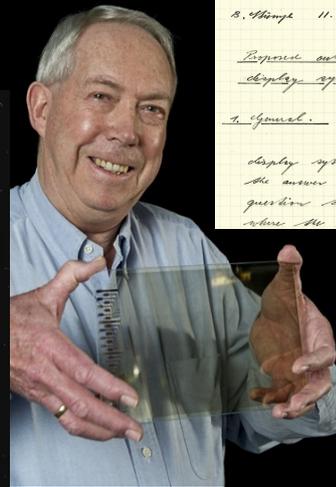
YEARS / ANS CERN
1954-2024



A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?

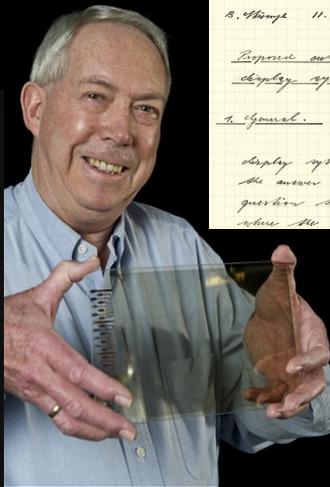
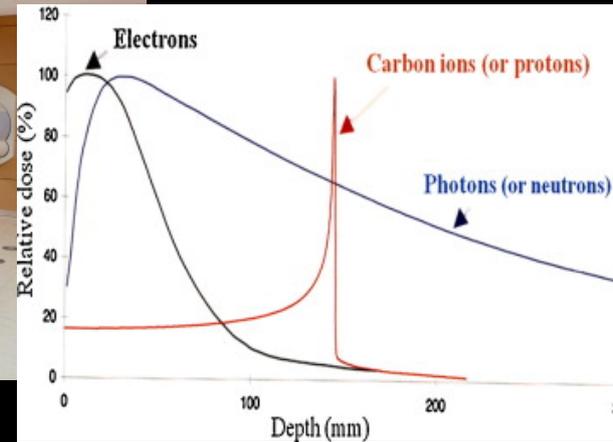
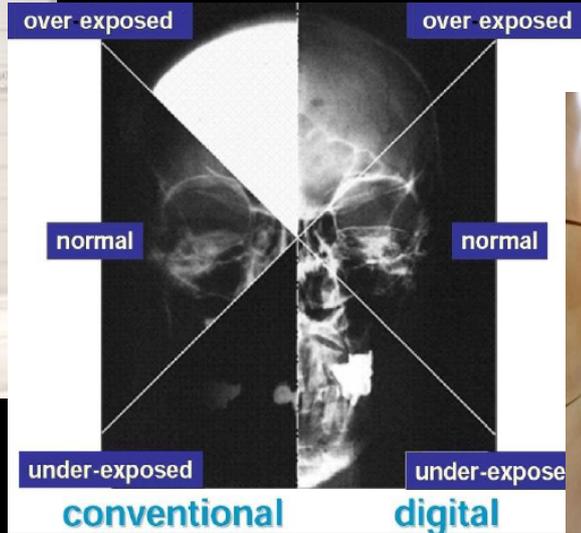


Running jobs: 365644
Active CPU cores: 807139
Transfer rate: 21.54 GiB/sec

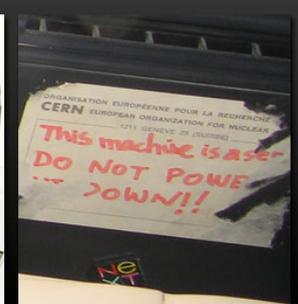


B. Thompson 11.03.1972 Page 7.
Expense outline for a fast interactive computer display system *
1. General: *early all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to*

A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?

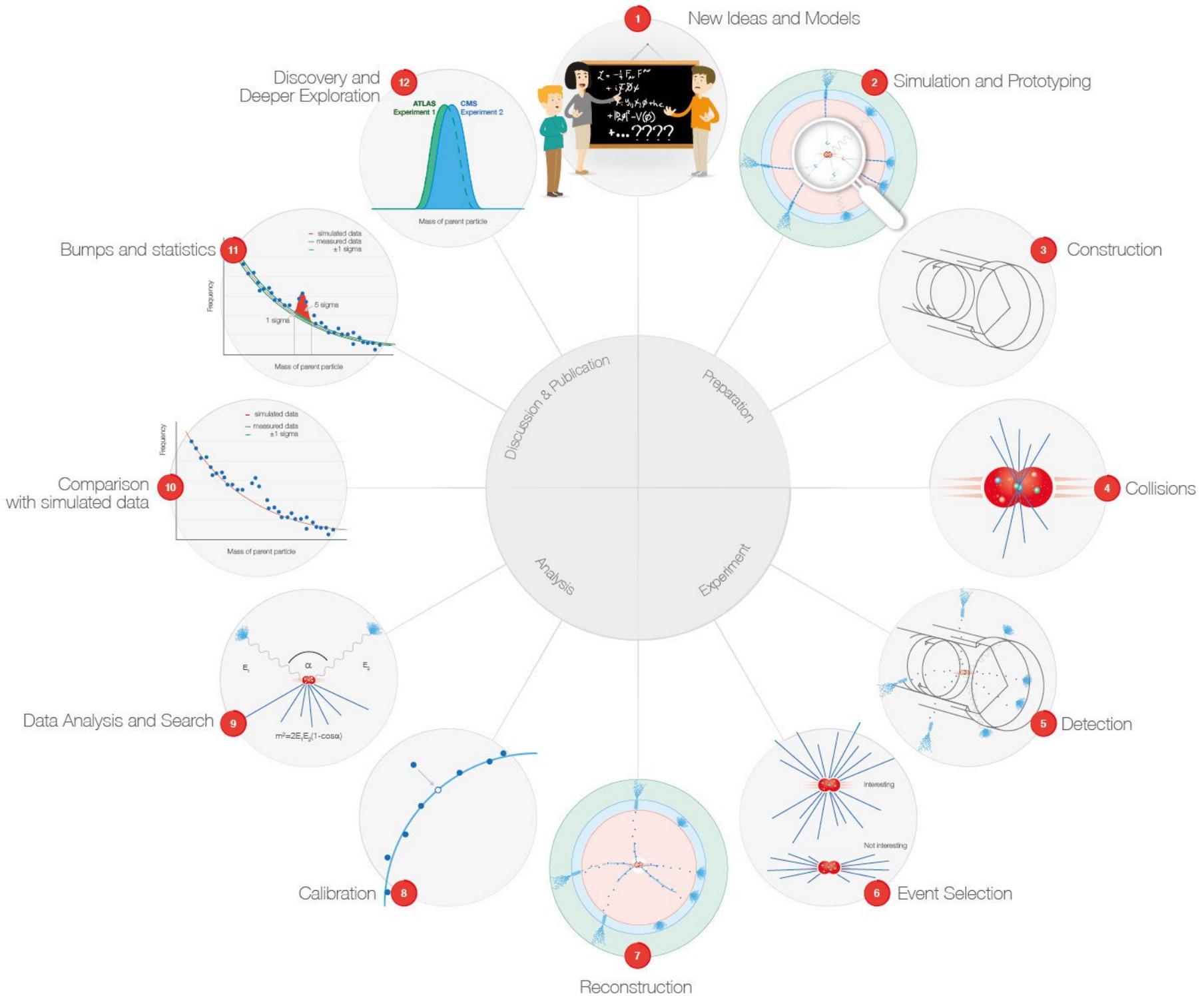


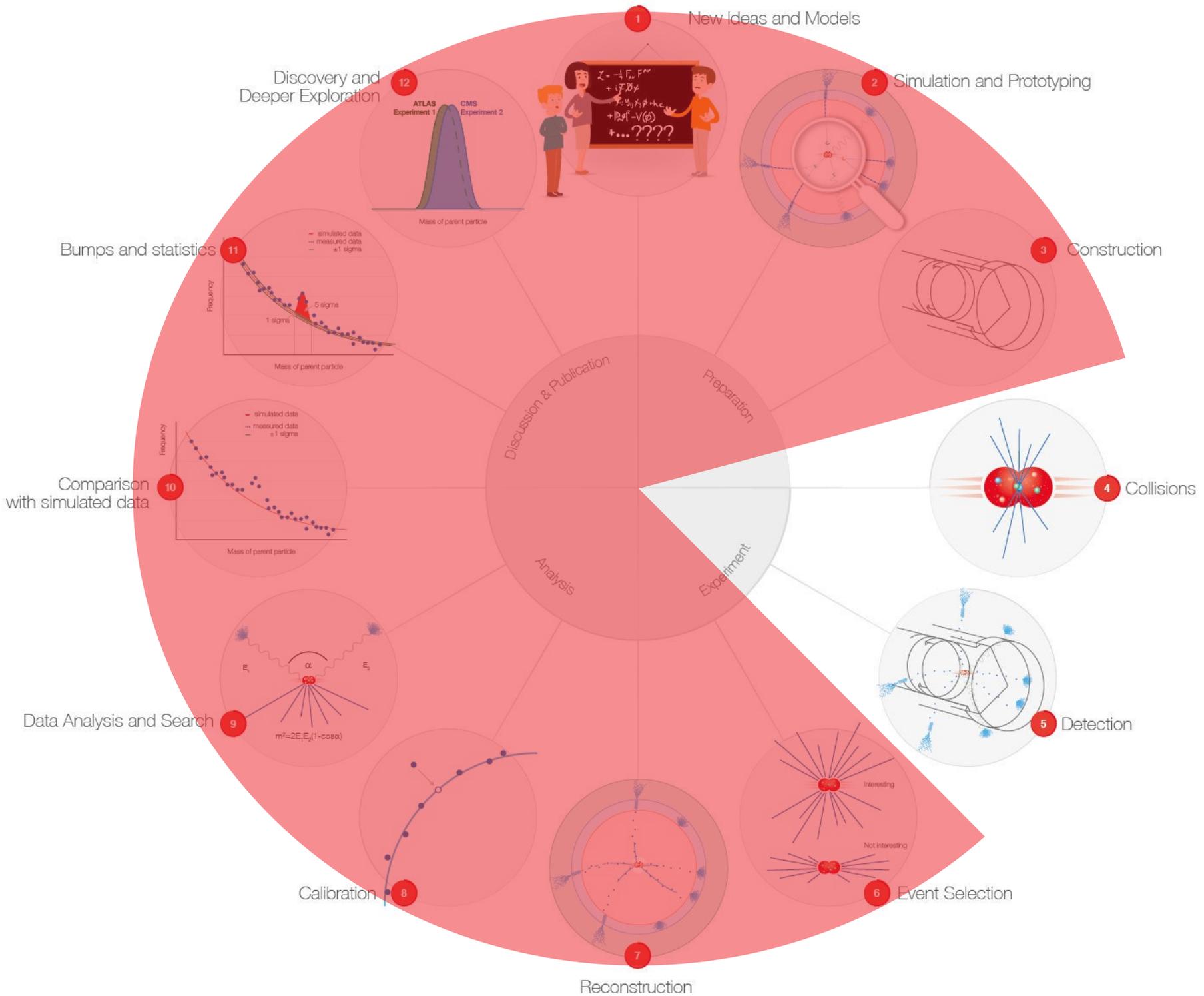
B. Thompson 11.03.1992 PAGE 7
 Propose outline for a fast interactive computer display system *
 1. General: nearly all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to



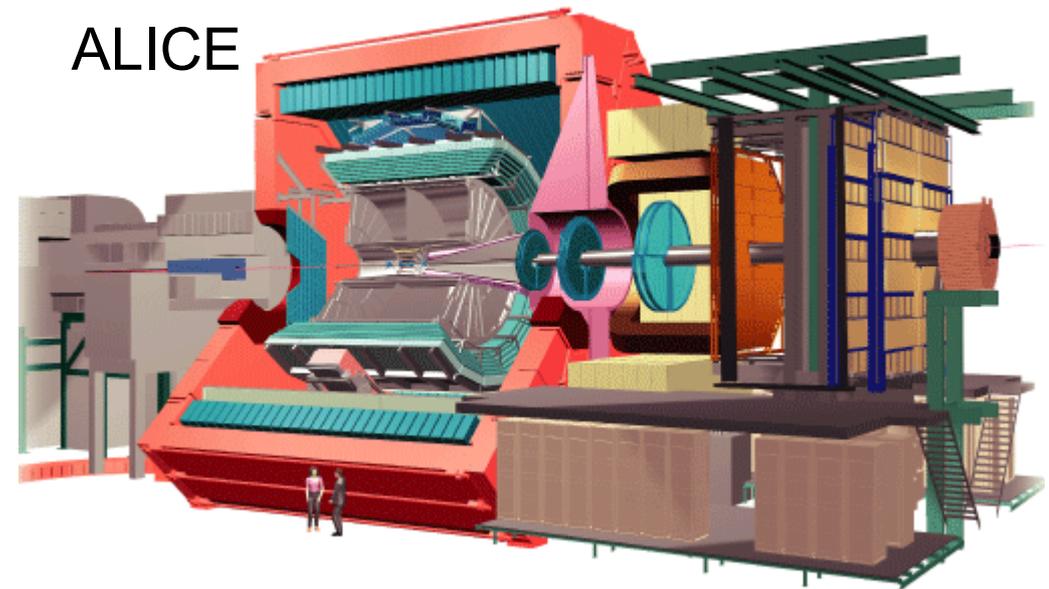
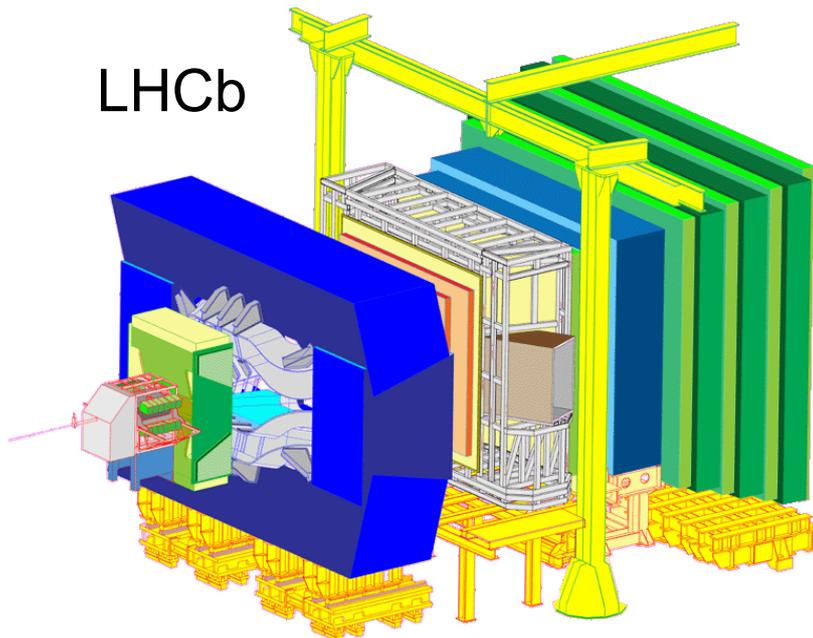
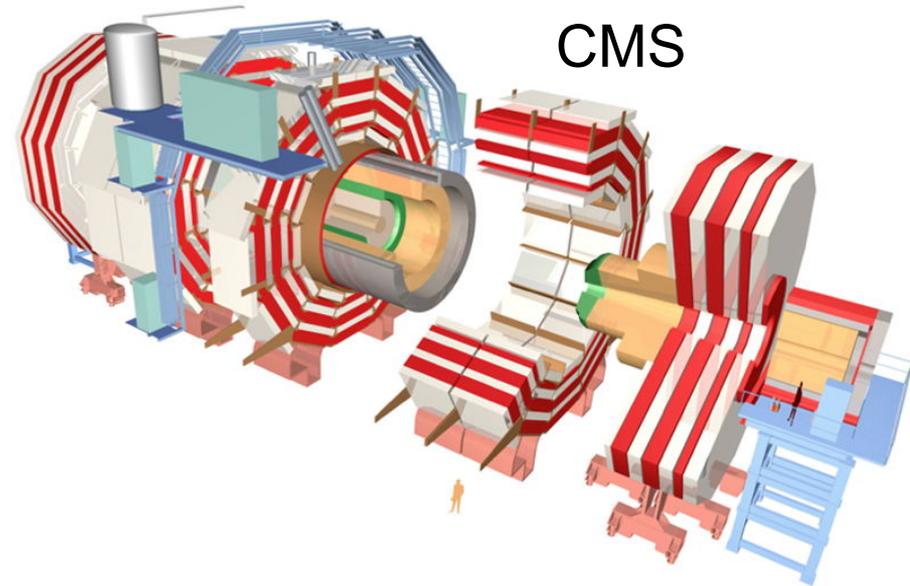
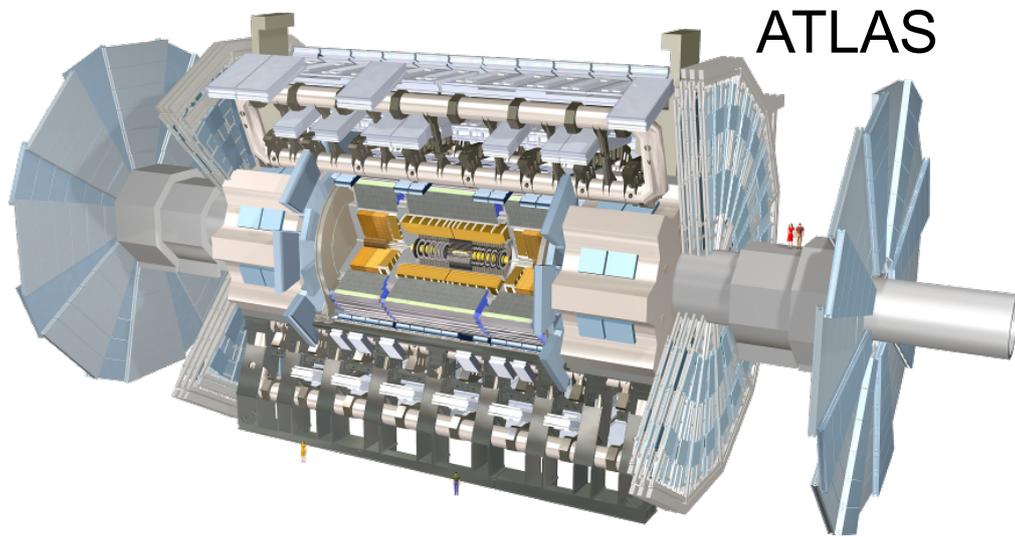
► **Le Web a été inventé au CERN !**

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

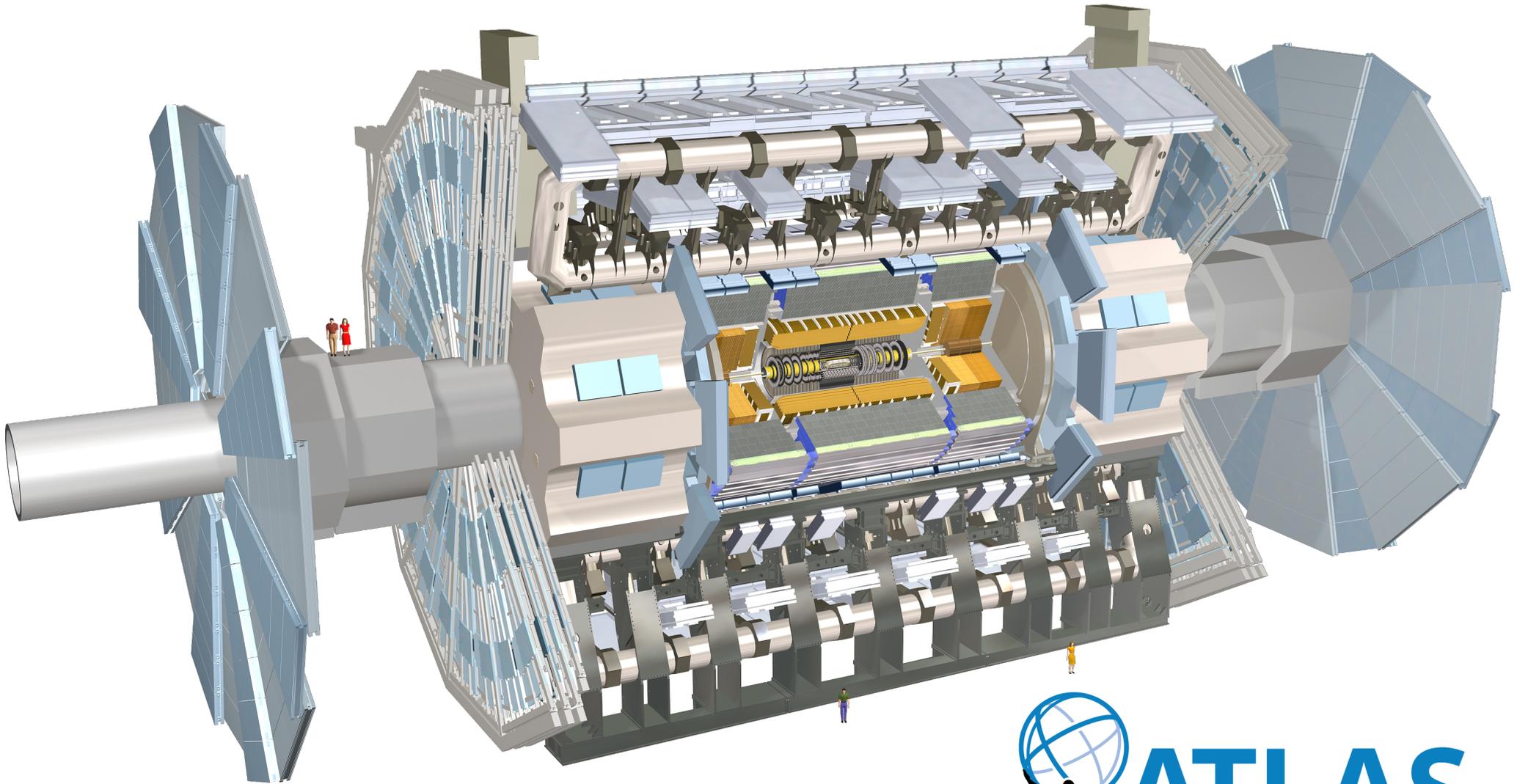




Les détecteurs géants du LHC



Le détecteur ATLAS



La collaboration ATLAS

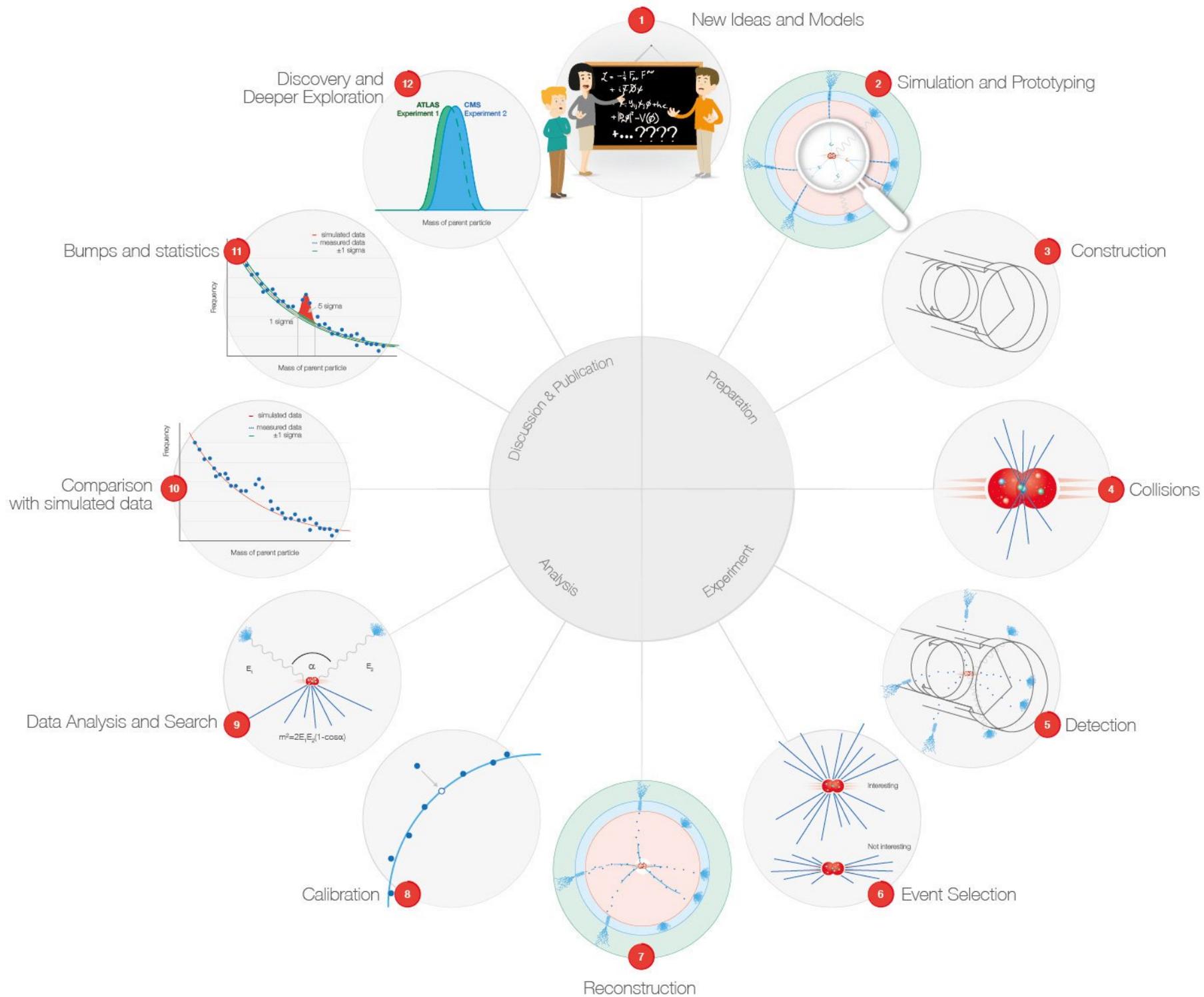


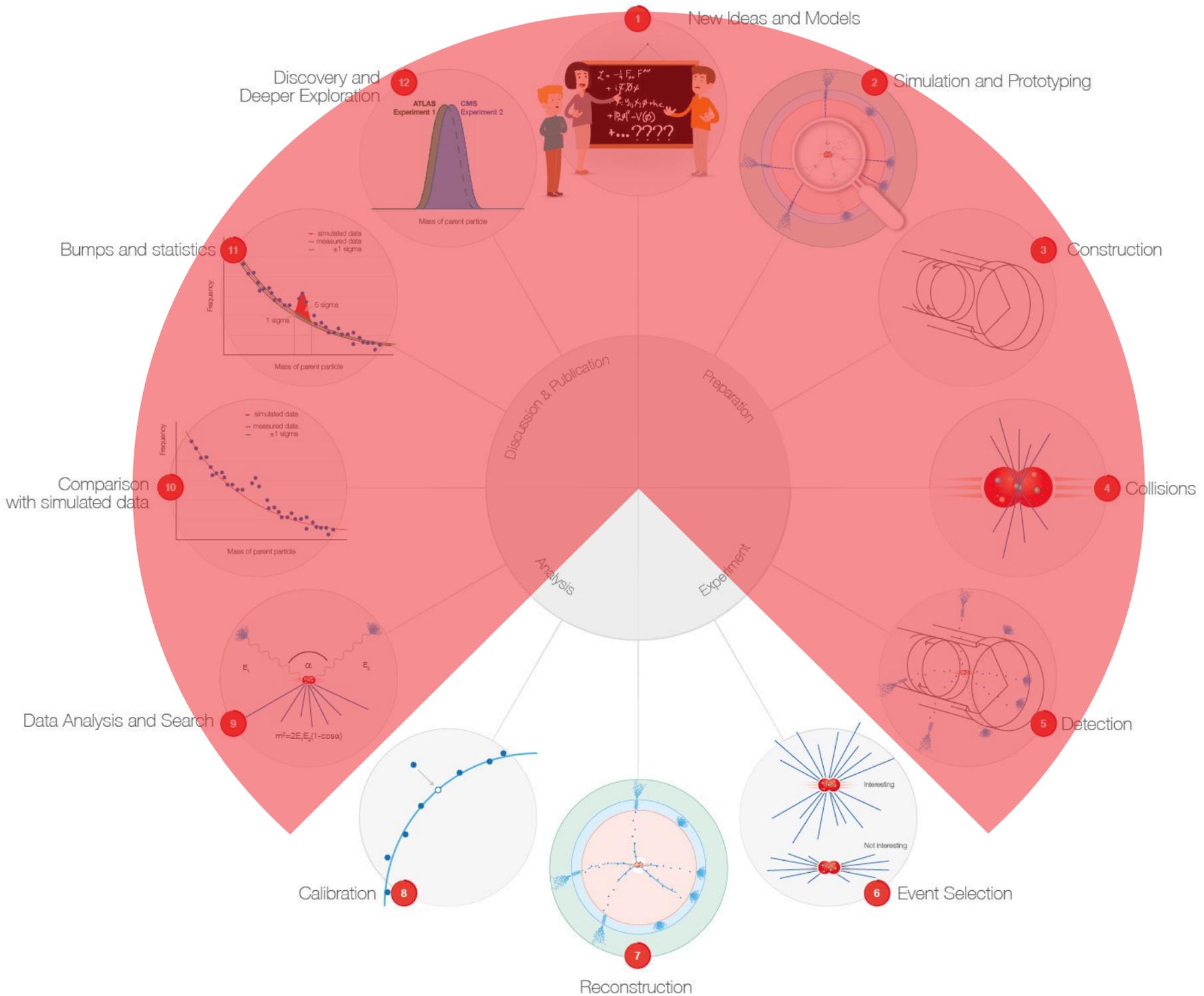
42 pays
236 instituts
2900 scientifiques
<https://atlas.cern>



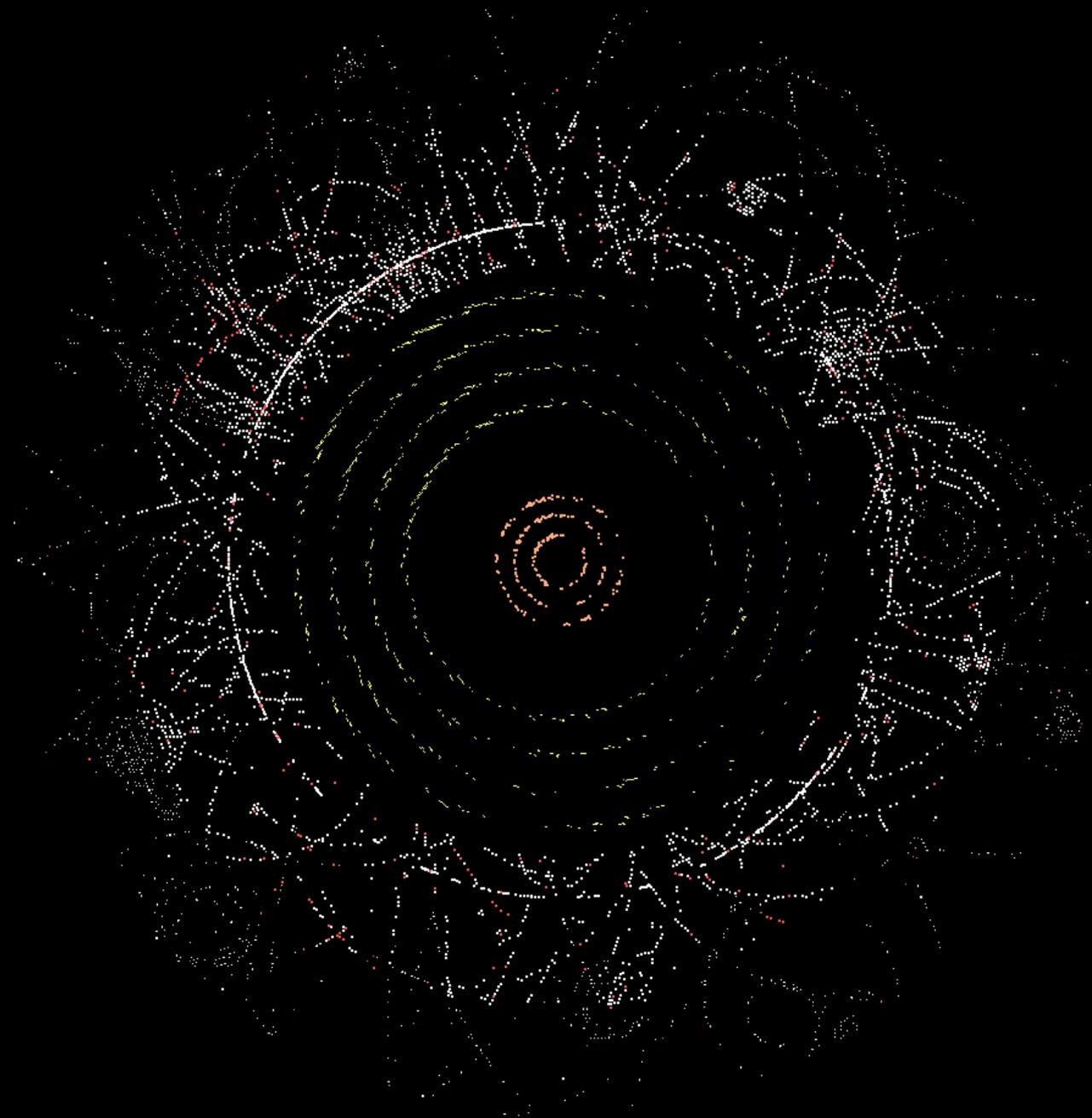
Le détecteur ATLAS



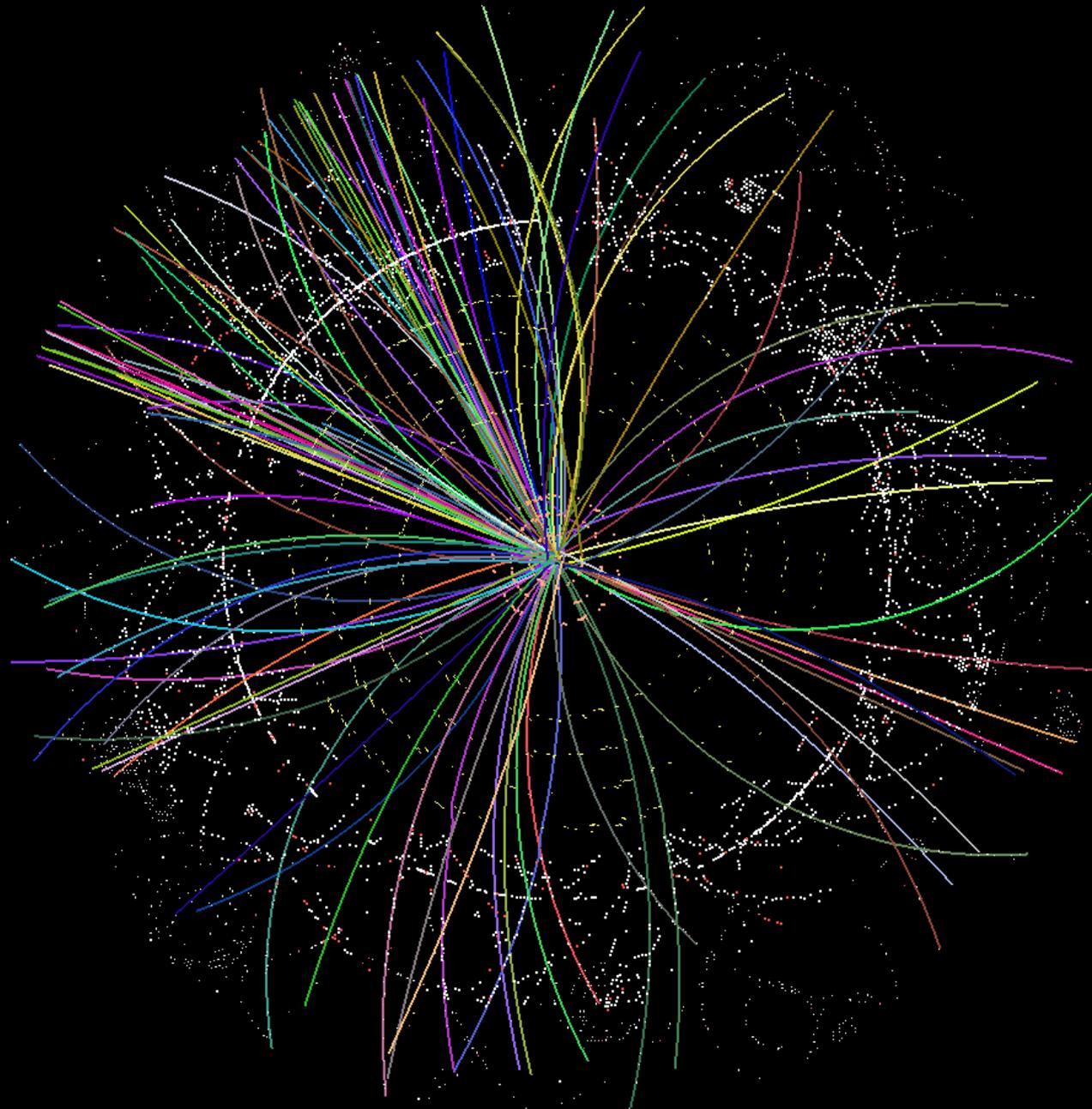




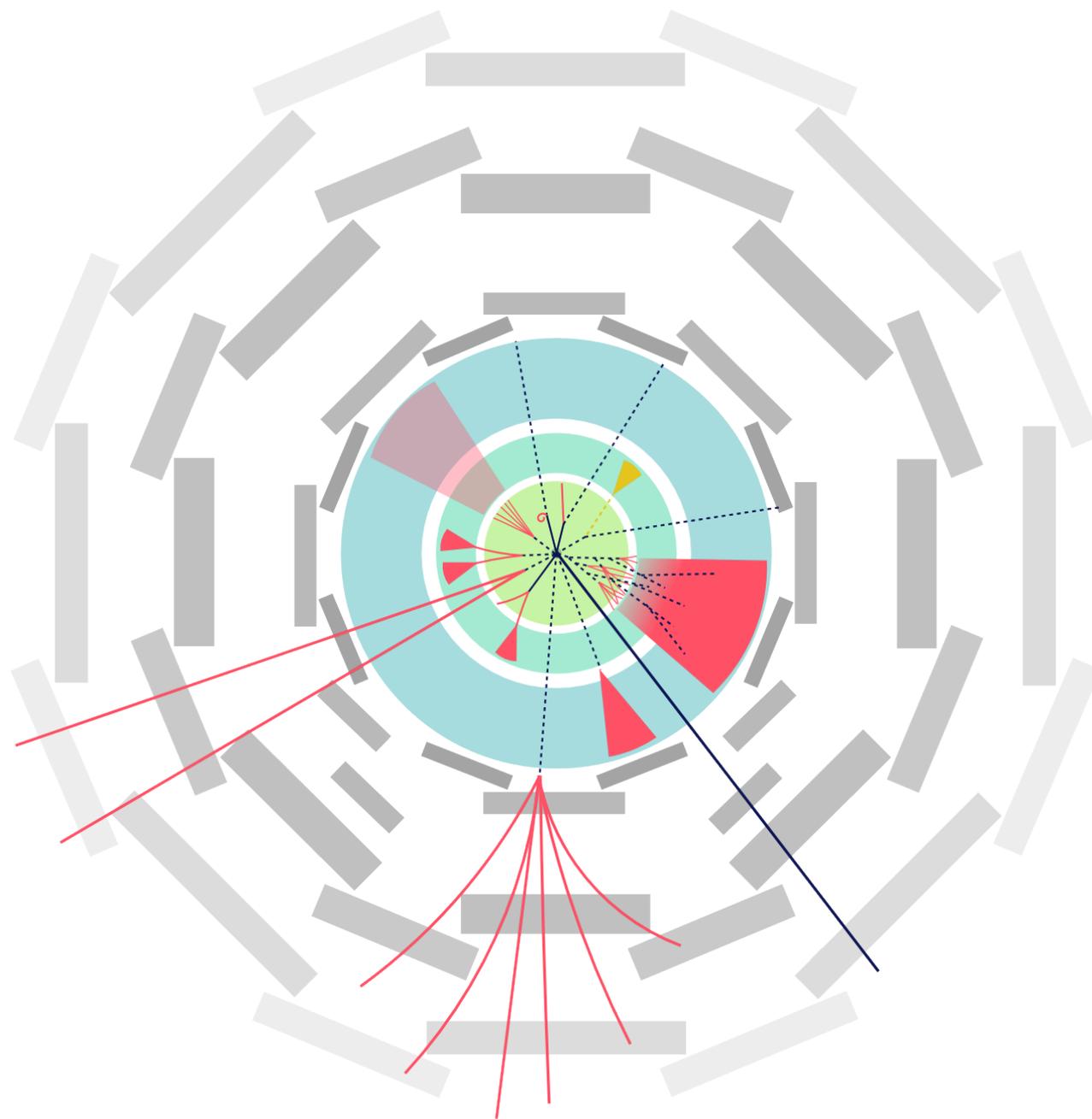
Passage des particules

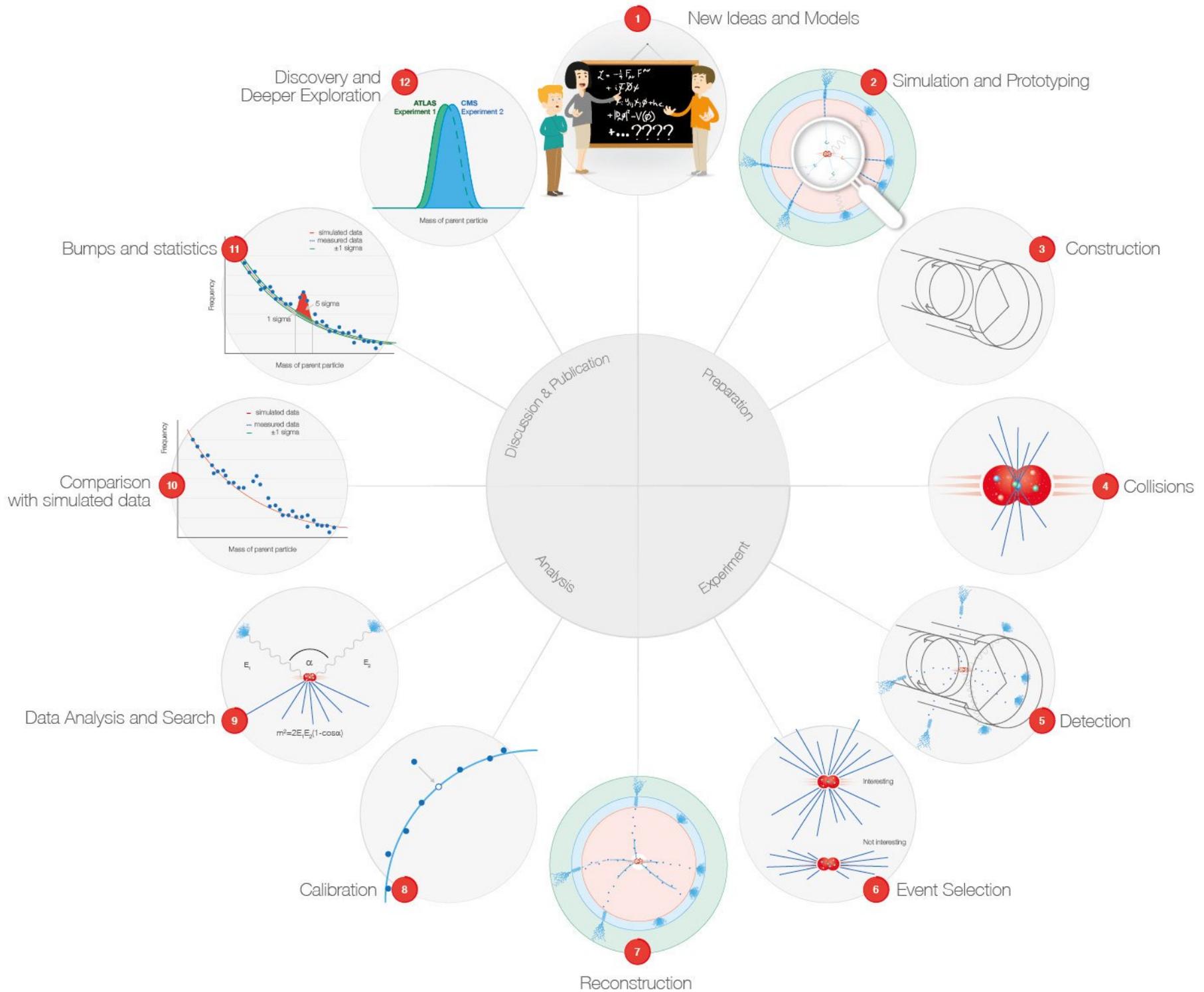


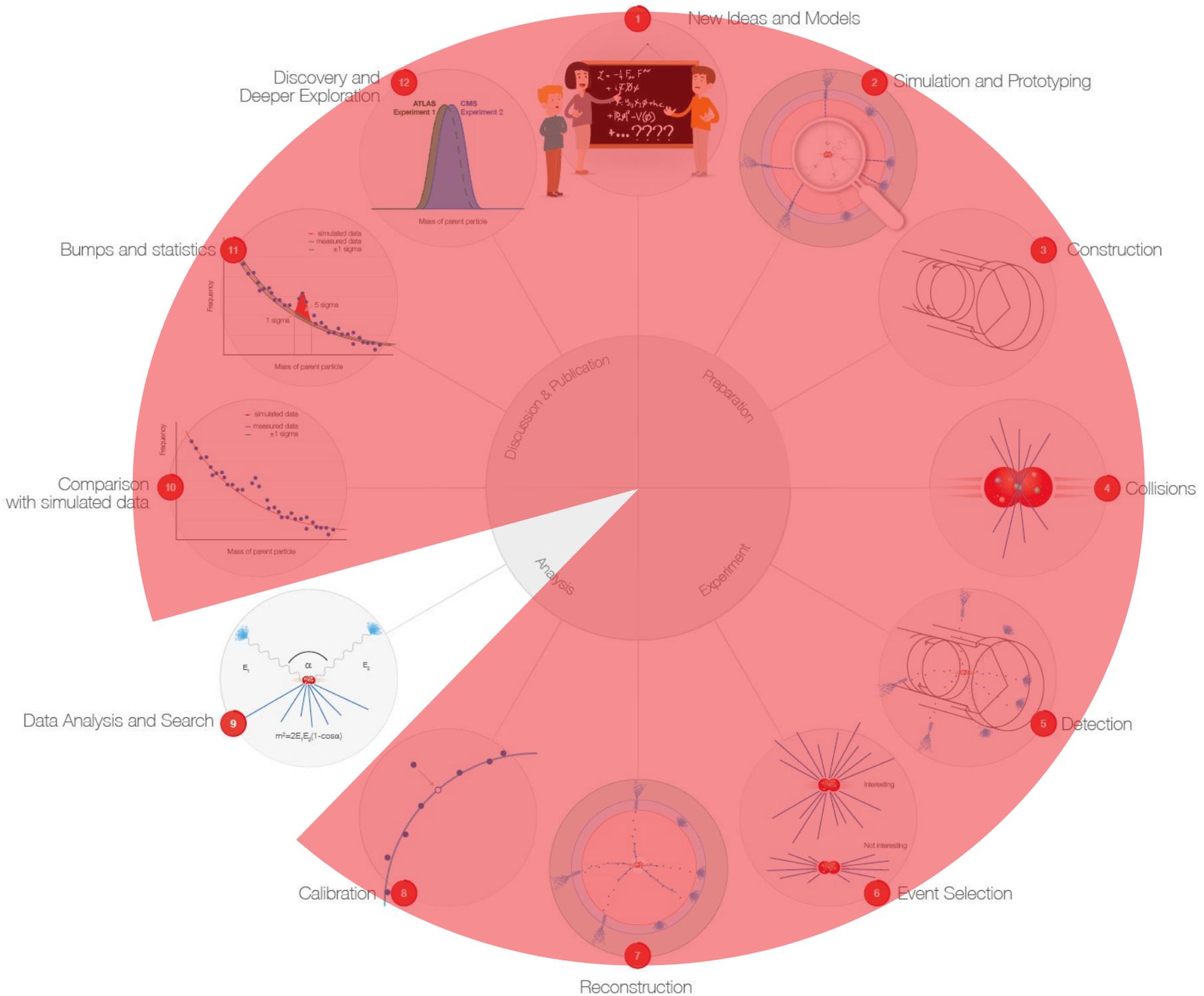
Reconstruction des trajectoires



Variété d'objets



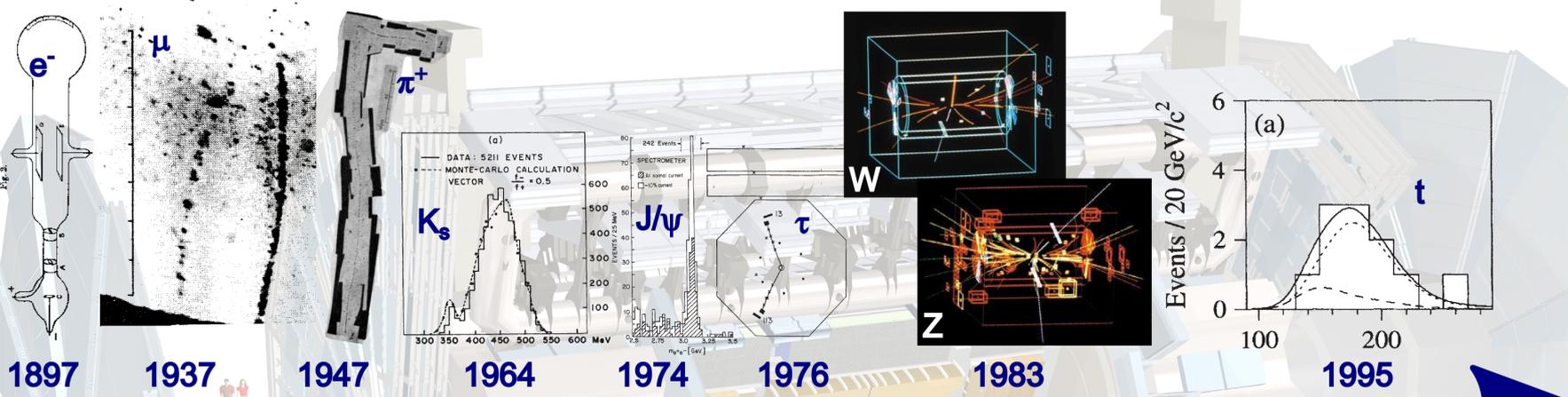




Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

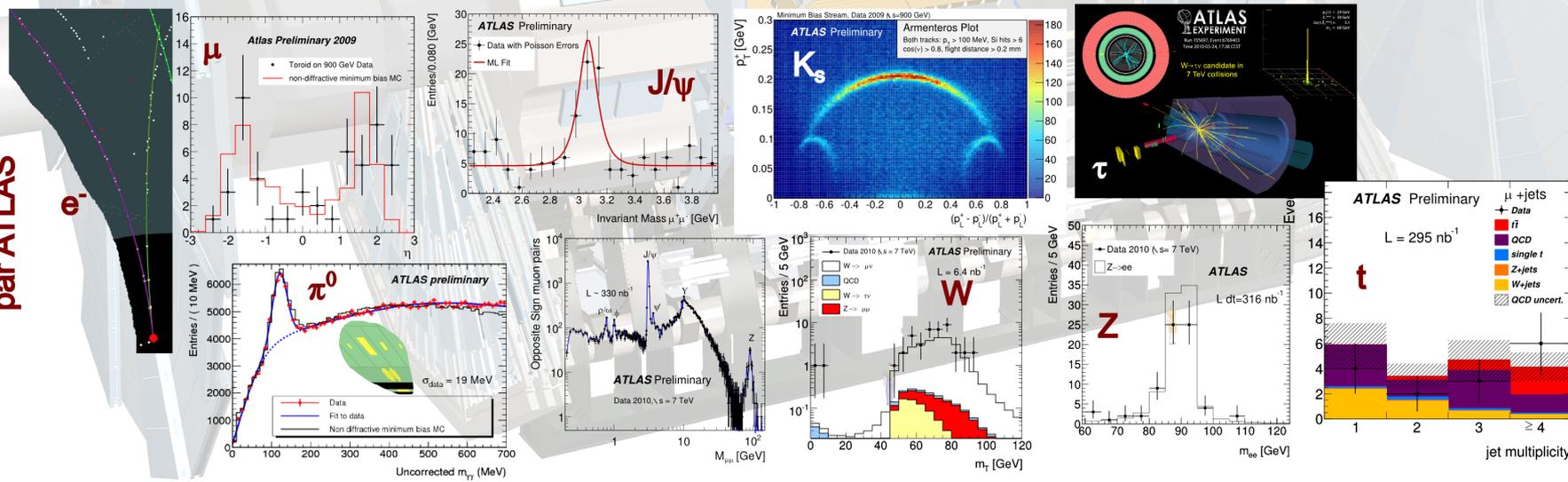
Découverte historique



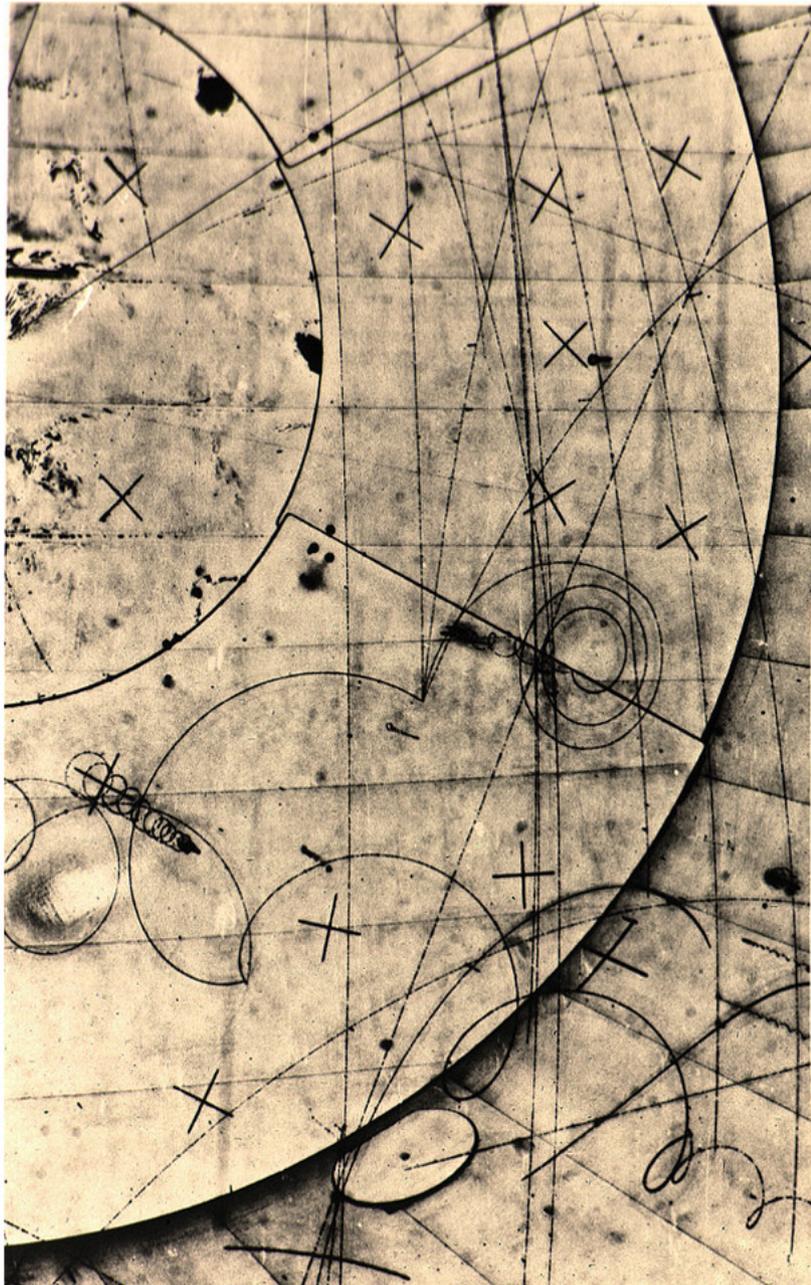
déc 2009

août 2010

Redécouverte par ATLAS



« Vraies » photographies



AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION

EVE
 νp



KINK

.14



68681

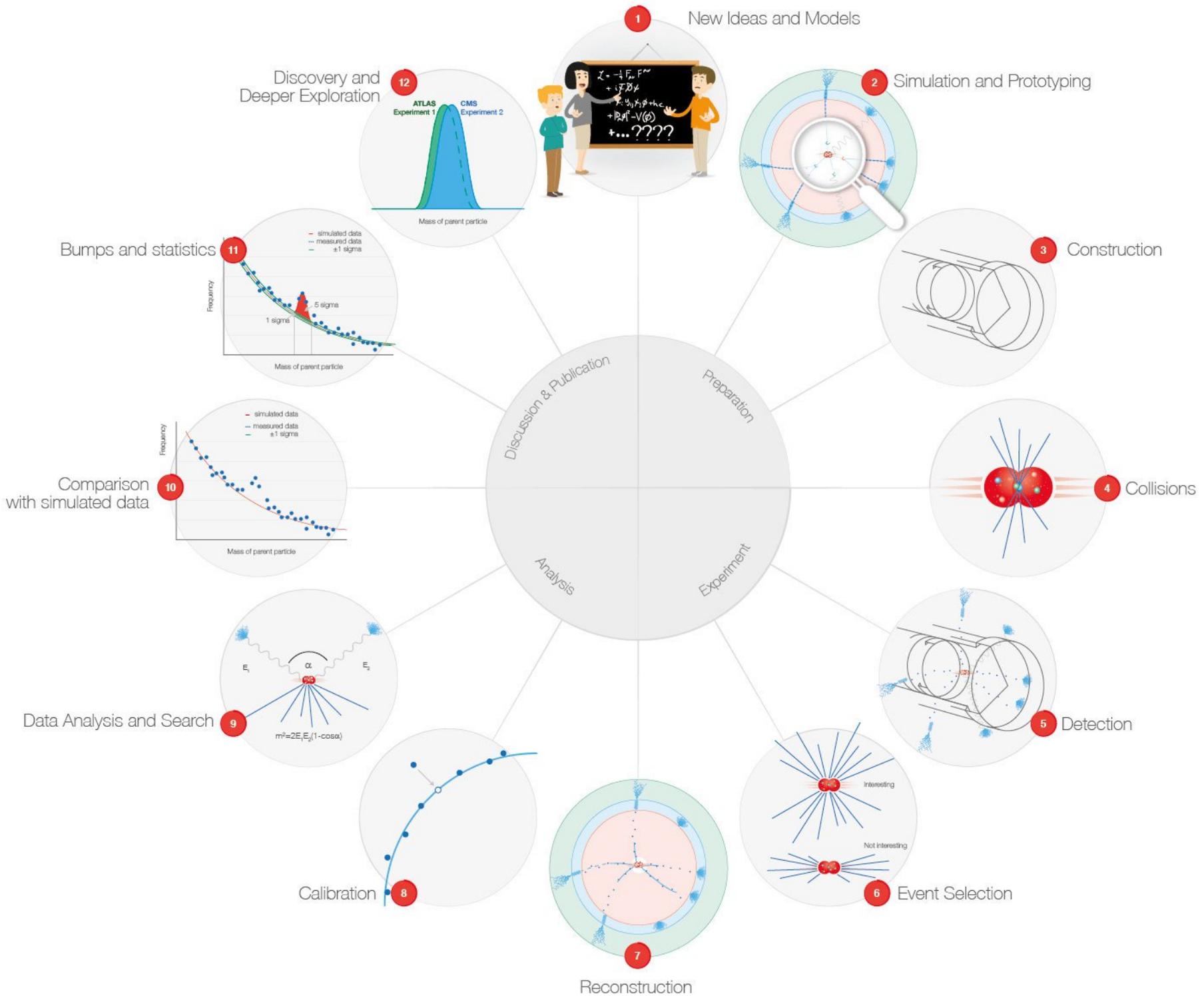
n
 p

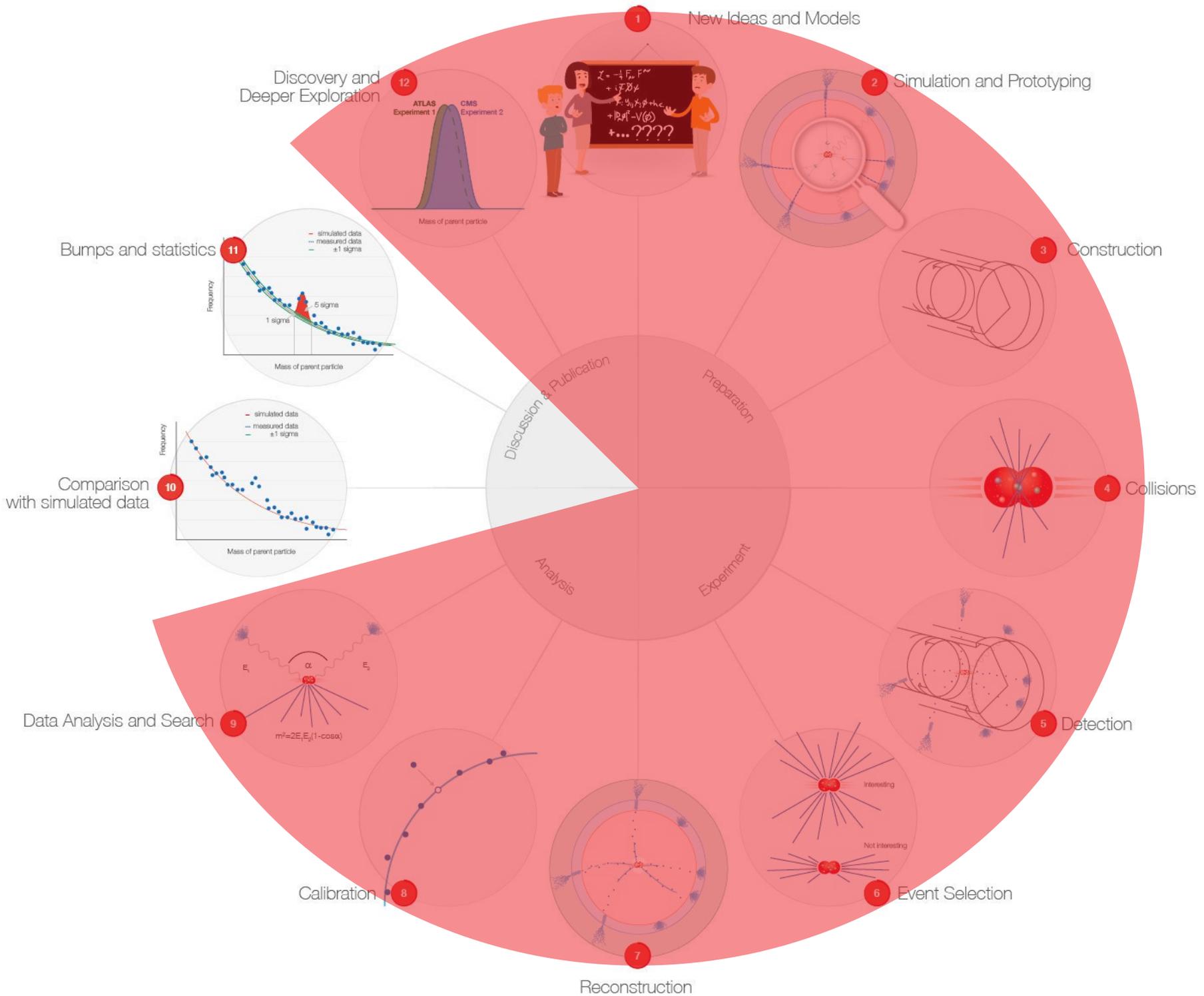
NEUTRINO
BEAM

MOMENTUM IN GeV/c



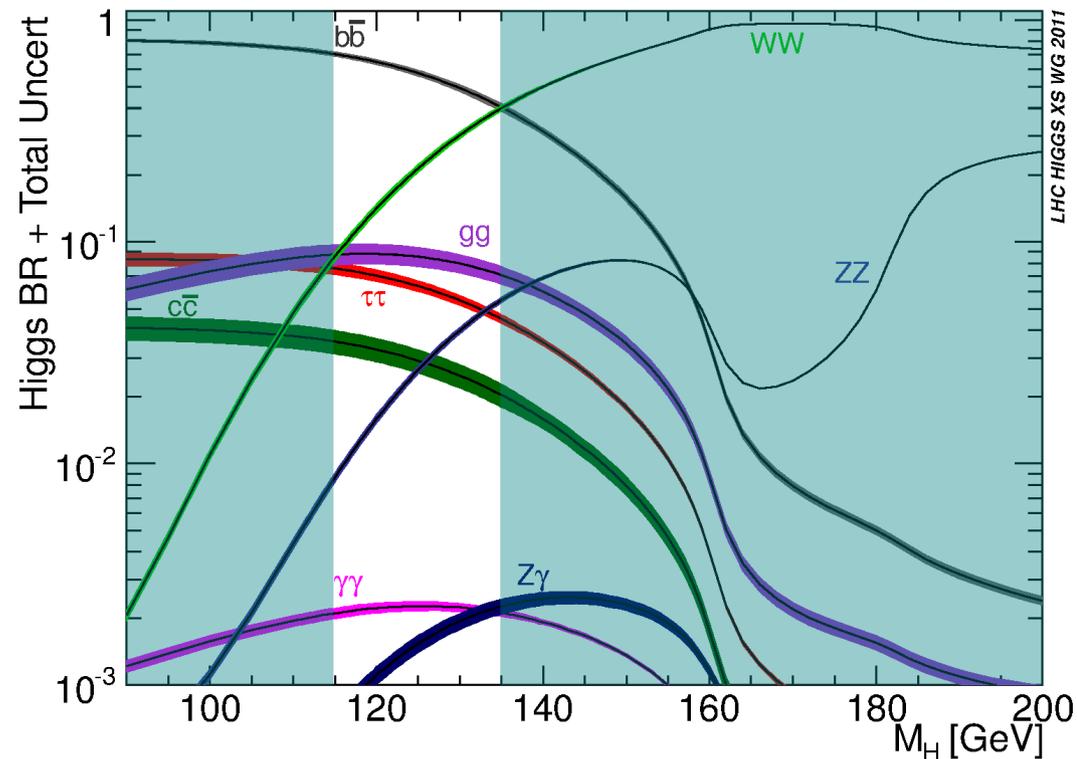
Accélérateur de science





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

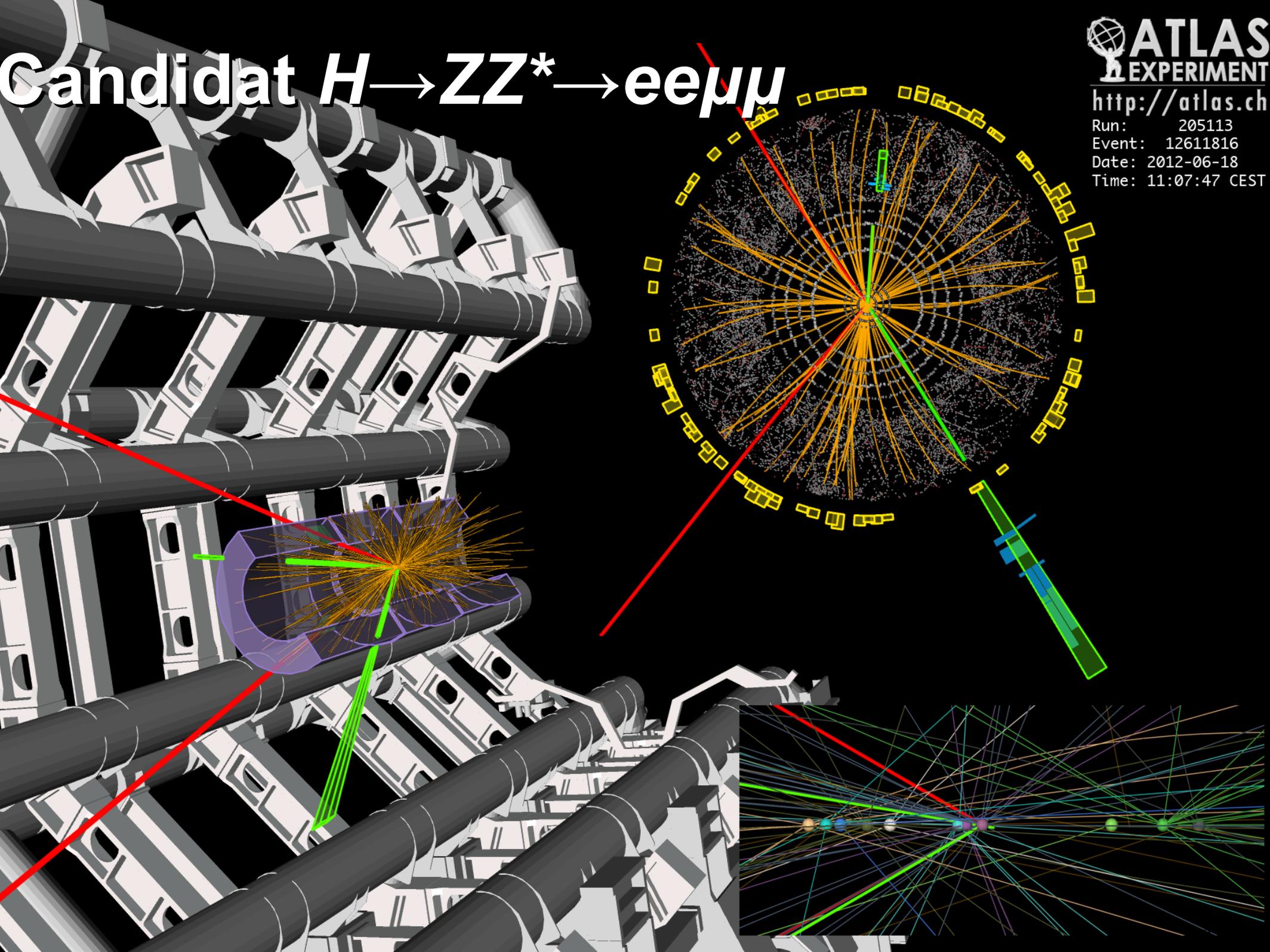
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, très difficiles à différencier de ce que l'on cherche
- Une aiguille dans une botte d'aiguilles



Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

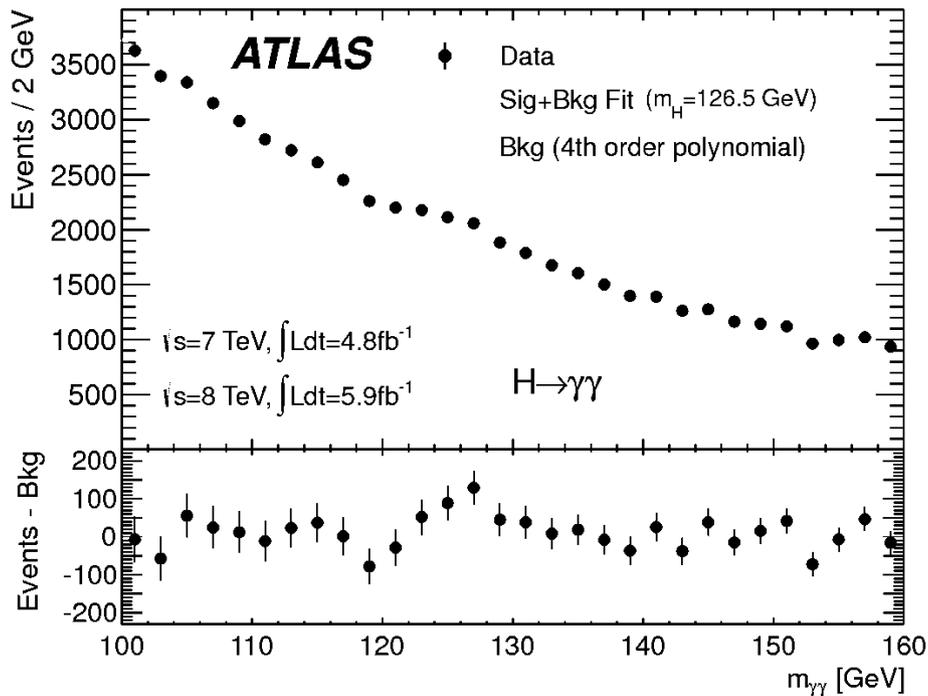


Candidate $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow ee\mu\mu$



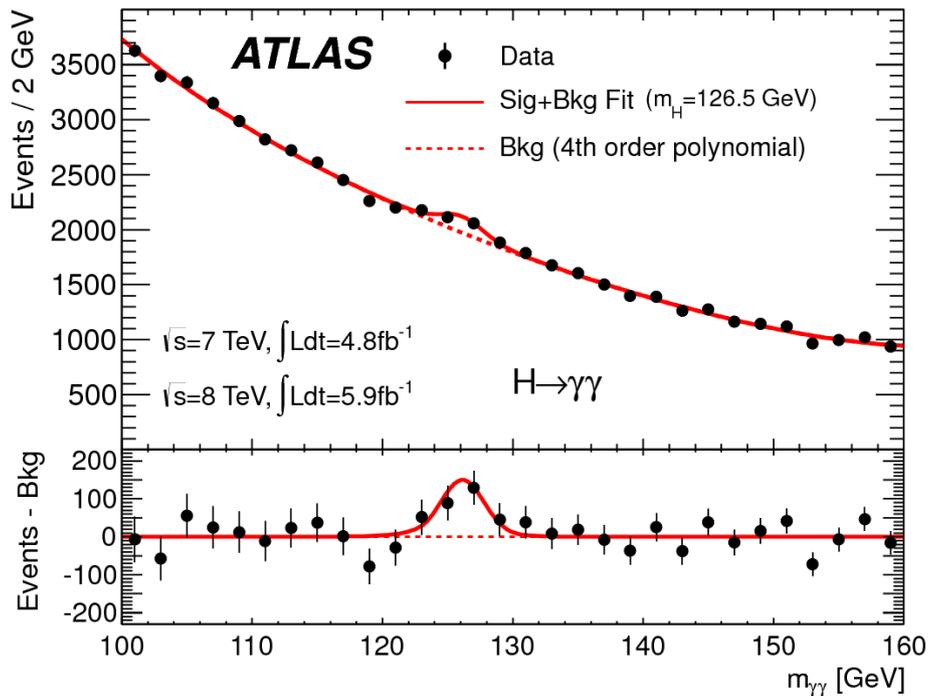
Mesure

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



Mesure

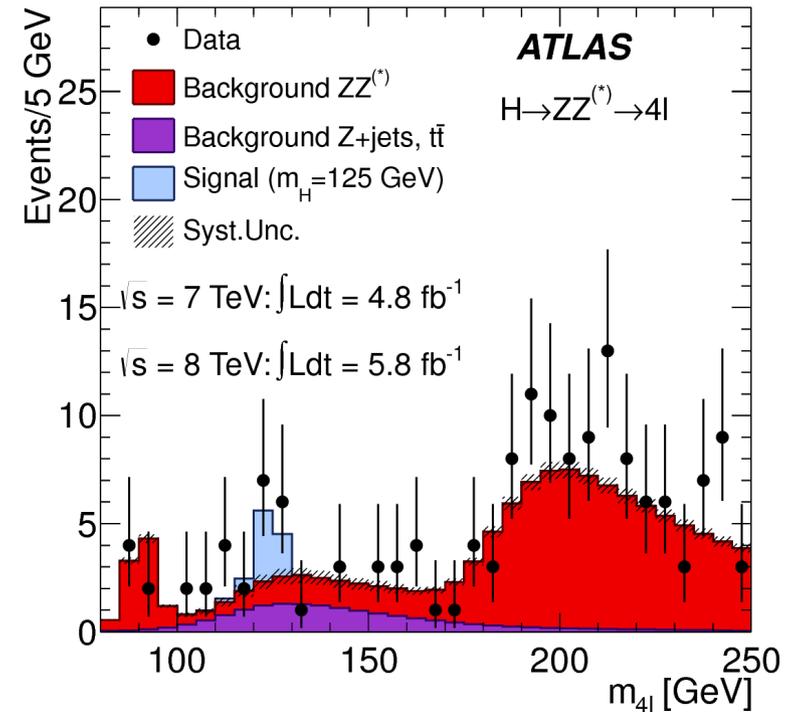
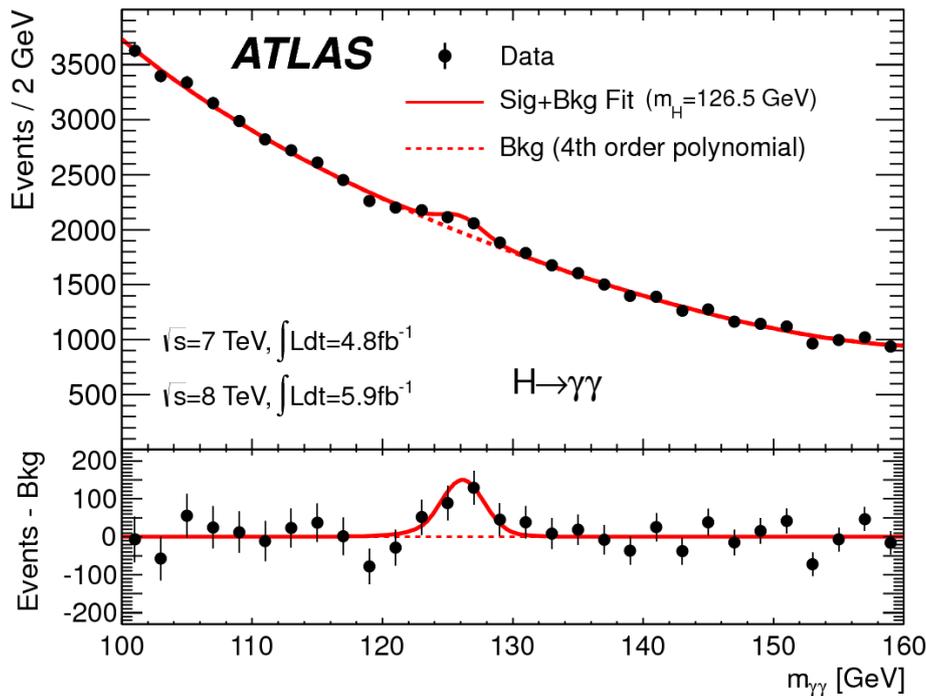
- Higgs en 2 photons
 - ▶ Bruit de fond important
 - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



Mesure

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

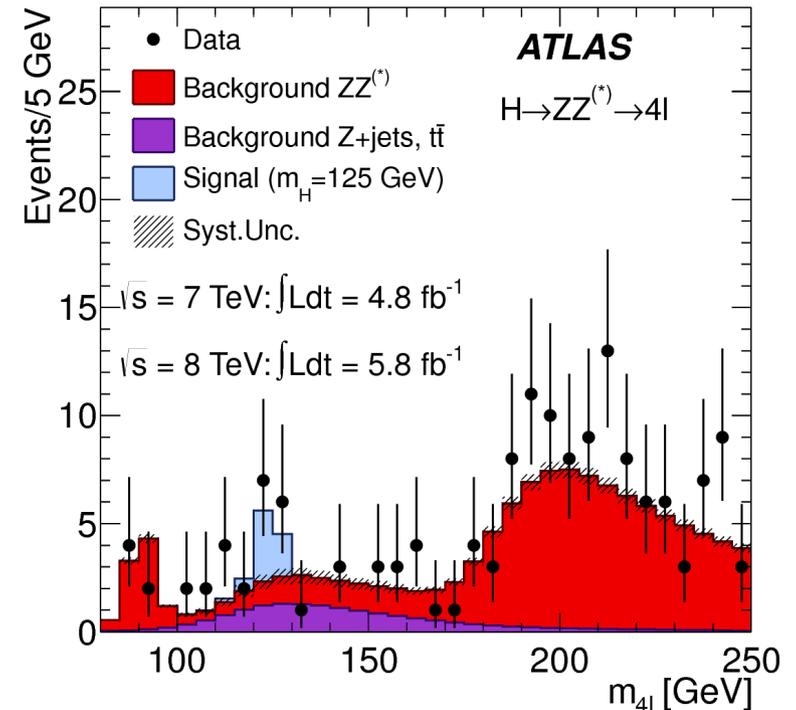
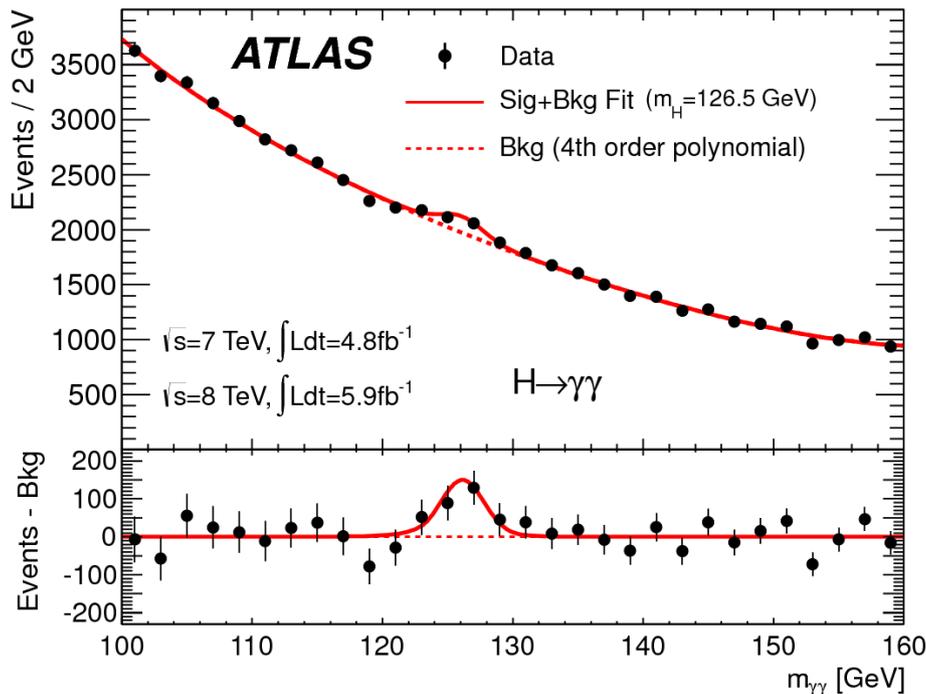
- Higgs en ZZ
 - ▶ Très peu de bruit de fond
 - ▶ Très peu d'événements



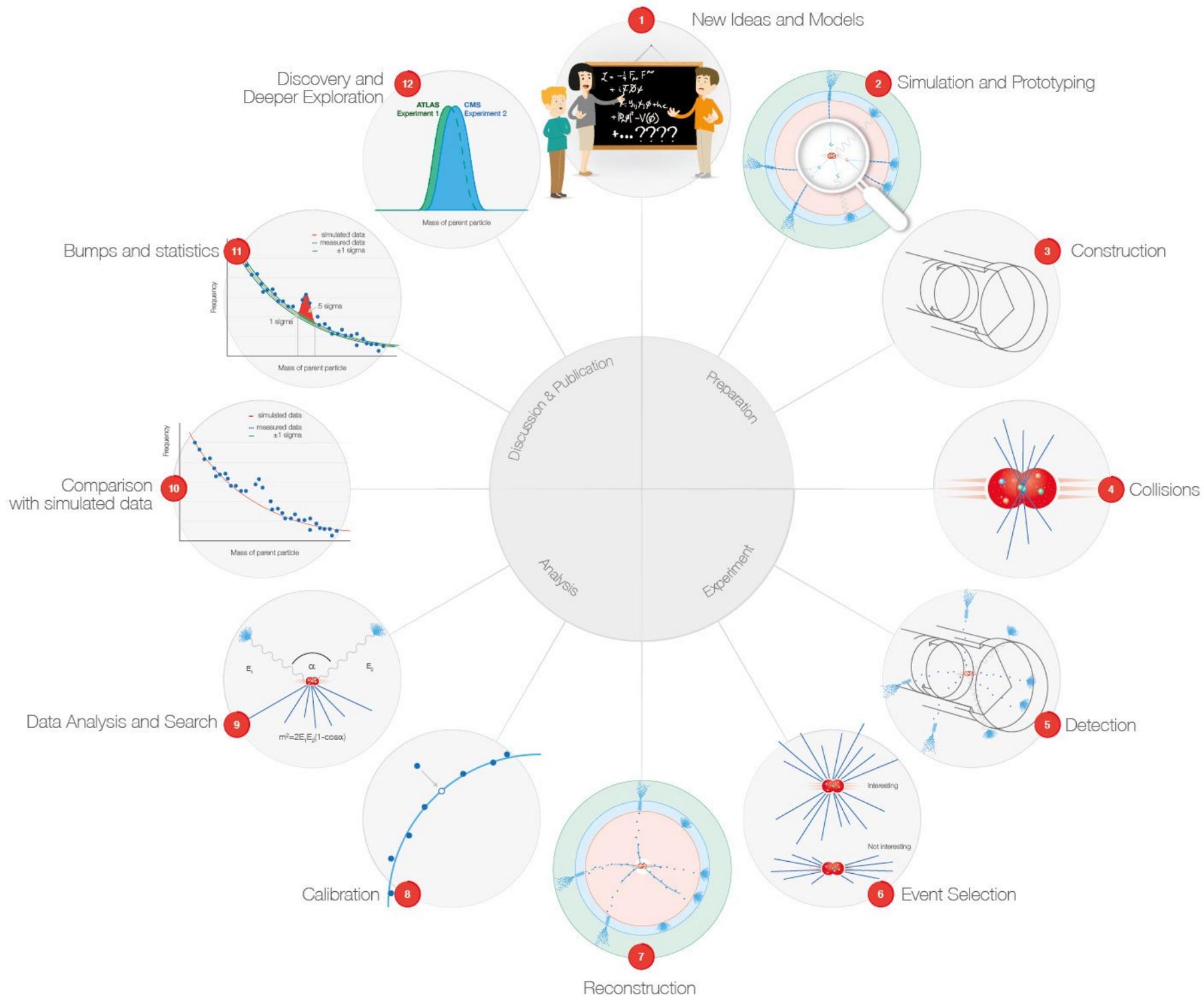
Mesure

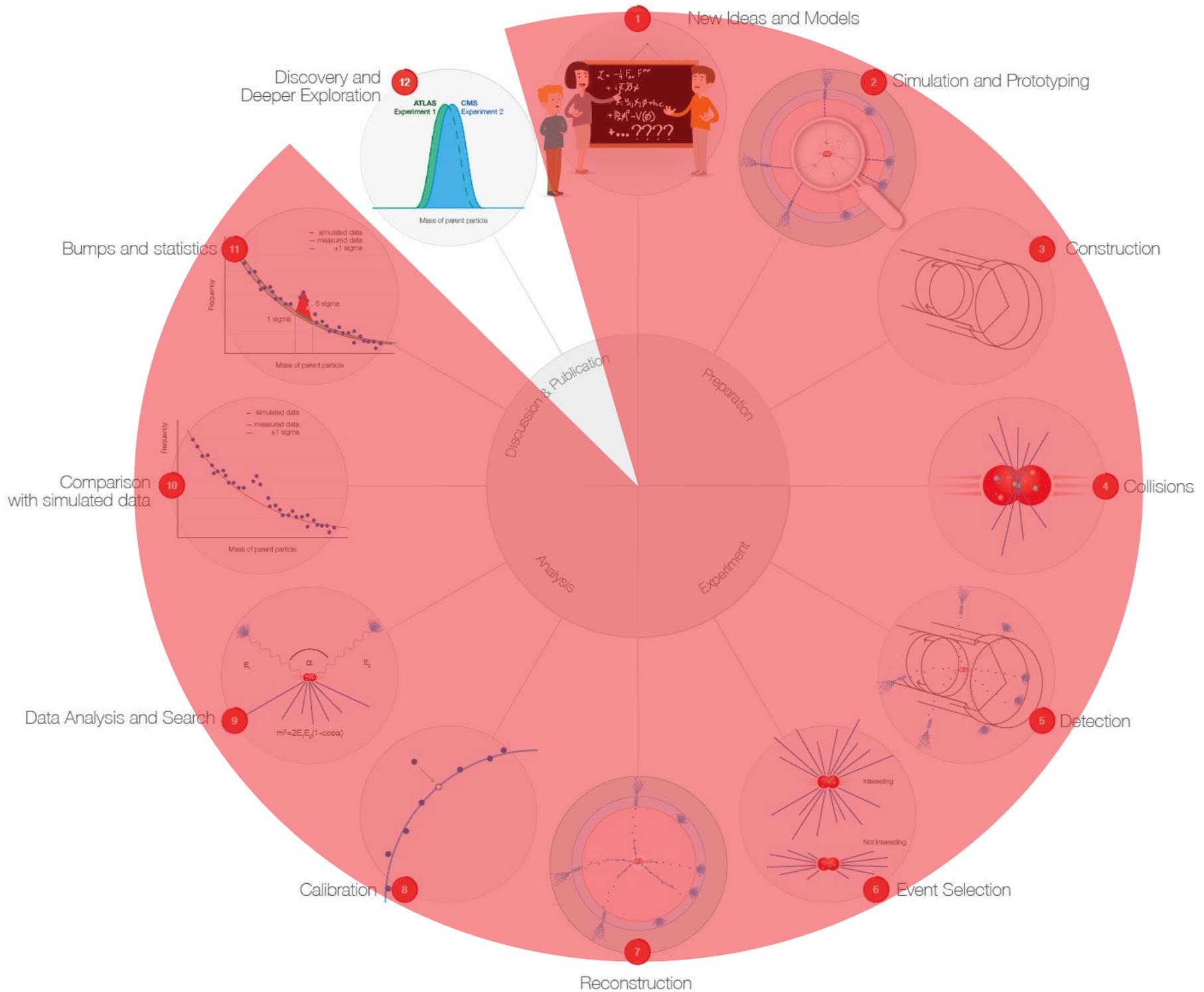
- Higgs en 2 photons
 - ▶ Bruit de fond important
 - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

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

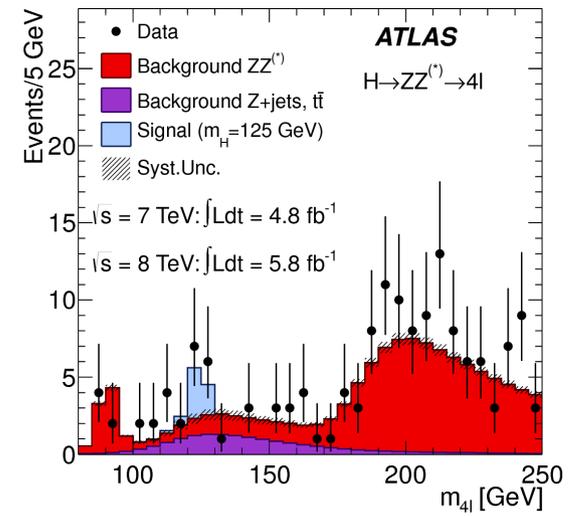
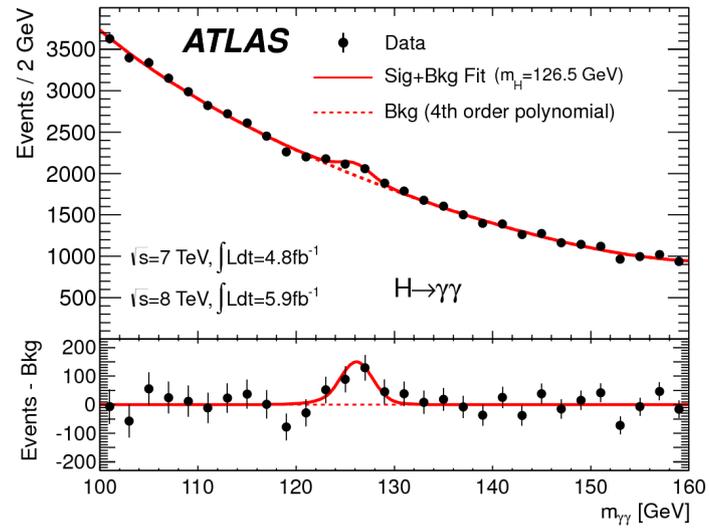


Est-ce que cela est significatif ?
Outils statistiques pour répondre

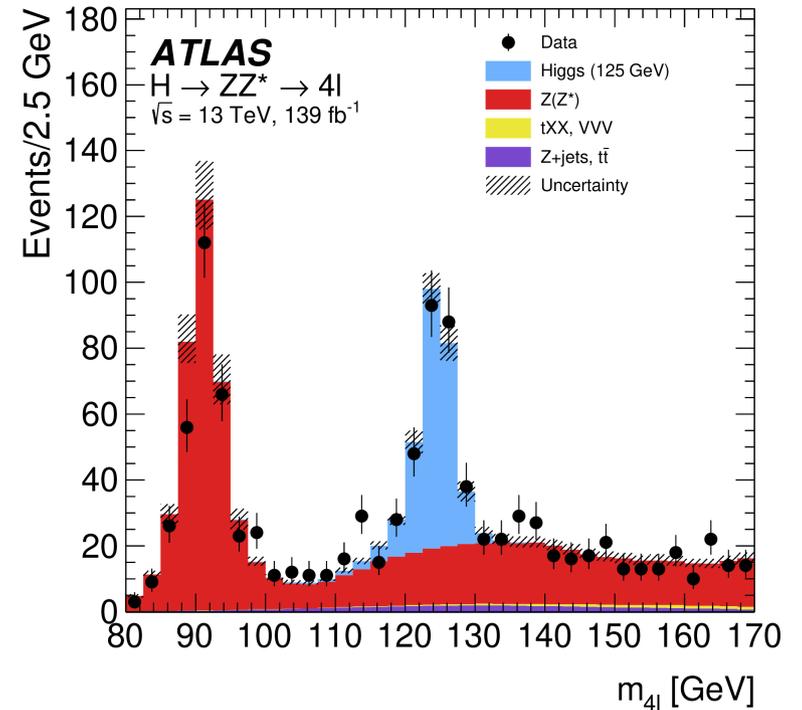
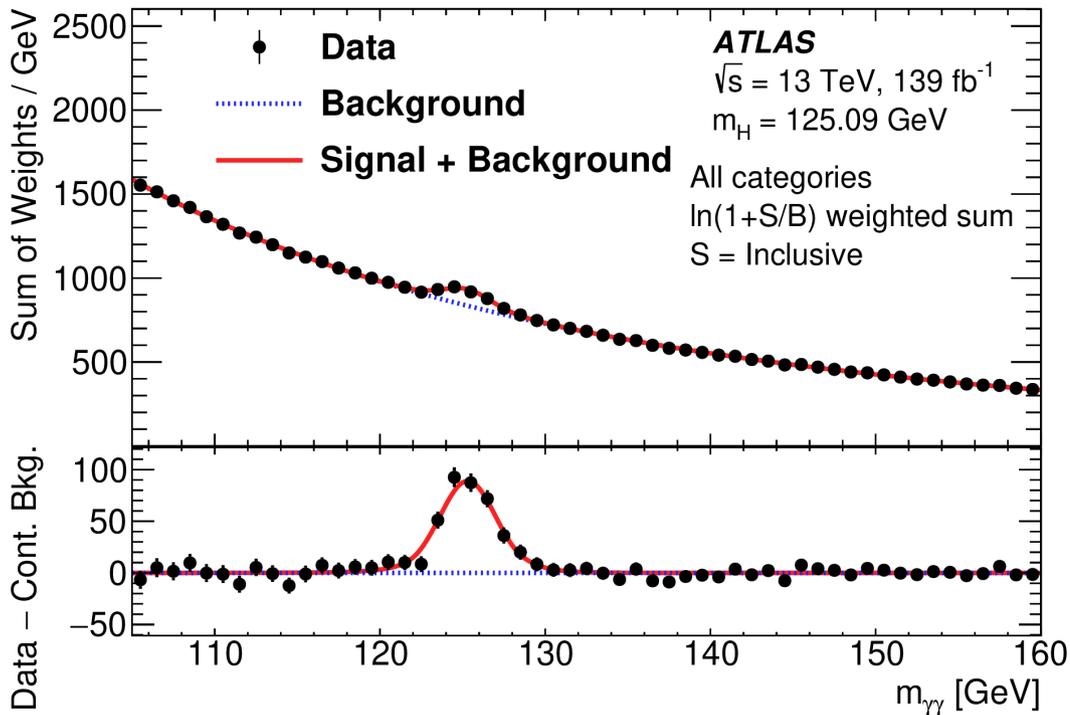
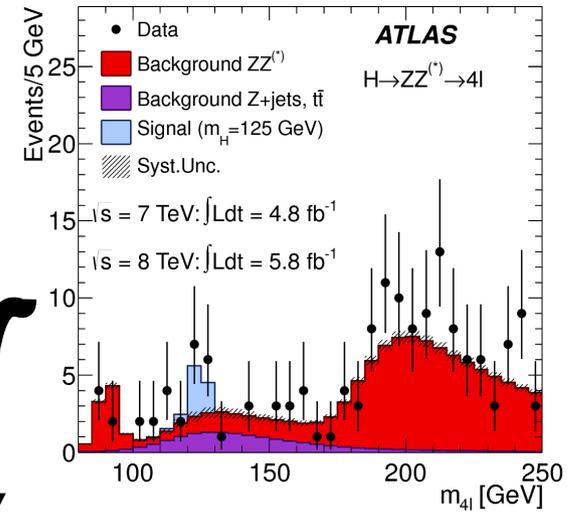
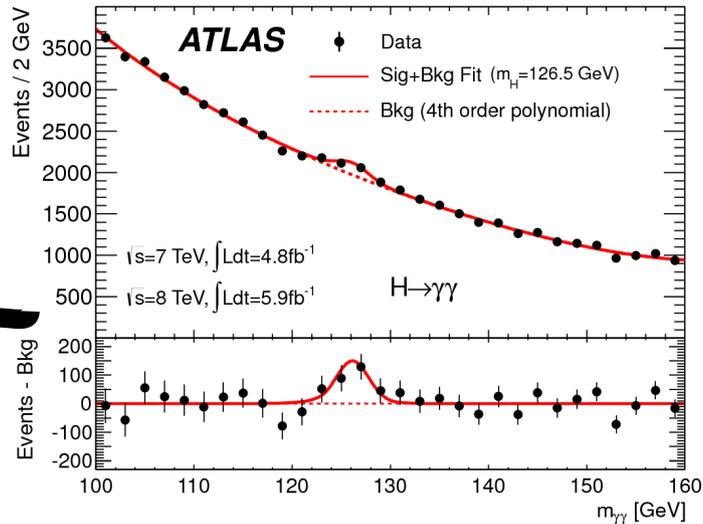




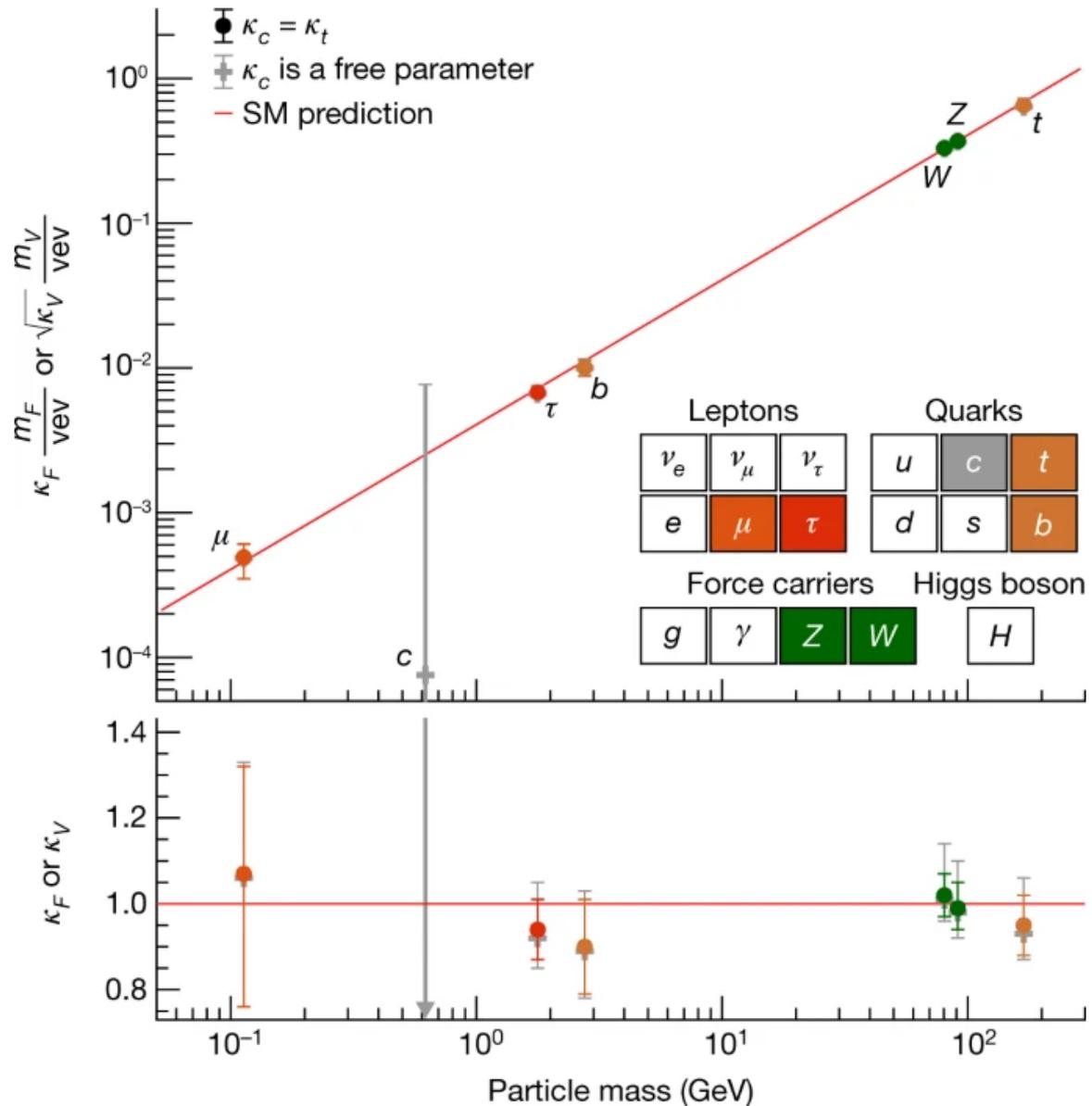
Hier...



Hier... et aujourd'hui



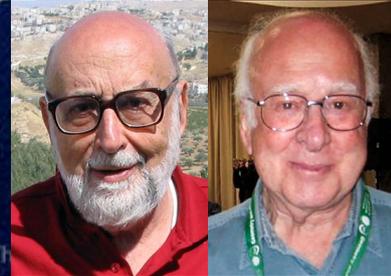
Masse des particules et couplage au boson de Higgs



Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs

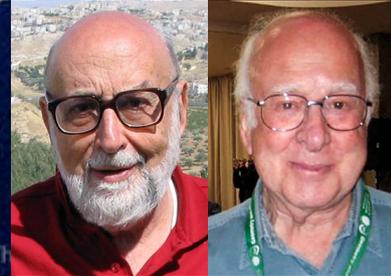


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs

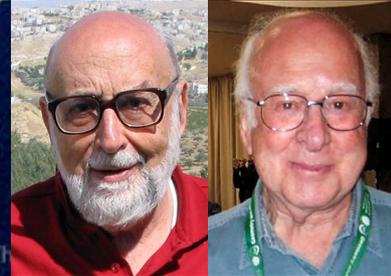


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



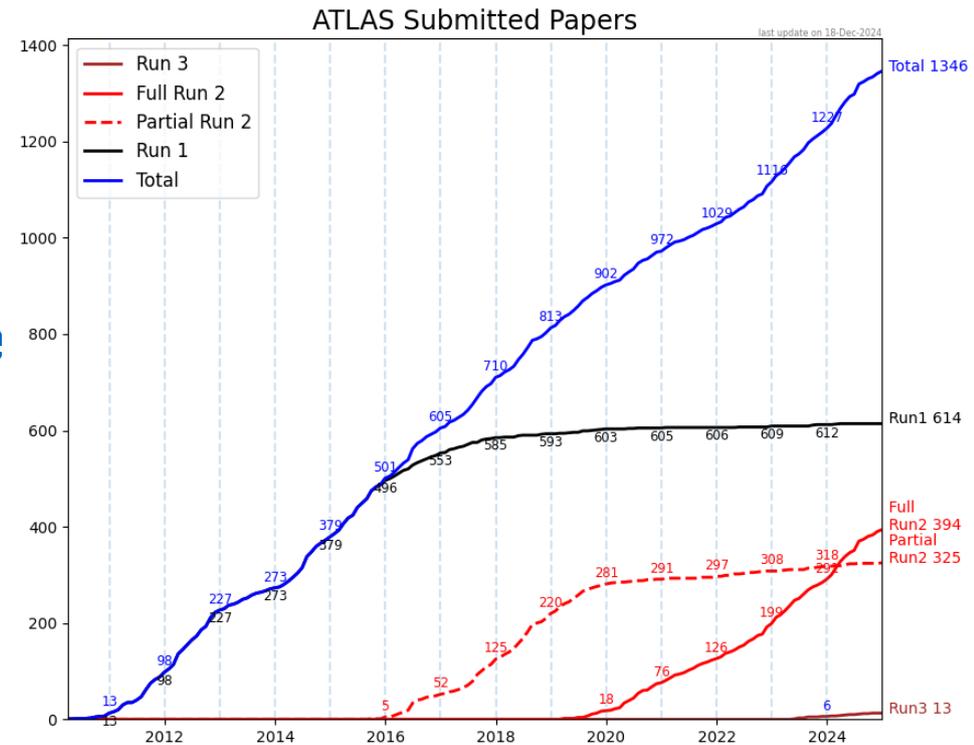
« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



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 blue of the sky and the white of the ice. 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 !

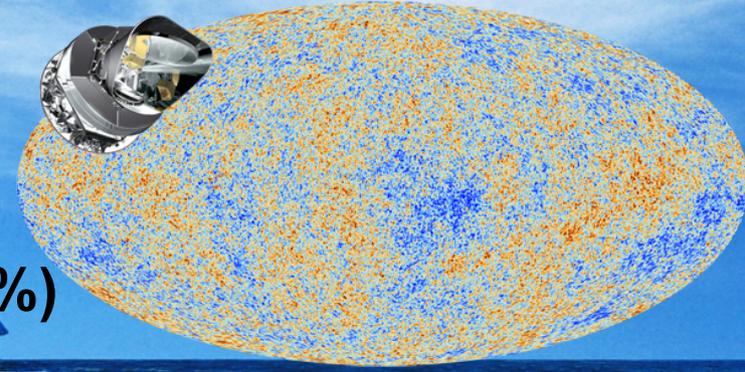


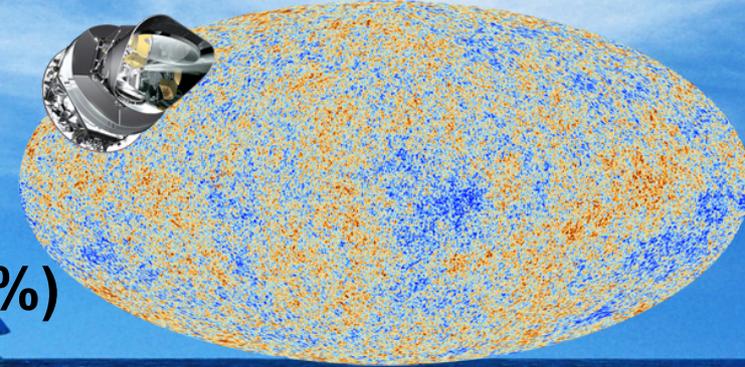
© Render by Jonathan Rey

Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

68% Énergie noire

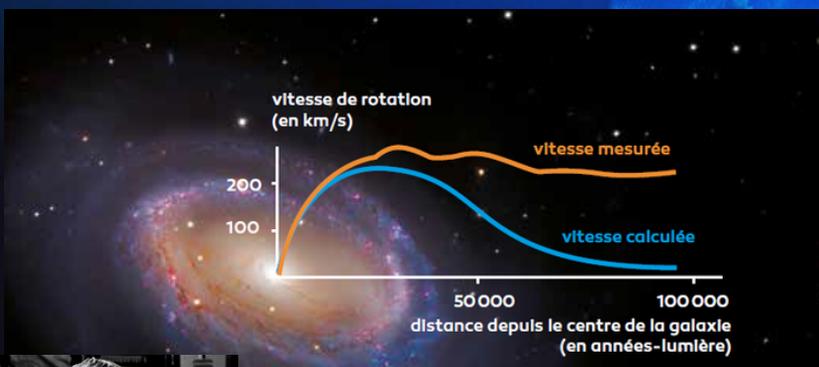




Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

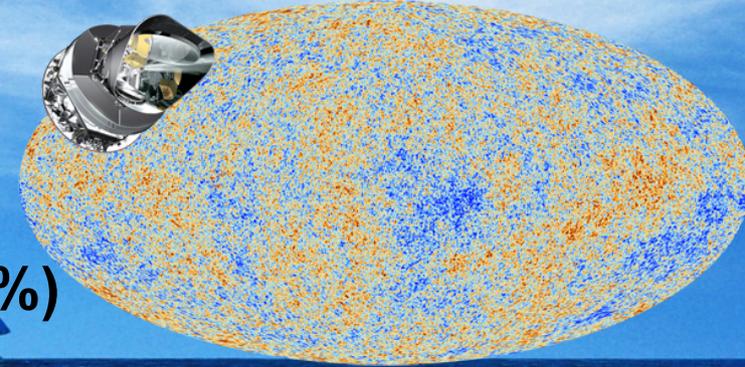
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



68% Énergie noire



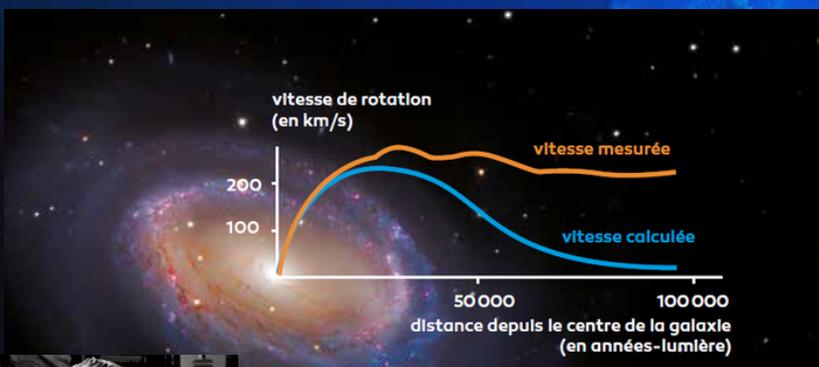
Vera Rubin



Ce que l'on connaît (5%)

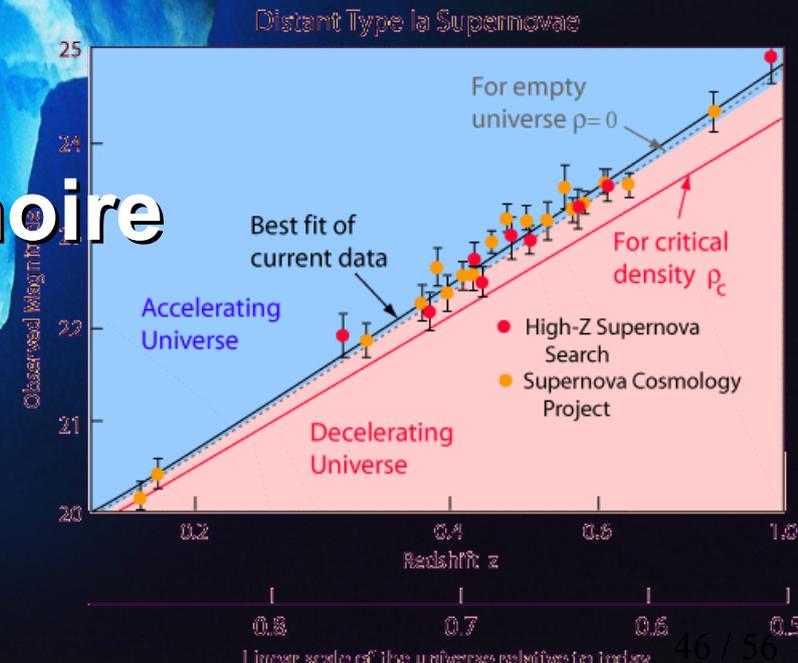
27% Matière noire

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



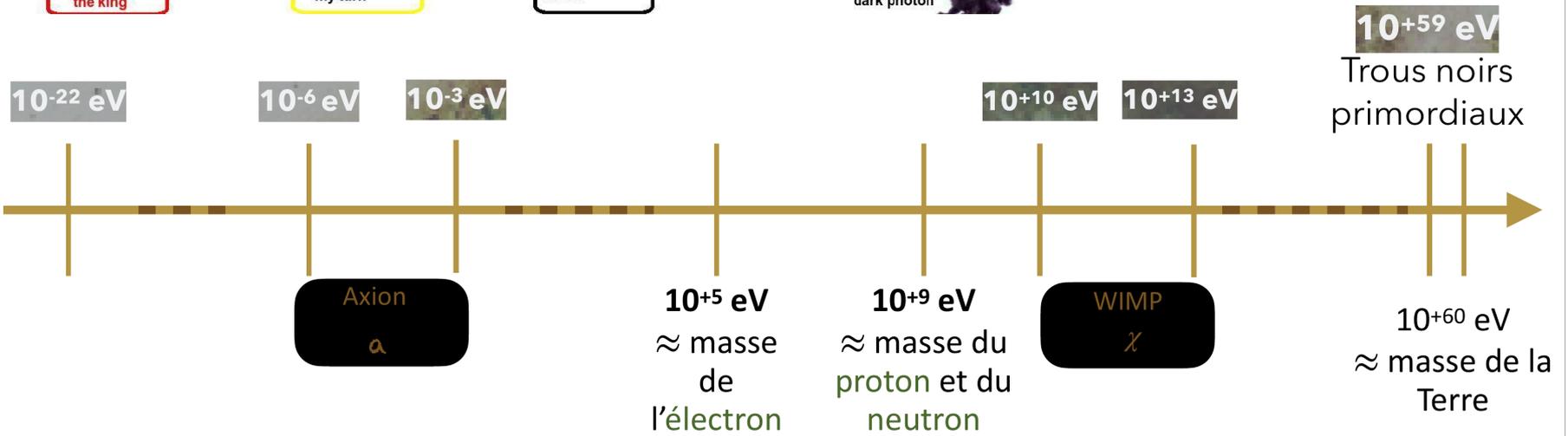
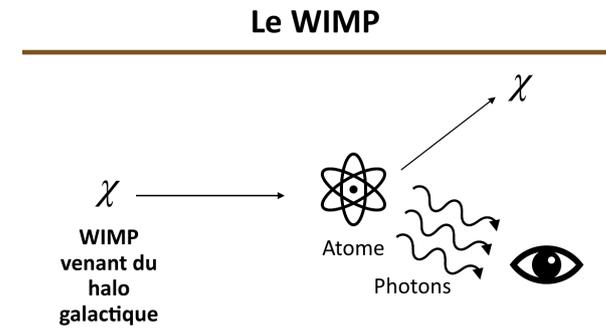
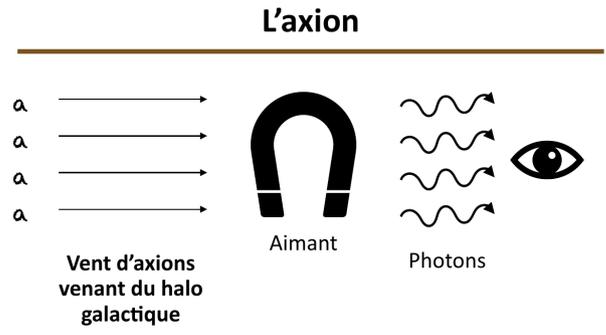
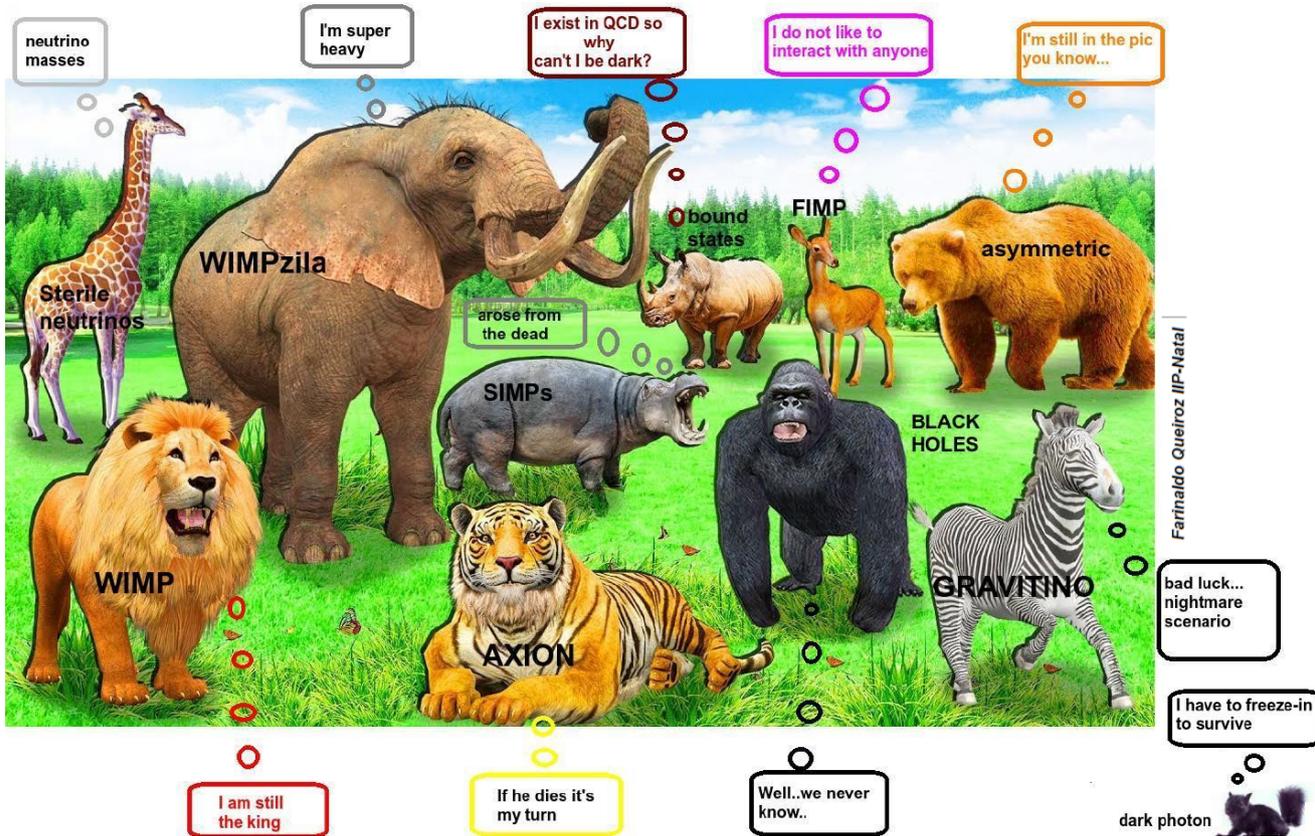
Vera Rubin

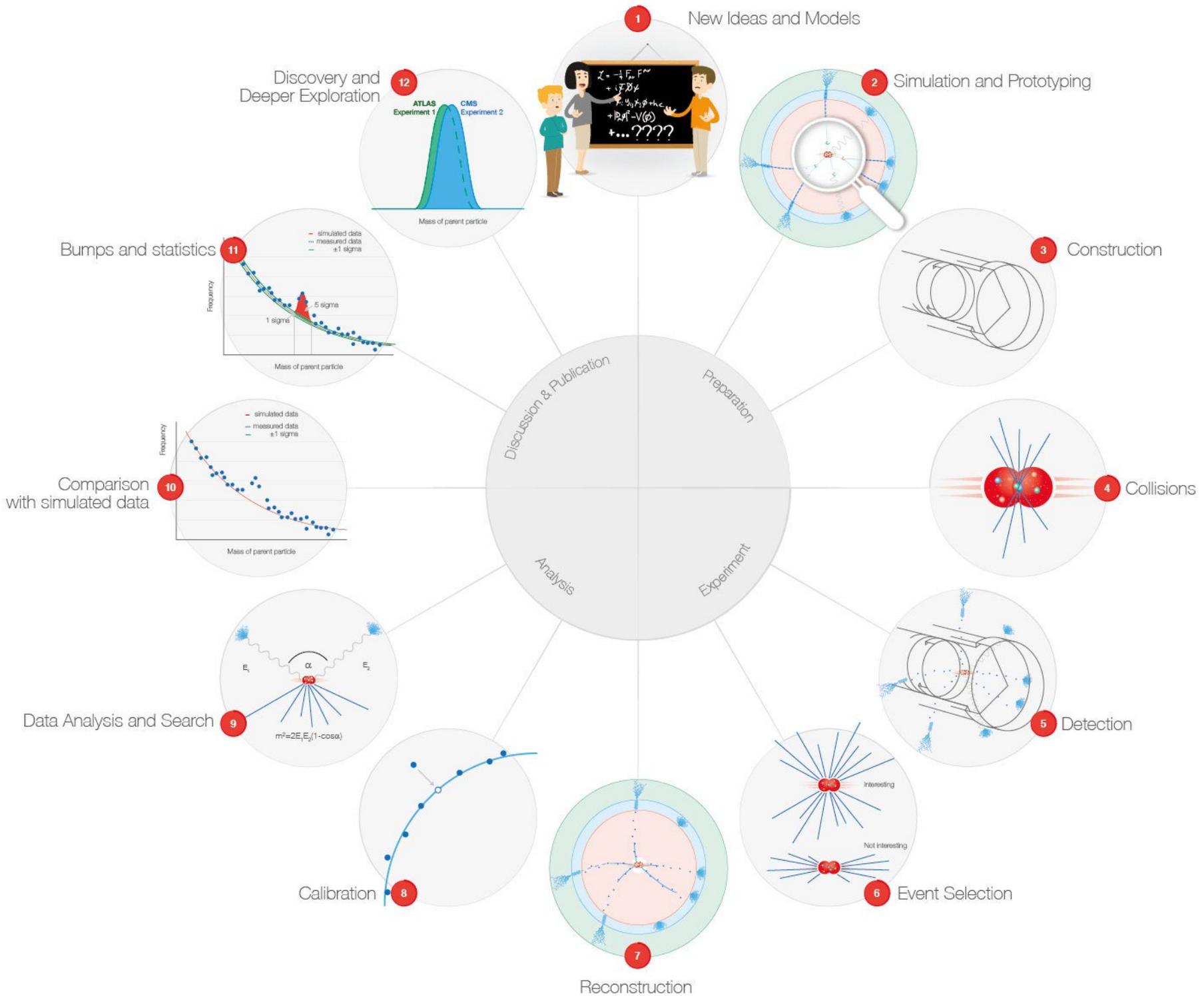
68% Énergie noire

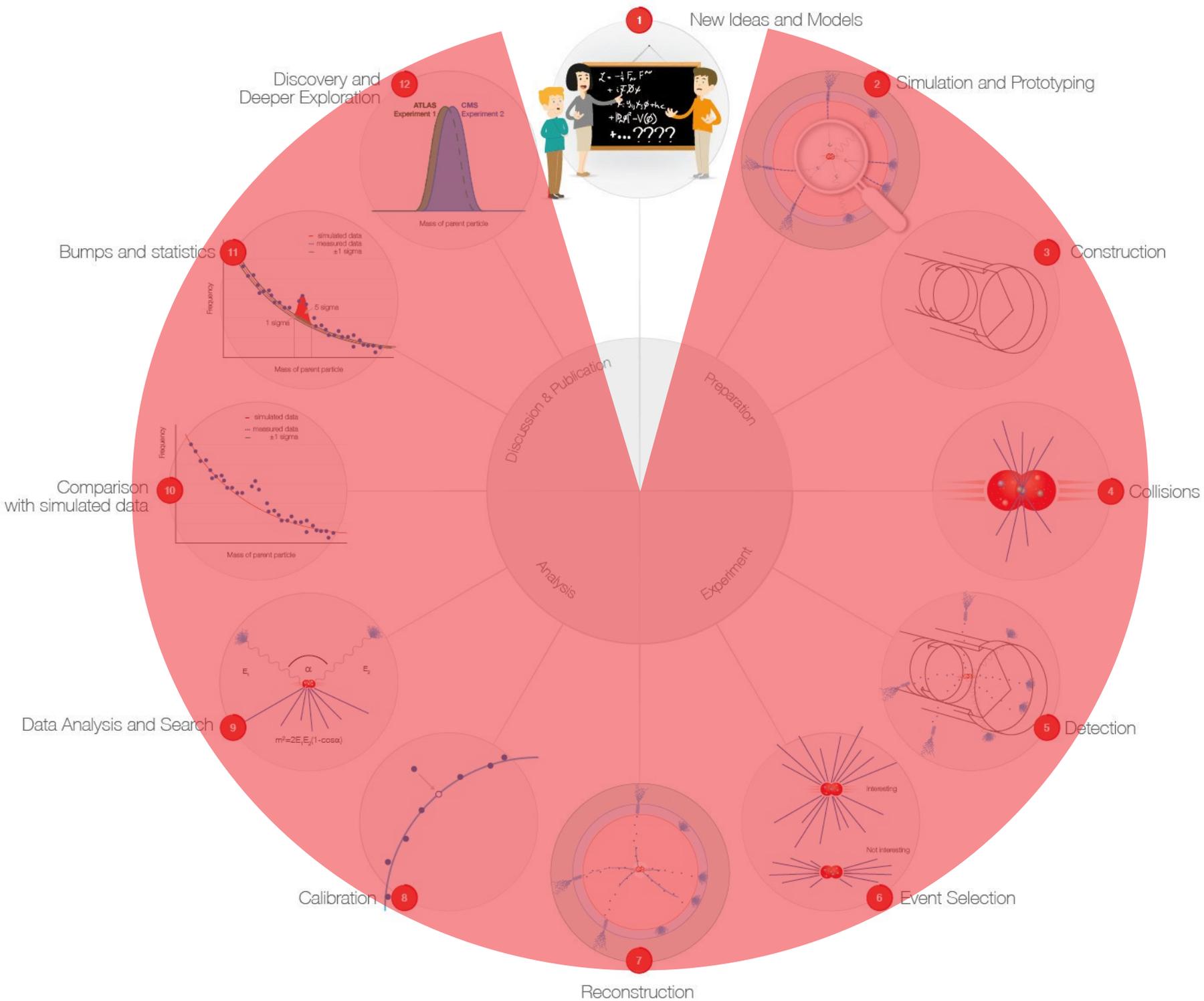


Pas la moindre idée de son origine !

Candidats matière noire

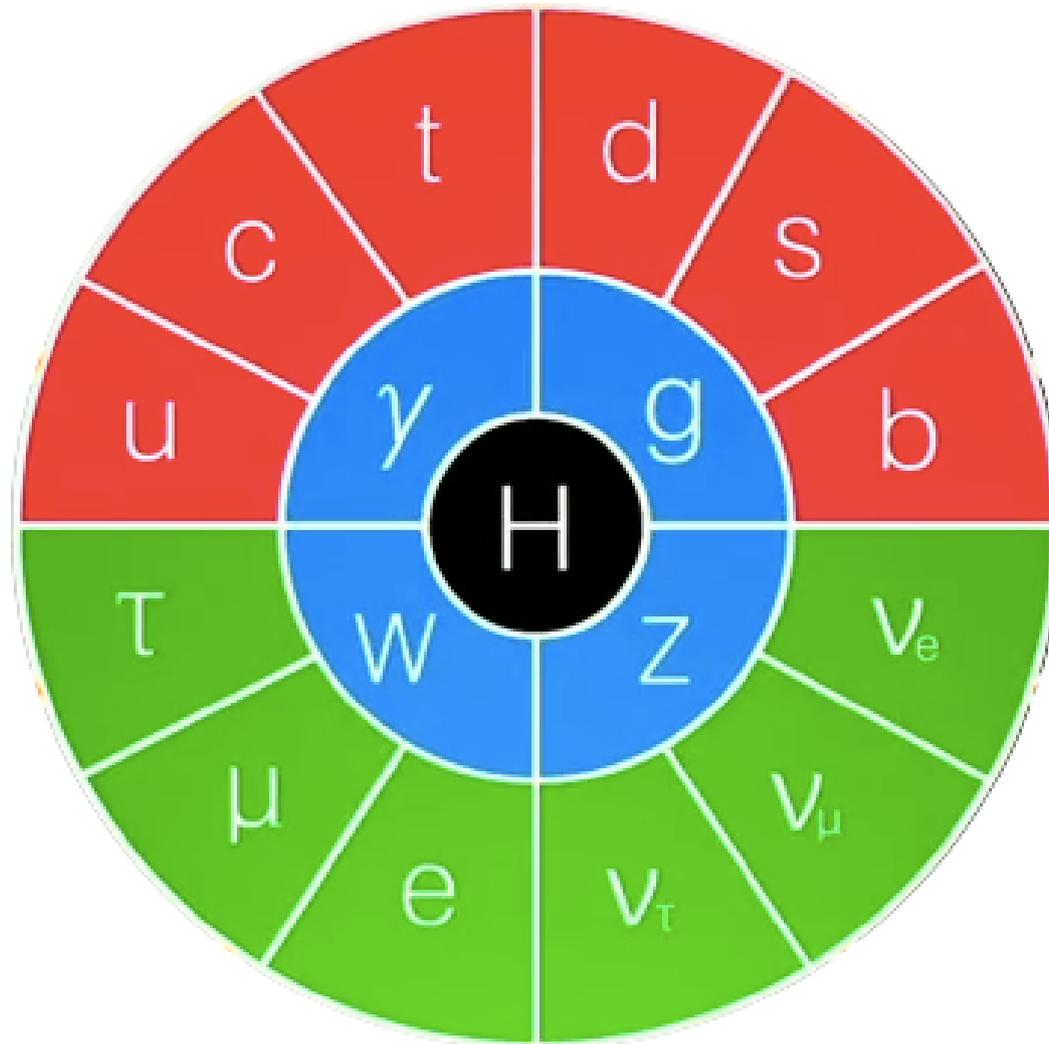


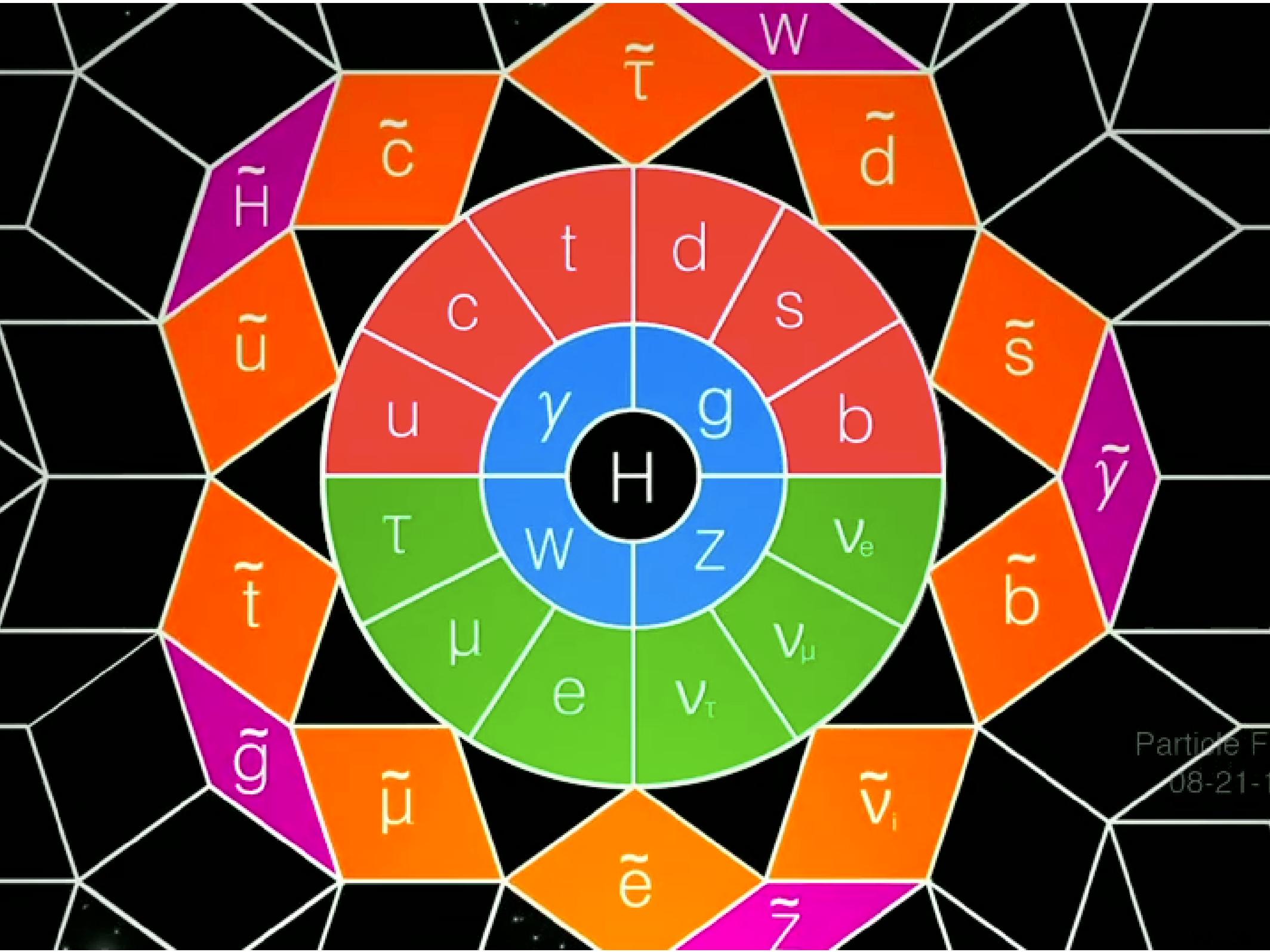




Autres théories

- 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

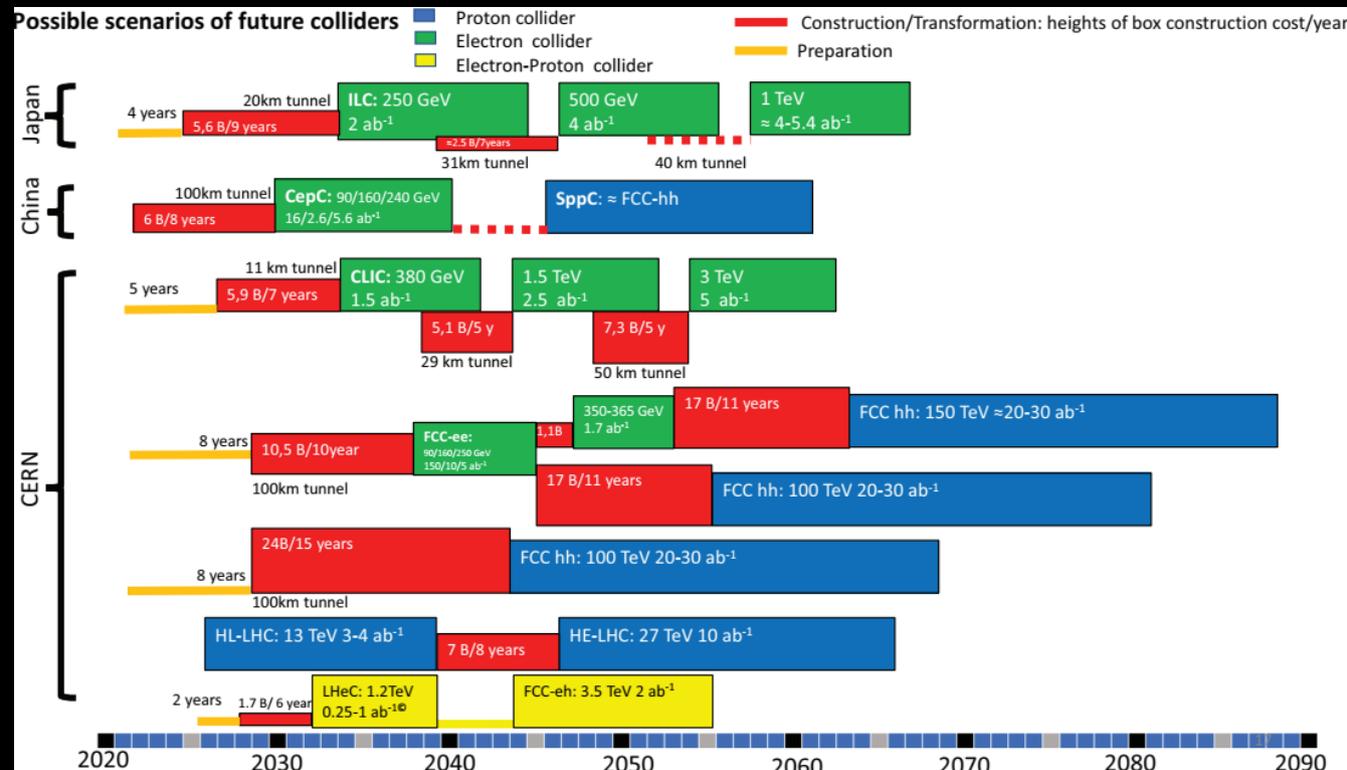
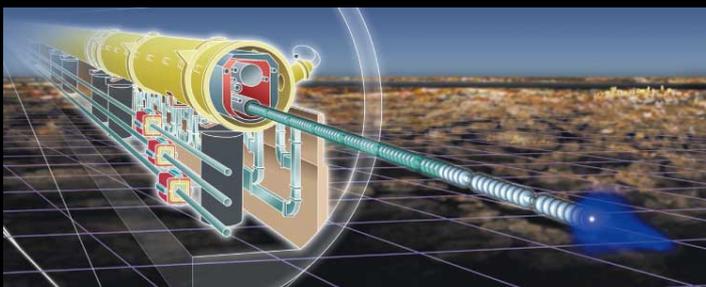








Et après ?



- **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})

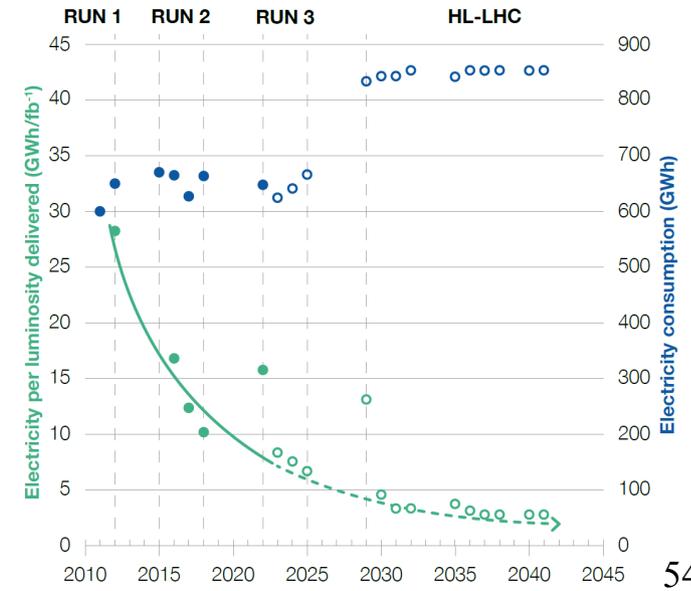
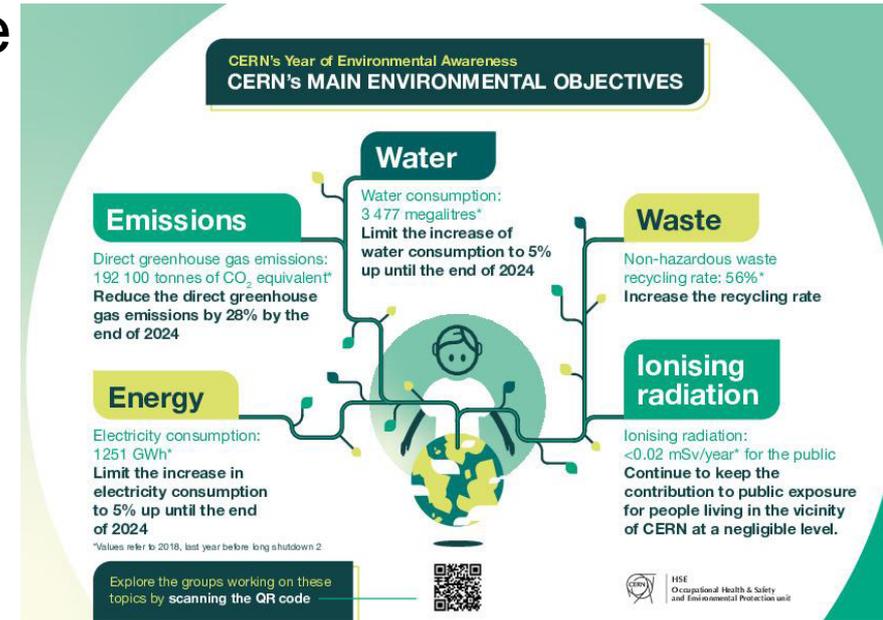
- **International Linear Collider (ILC), Japon, 31 km, 500 GeV (e⁺e⁻)**

- **Compact Linear Collider (CLIC)**

CERN, 11-50 km, 380-3000 GeV (e⁺e⁻)

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

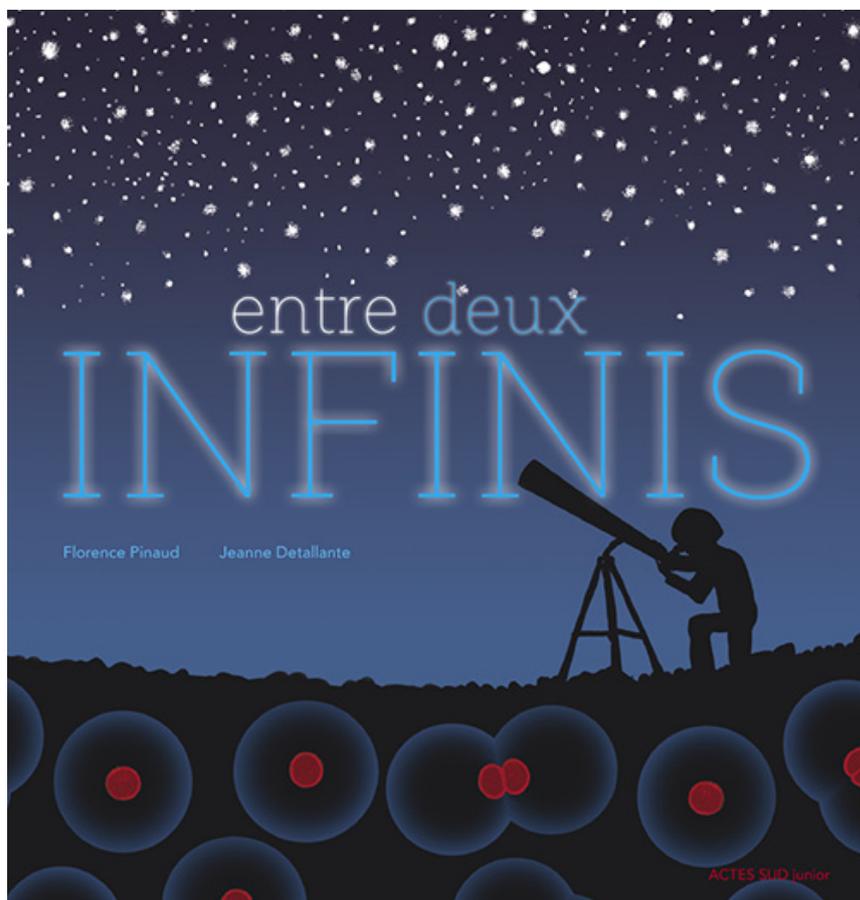
ATLAS@home		atlasathome.cern.ch
ATLAS grand public		atlas.cern
ATLAS en direct		atlas-live.cern.ch
ATLAS sur		x.com/ATLASexperiment
ATLAS sur		www.facebook.com/ATLASexperiment
ATLAS sur		www.instagram.com/atlasexperiment
ATLAS sur		www.youtube.com/theATLASExperiment
ATLAS sur		www.tiktok.com/@atlasexperiment
Site français du		www.lhc-france.fr
Le CPPM		www.cppm.in2p3.fr
Le CERN		 x.com/cppmluminy
Le CERN sur		www.facebook.com/cern
		www.linkedin.com/company/cern
Modèle standard		www.particuleselementaires.fr

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

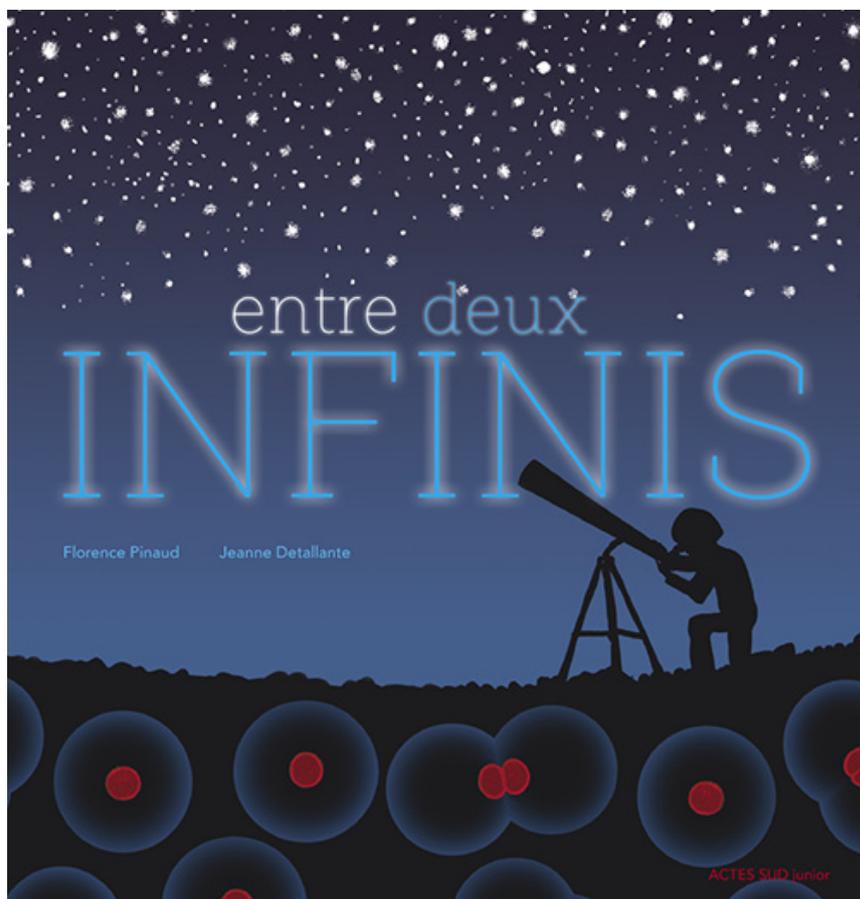
Hors collection

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.