

La physique des particules



Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

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



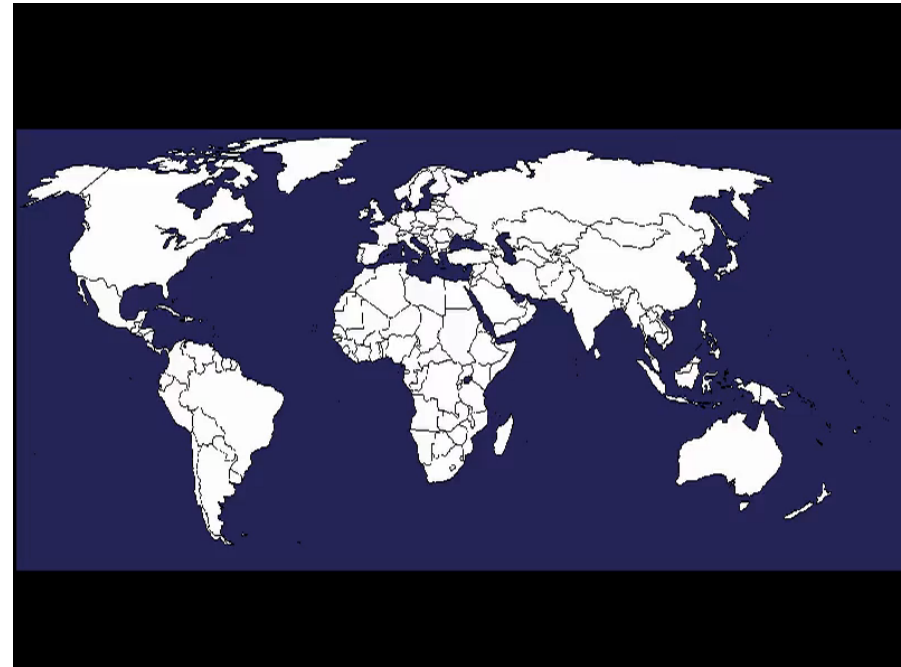
Institut
Physique de
l'Univers

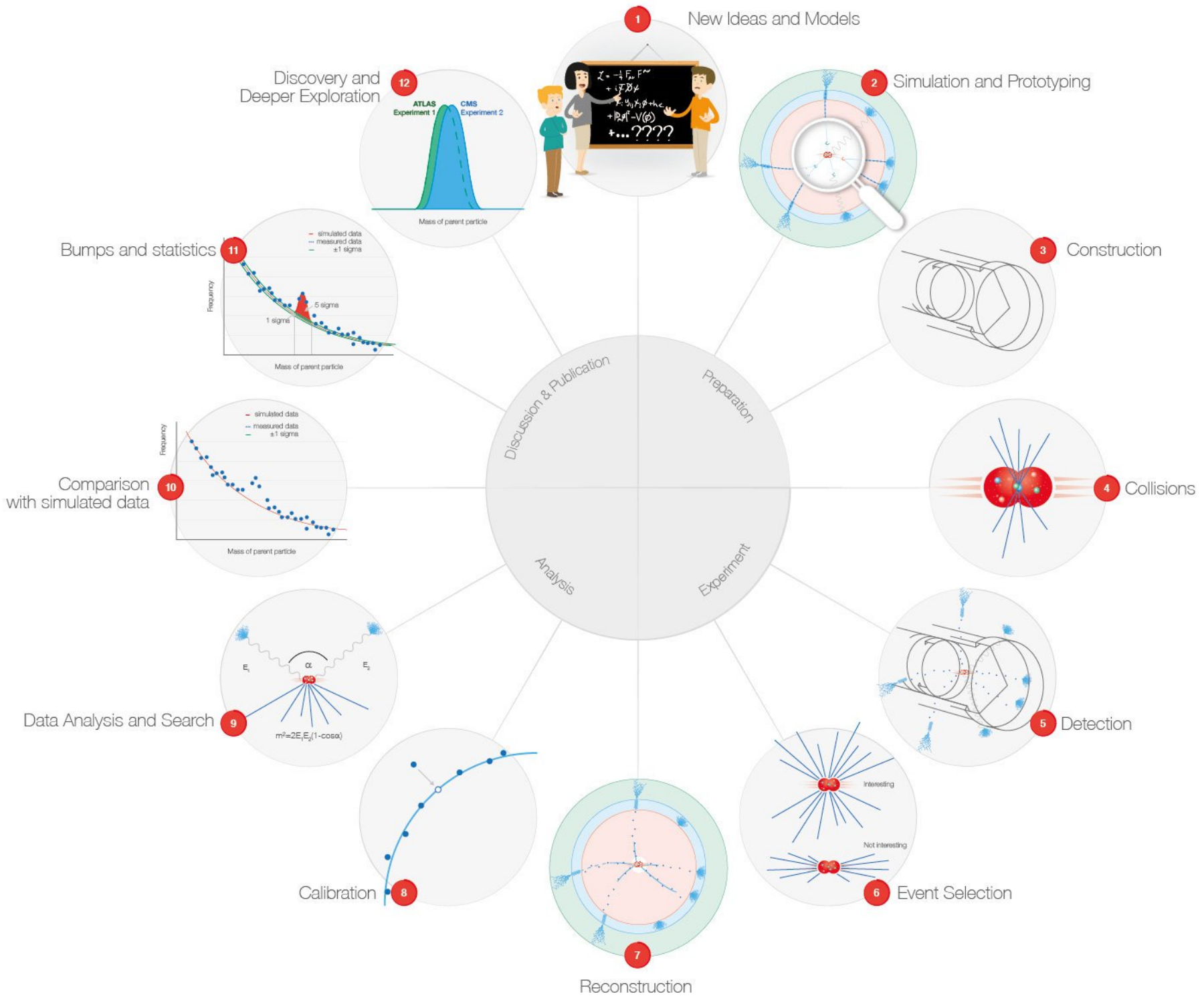
Aix-Marseille Université

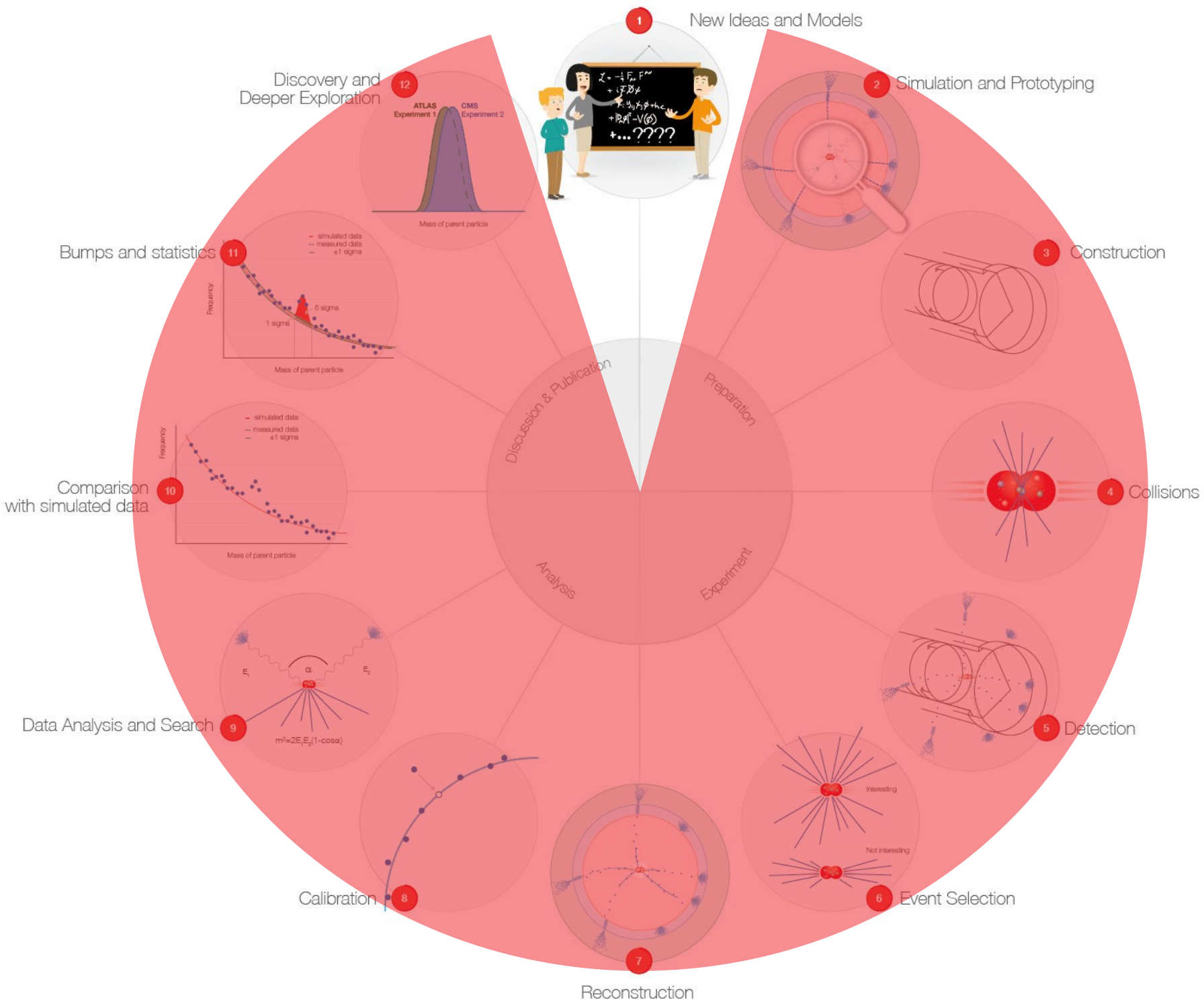


Yann Coadou

- Chercheur au CPPM (IN2P3/CNRS) depuis octobre 2009 sur l'expérience ATLAS et depuis 2023 également sur DarkSide
- Avant ça :
 - ▶ Classes préparatoires à Orléans
 - ▶ Double diplôme Ecole Centrale Paris et 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

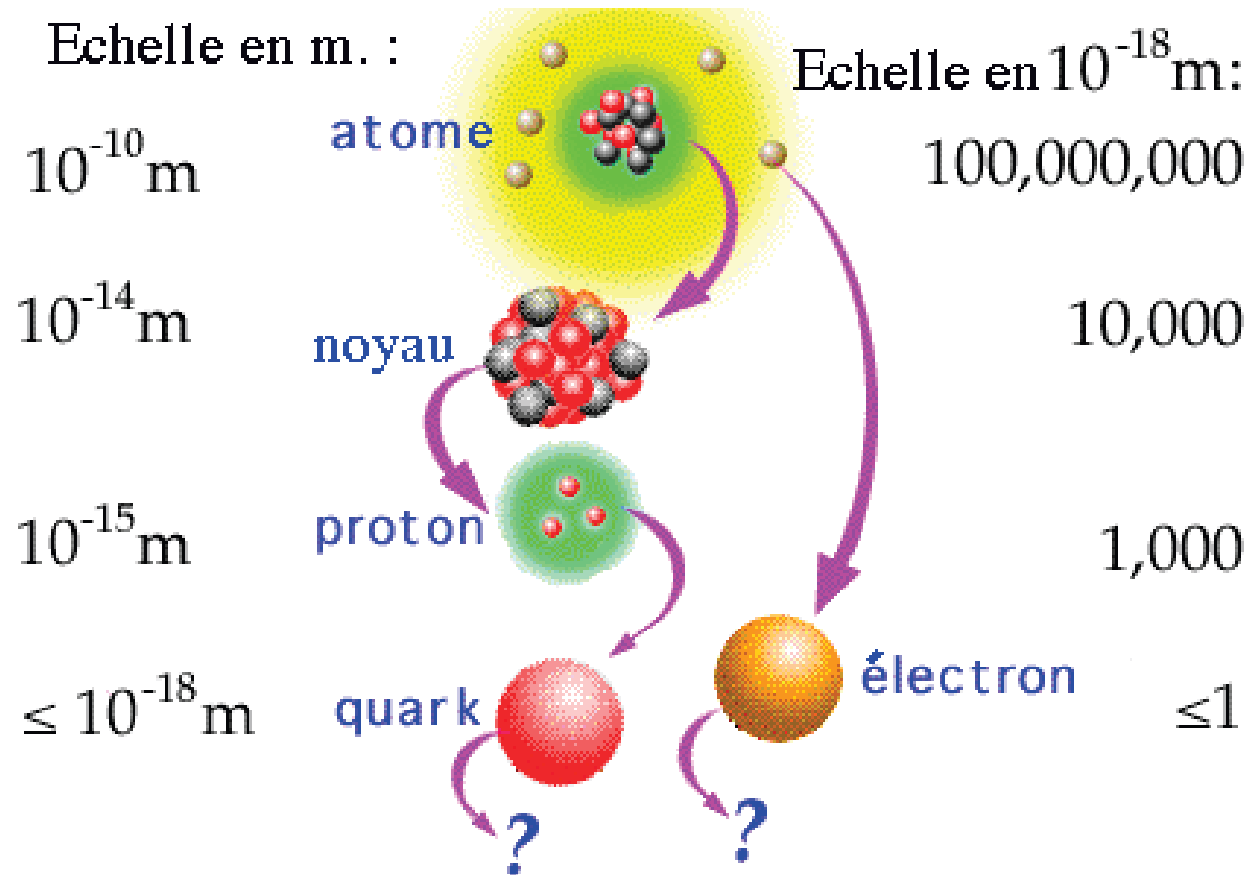






*De l'infiniment grand
à l'infiniment petit...*

Échelle des distances en physique des particules



Si protons et neutrons étaient à **10 cm** l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait **moins de 0,1 mm** et un atome environ **10 km**

Analogie solaire : soleil=noyau, neptune 30 fois plus éloignée qu'en vrai

La physique des particules

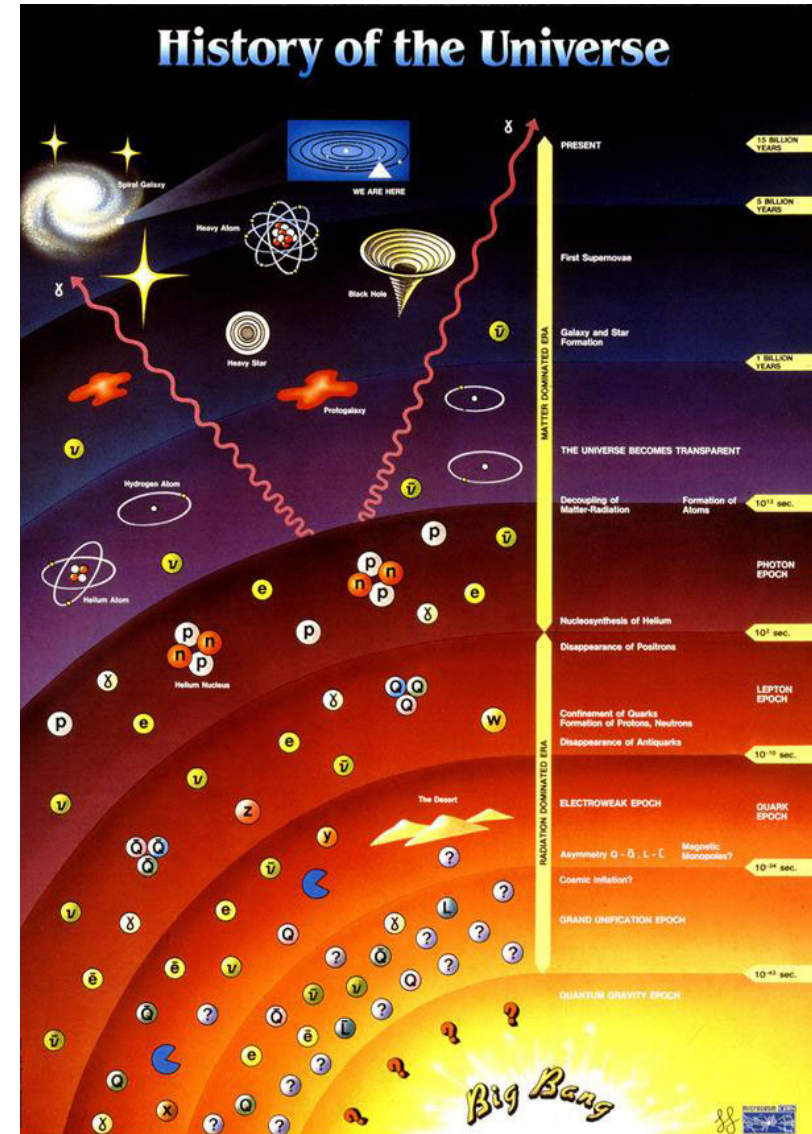
Étude des **constituants élémentaires** de la matière et de leurs **interactions**

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

Présentes dans l'univers primordial, dense et chaud

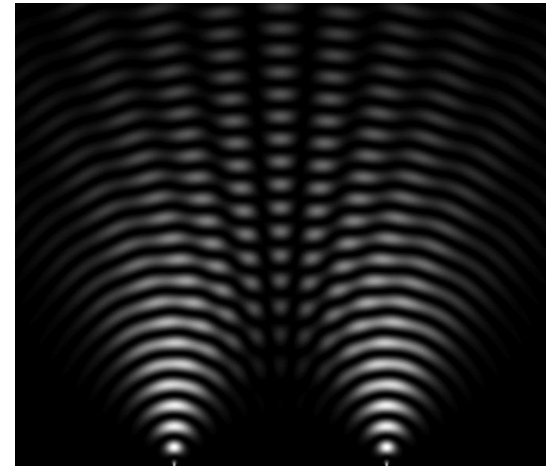
Dans l'univers « froid » d'aujourd'hui, la plupart de ces particules ont maintenant disparu

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



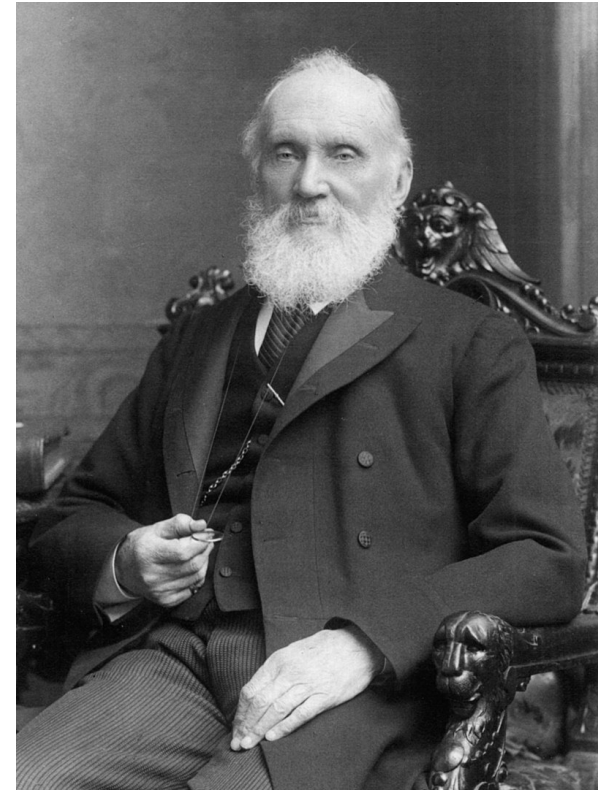
État des lieux à la fin du XIX^e siècle

- Mécanique newtonienne [Newton (1643-1727)]
 - ▶ principe d'inertie
 - ▶ loi de la dynamique
 - ▶ gravitation universelle
- Mécanique analytique [Lagrange (1736-1813)]
 - ▶ principe de moindre action
- Optique ondulatoire [Fresnel (1788-1827) – Young (1773-1829)]
 - ▶ nature ondulatoire de la lumière
- Électromagnétisme [Maxwell (1831-1879)]
 - ▶ unification électricité - magnétisme
- Existence des atomes : pas prouvée – en débat
- Lumière : onde électromagnétique se propageant dans un *éther*



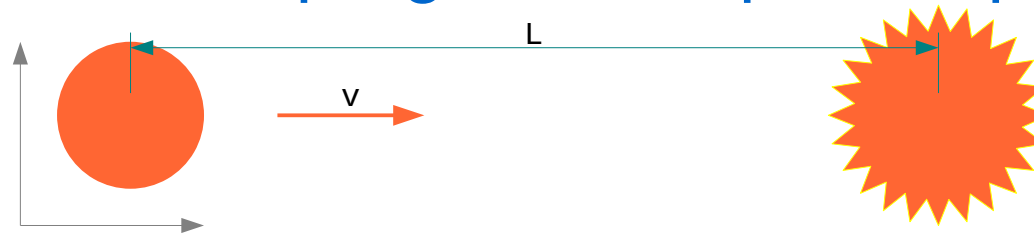
Révolutions conceptuelles

- D'après Lord Kelvin en 1900 (Royal Institution) :
 - ▶ «Nineteenth-Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light»
 - Mouvement de la matière dans l'Ether
 - Problèmes avec le théorème d'équirépartition de l'énergie
- Deux théories fondamentales voient le jour au début du XX^e siècle
 - ▶ La relativité restreinte
 - ▶ La mécanique quantique



Relativité restreinte : espace-temps

- Contraction des longueurs et dilatation du temps
 - ▶ L'écoulement du temps dépend du référentiel
 - ▶ Exemple : bombe programmée pour exploser après 1 s



1)	$v =$	300 km/s	(0,1 % c)	\rightarrow	$L =$	300 km	($t = 1s$)
2)	$v =$	29 979 km/s	(10 % c)	\rightarrow	$L =$	30 130 km	($t = 1s$)
3)	$v =$	269 813 km/s	(90 % c)	\rightarrow	$L =$	618 994 km	($t = 2s$)
4)	$v =$	296 794 km/s	(99 % c)	\rightarrow	$L =$	2 103 921 km	($t = 7s$)
5)	$v =$	299 493 km/s	(99,9 % c)	\rightarrow	$L =$	6 698 534 km	($t = 22s$)

A prendre en compte quand les vitesses considérées s'approchent de la vitesse limite (c , la vitesse de la lumière dans le vide)

Relativité restreinte : masse et énergie

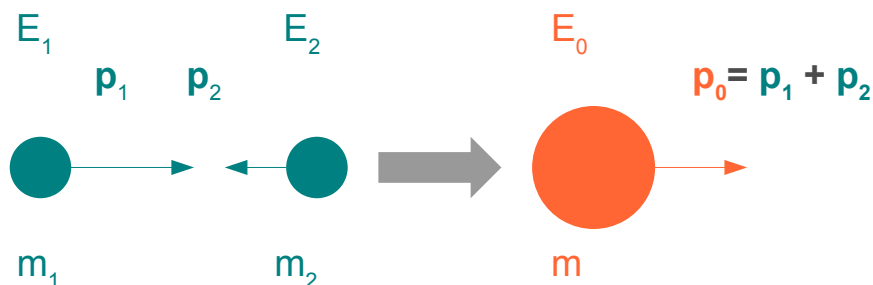
- Équivalence masse-énergie

- ▶ La masse est une forme d'énergie

- Si un corps perd une quantité d'énergie E , sa masse diminue de $\Delta m = E/c^2$
- $E_0 = m c^2$: énergie au repos (dans le référentiel où le corps est immobile)

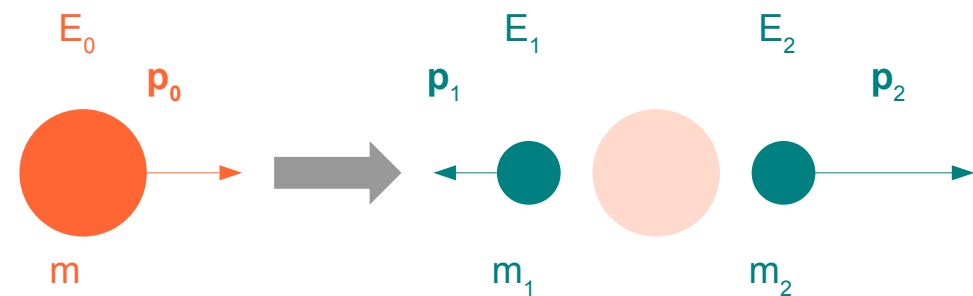
- ▶ Énergie totale d'un système : $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ (p : quantité de mouvement)

- ▶ Transformation de l'énergie cinétique en masse



Collision

- ▶ Transformation de la masse en énergie cinétique



Désintégration

Mécanique quantique : dualité onde-corpuscule

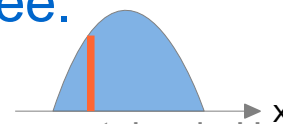
- Aux échelles microscopiques, les objets ont une nature à la fois *corpusculaire* et *ondulatoire*

$$E = h\nu \quad p = h/\lambda$$

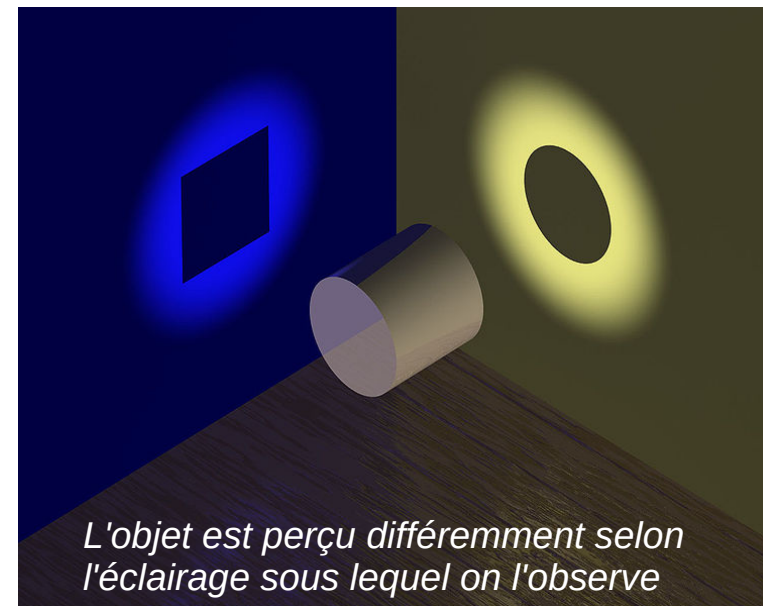
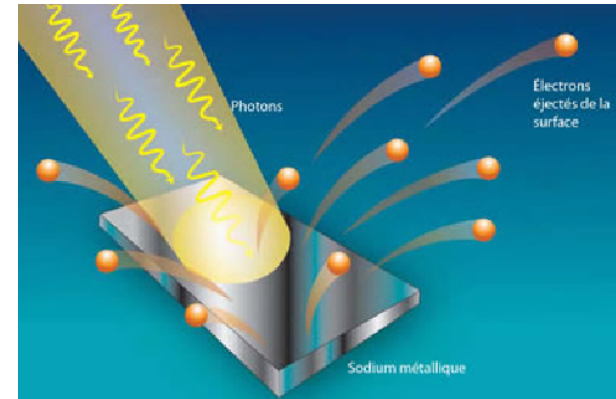
constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s

- ▶ pas d'équivalent dans le monde macroscopique → non intuitif !
- Deux descriptions antagonistes !
 - **corpuscule** : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
 - **onde** : objet étendu pouvant interférer
- ▶ **objet quantique** : caractéristiques corpusculaires suivent les lois de probabilité dictées par les caractéristiques de l'onde associée.

ex : la position d'une particule

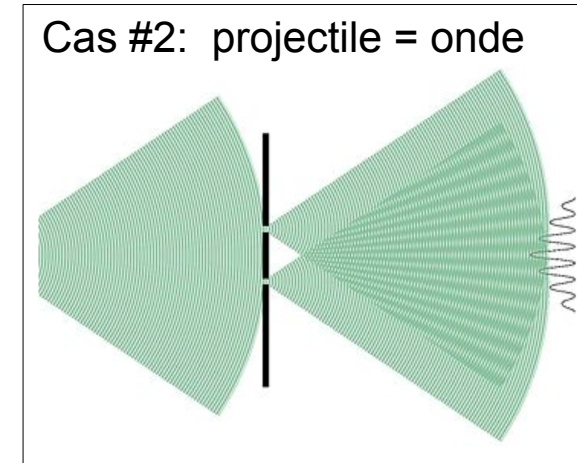
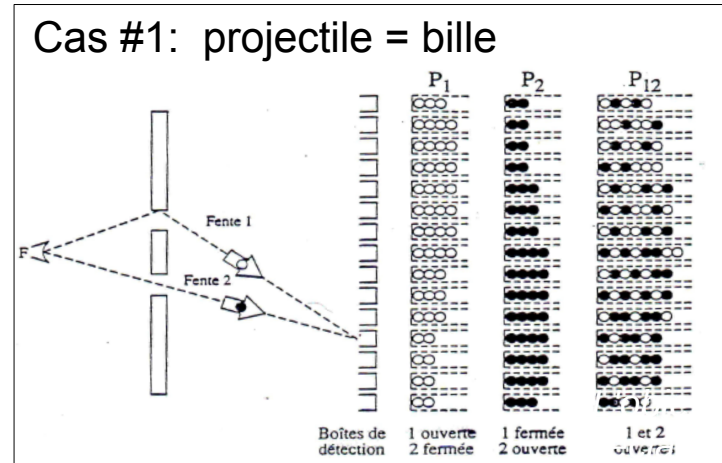
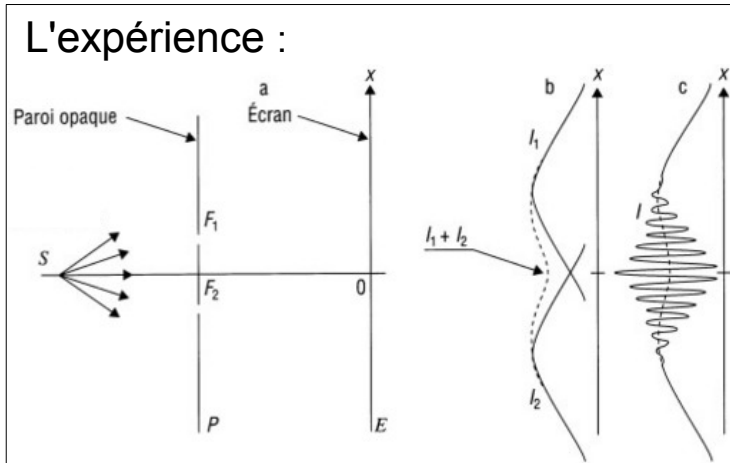


Effet photo-électrique, Einstein, 1905



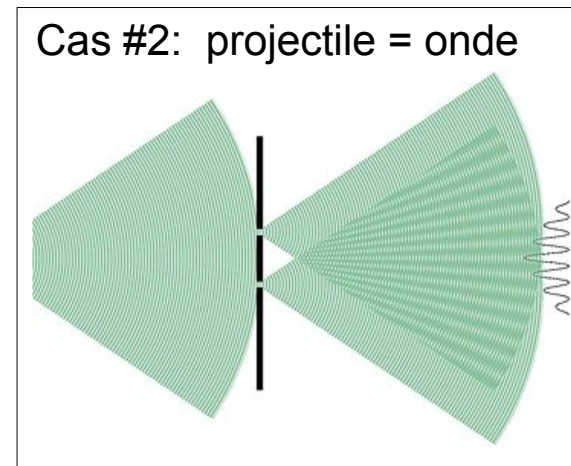
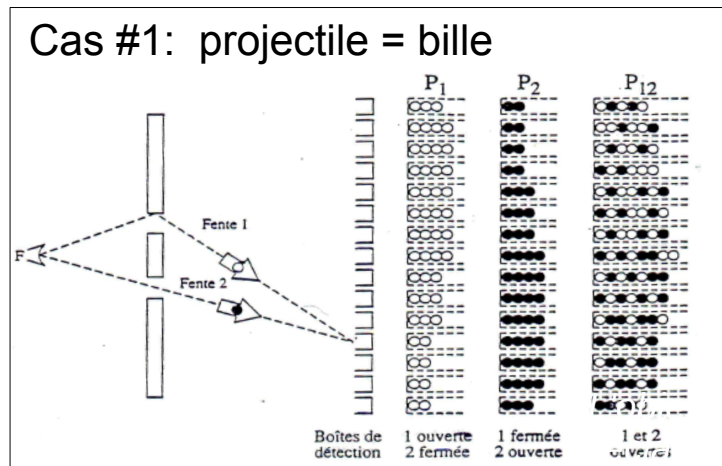
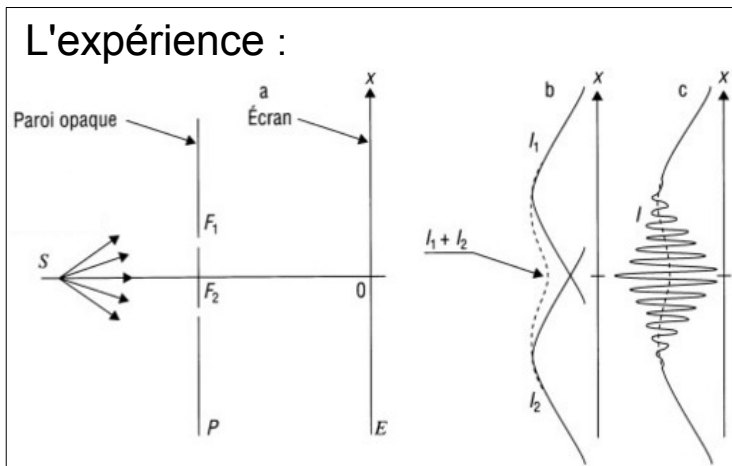
Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young



Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young

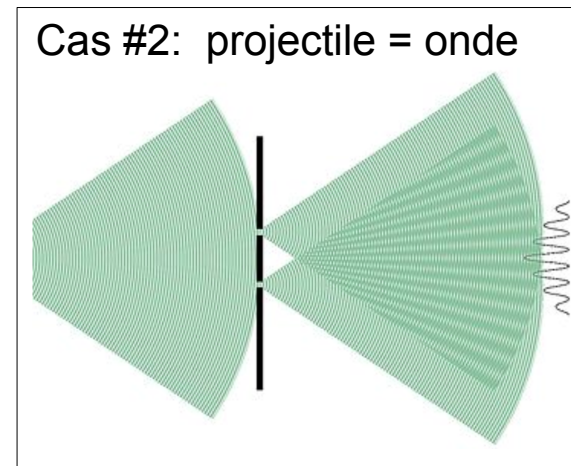
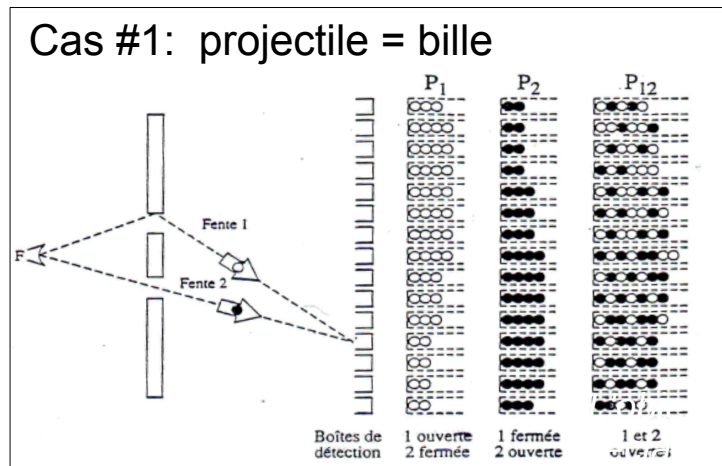
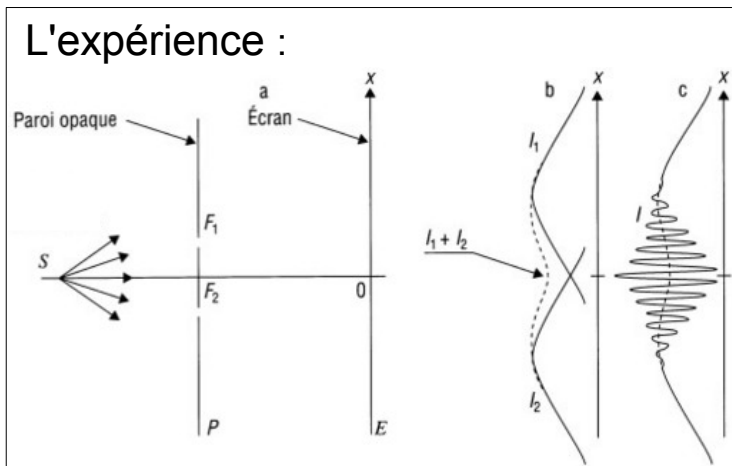


Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)

© New Journal of Physics, Volume 15, March 2013

Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young



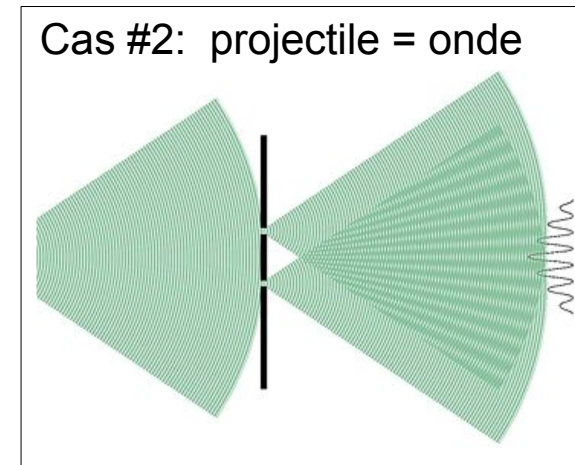
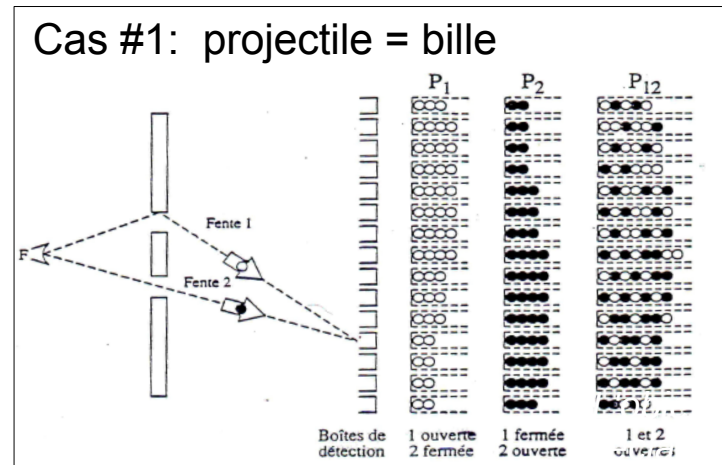
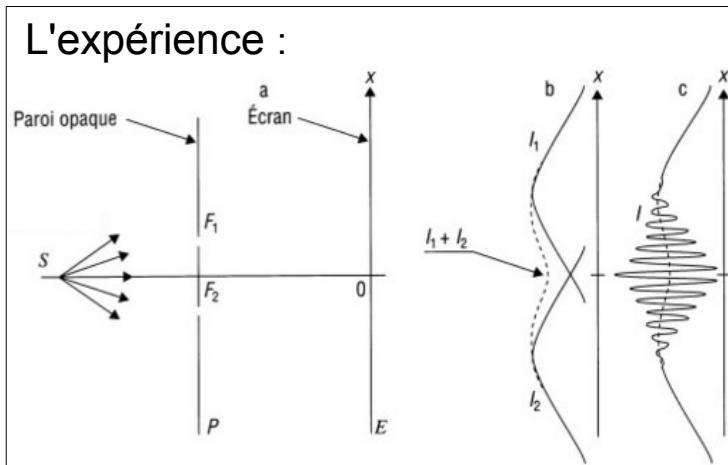
Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)

- On peut observer les impacts individuels...

© New Journal of Physics, Volume 15, March 2013

Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young



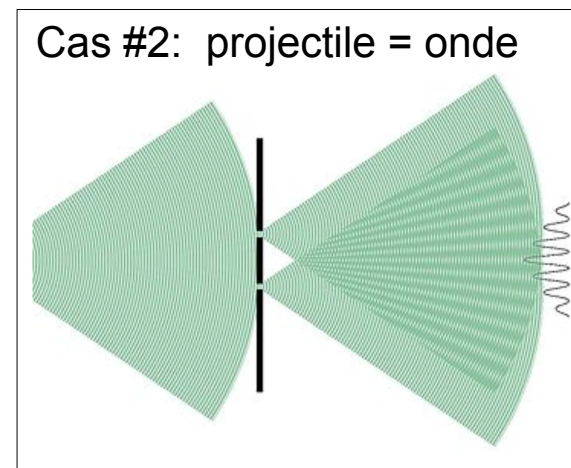
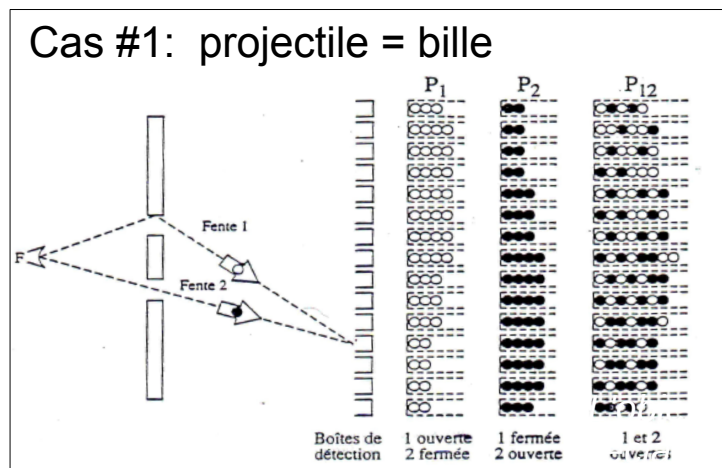
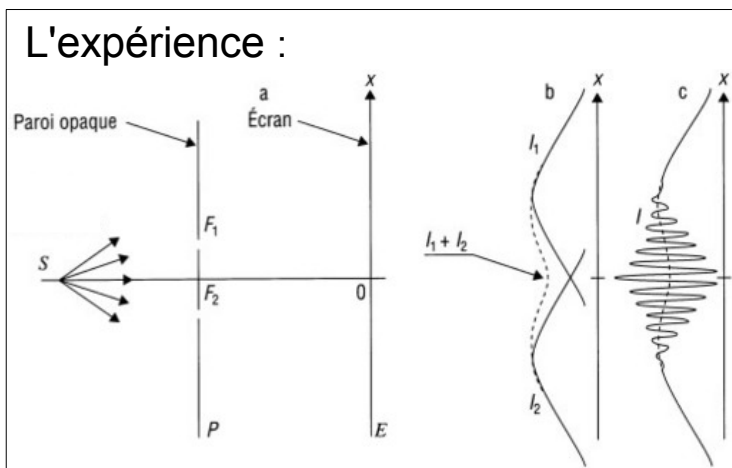
Cas #3: projectile = objet quantique (électron, photon)

- On peut observer les impacts individuels...
- et les franges d'interférences !

© New Journal of Physics, Volume 15, March 2013

Mécanique quantique : illustration

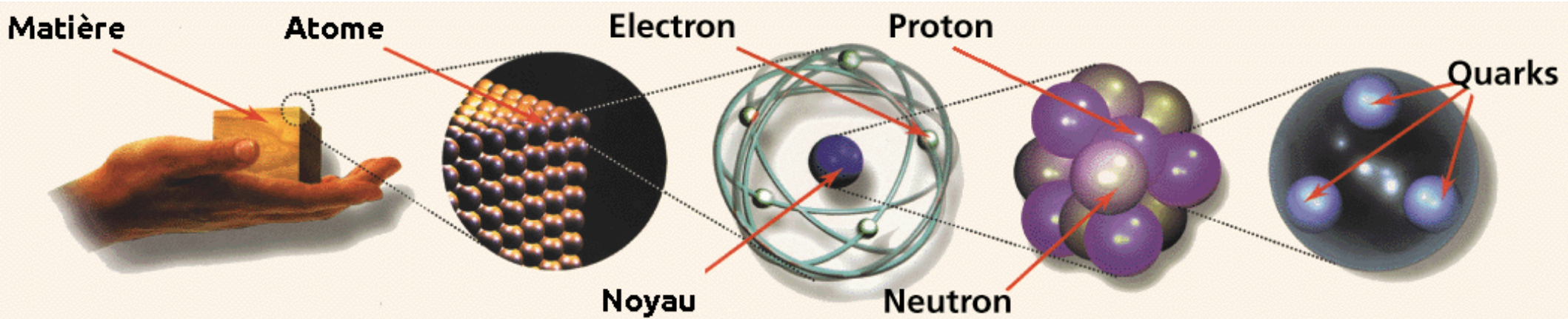
L'expérience des fentes d'Young



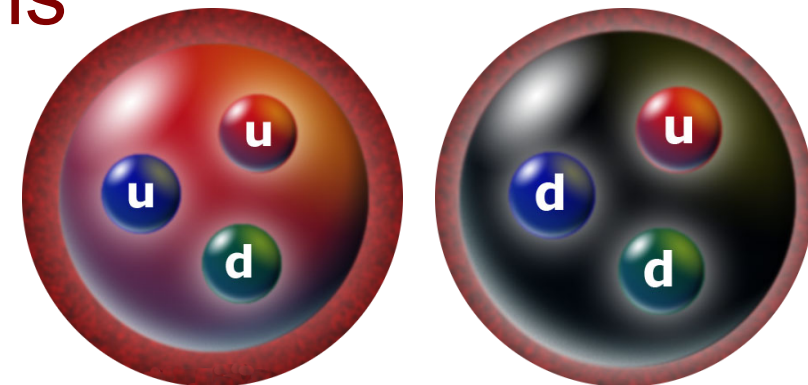
—2660 nm

- Si on détecte par quelle fente la particule passe, l'interférence disparaît !

De quoi est fait l'Univers visible ?



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



Le positron

- Équation du mouvement d'un électron

[1928, Dirac]

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

- Observation :

[1932, Anderson]

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

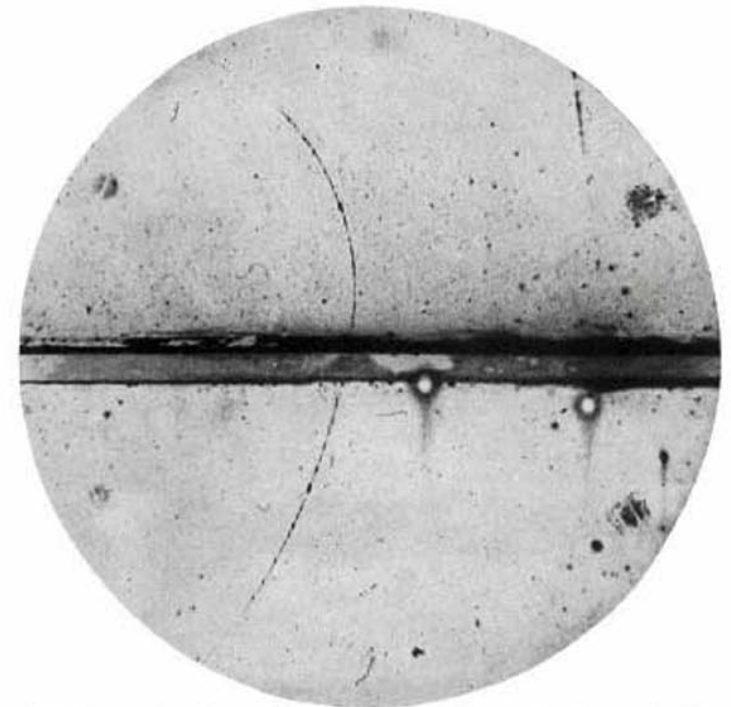
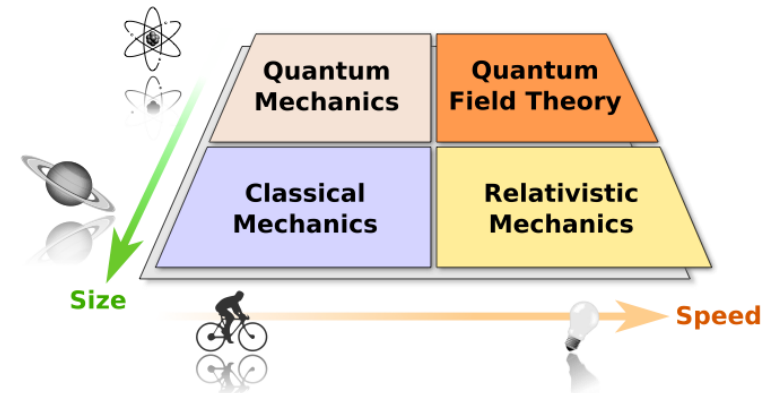
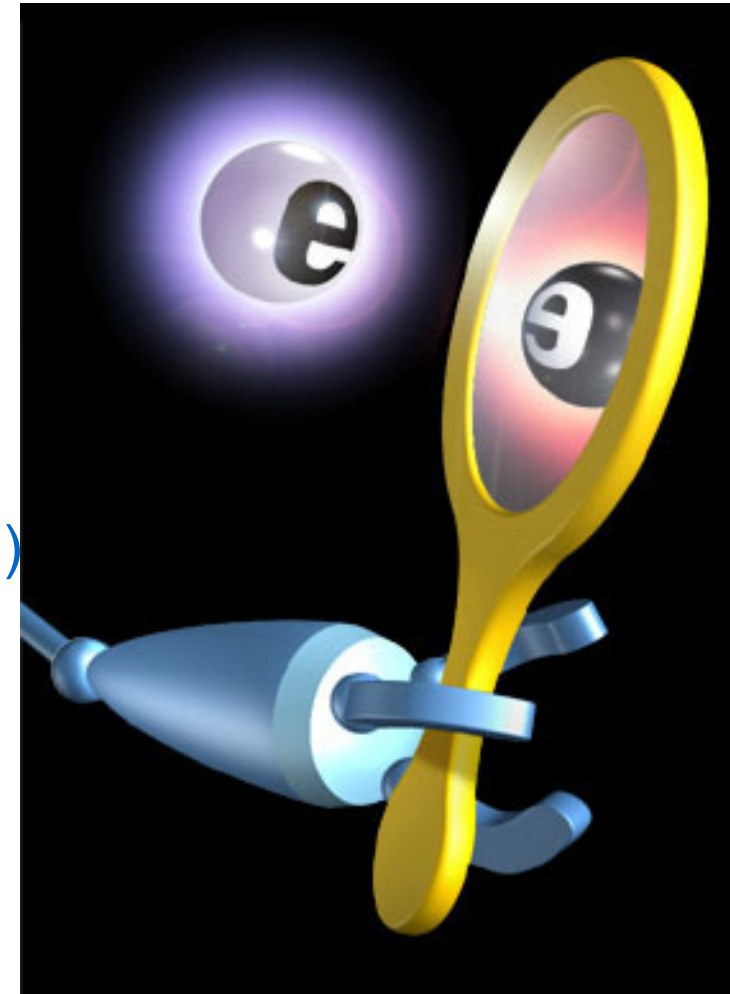


Fig. 1. A 65 million volt positron ($H_p = 2.1 \times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H_p = 1.5 \times 10^6$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

L'anti-matière

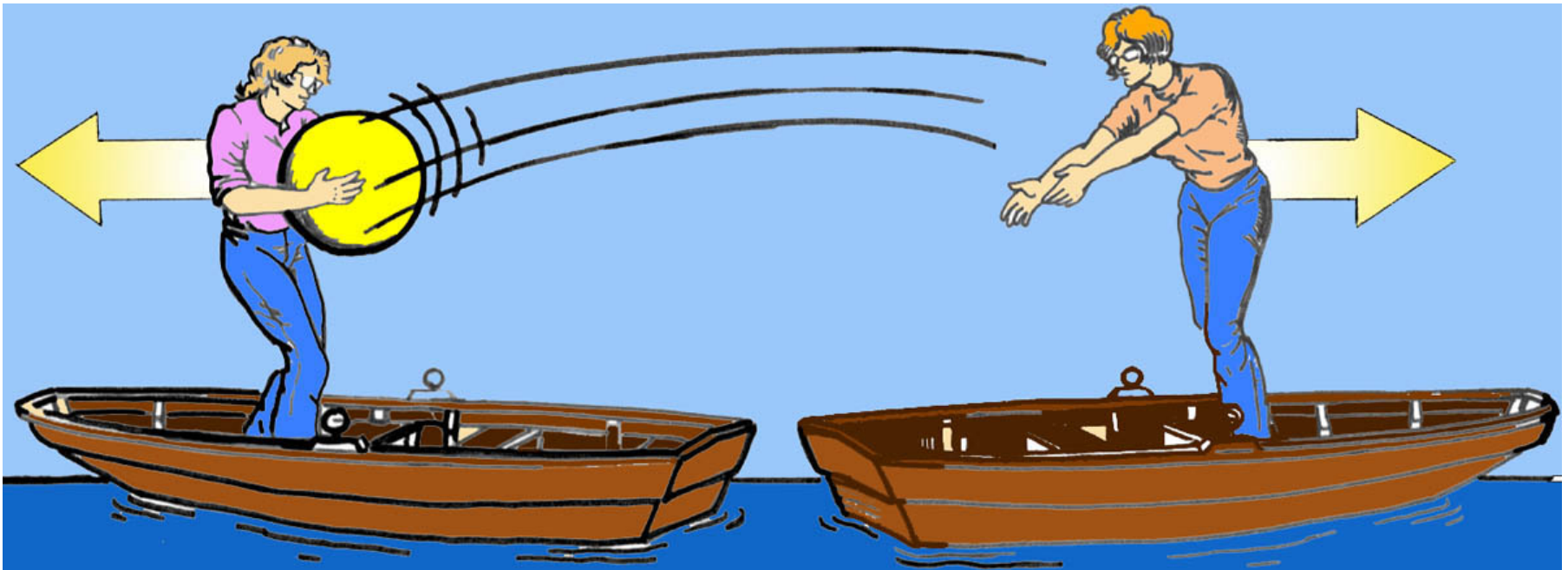
- La découverte de l'anti-électron marque la naissance de l'anti-matière
 - ▶ positron = anti-électron
- Généralisation : à chaque particule correspond une anti-particule :
 - ▶ de même masse
 - ▶ de même *spin* (moment angulaire interne)
 - ▶ de charge(s) opposée(s)
- L'anti-matière se comporte comme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



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

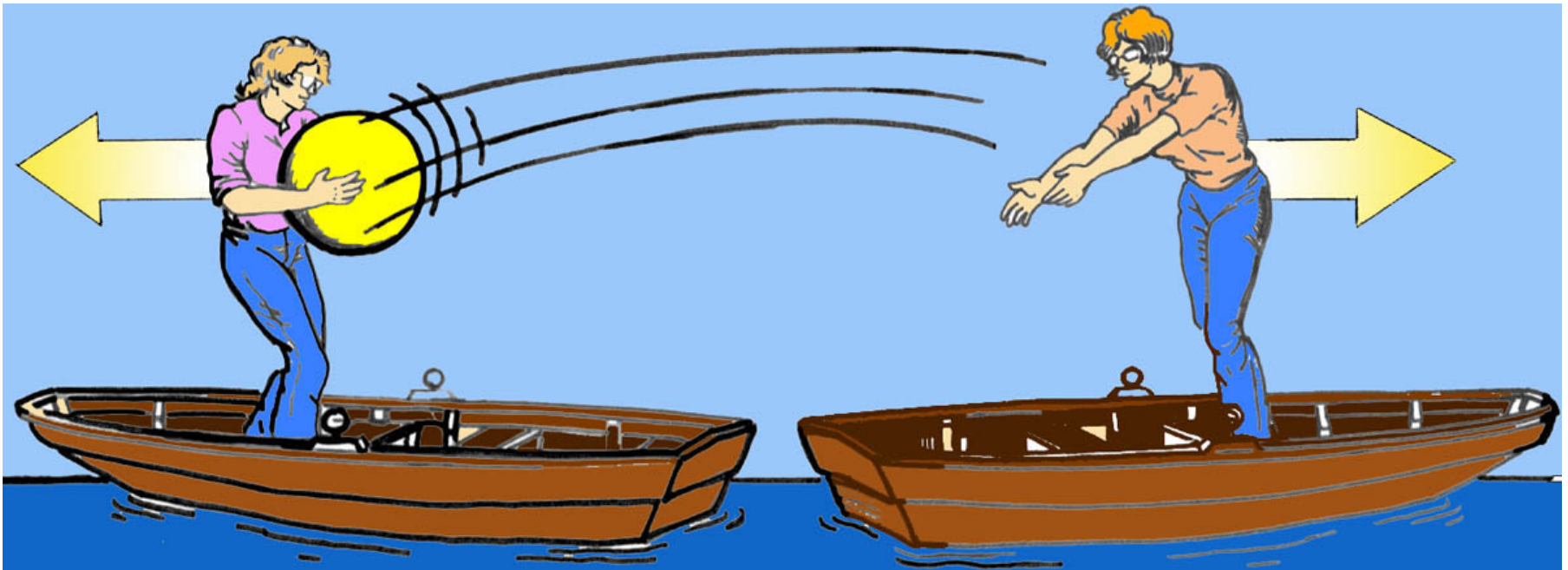
Interaction fondamentale

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

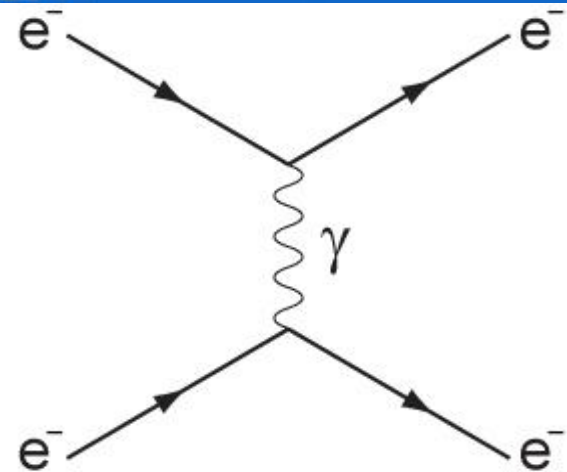


Interaction fondamentale

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

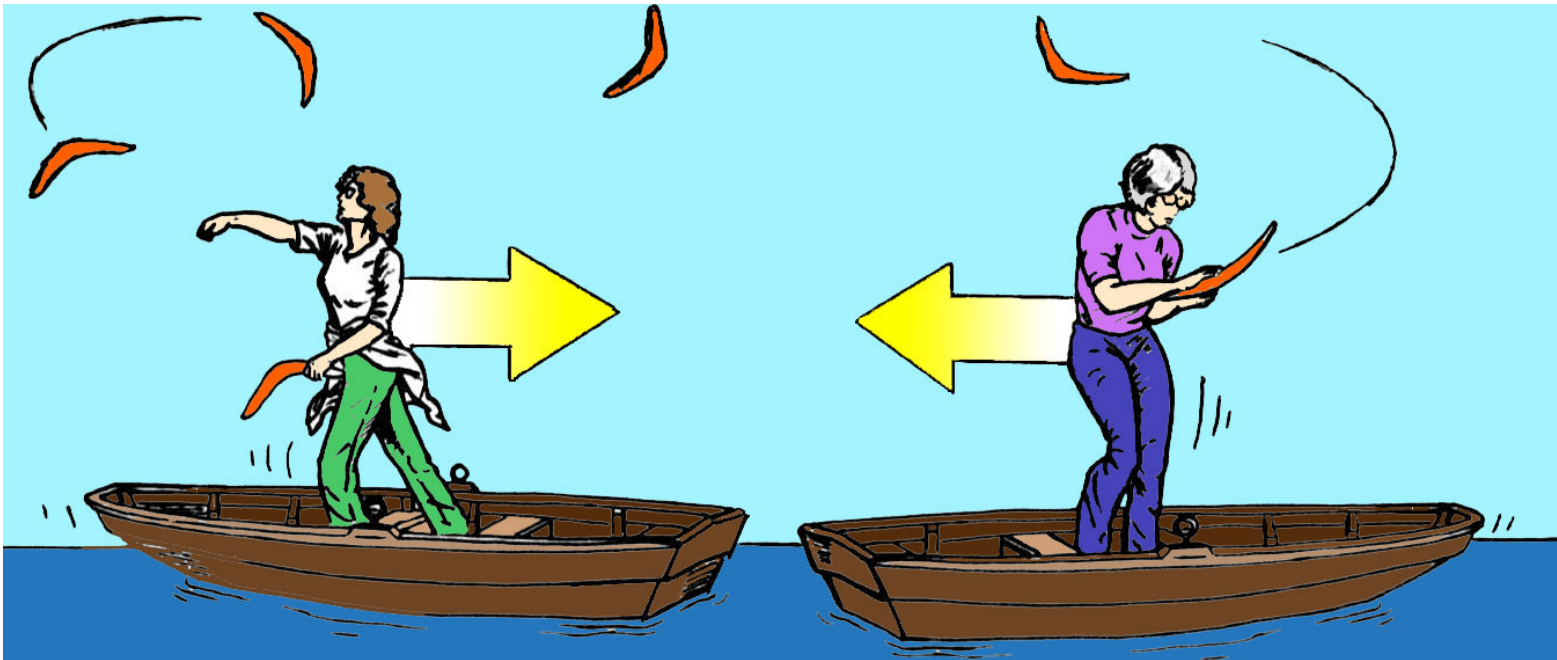


En physique des particules :

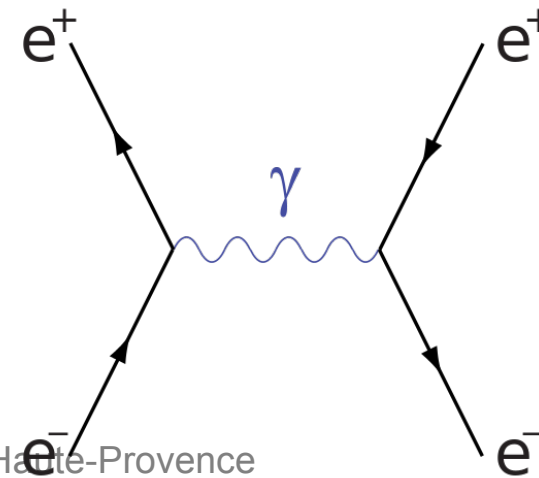


Interaction fondamentale

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



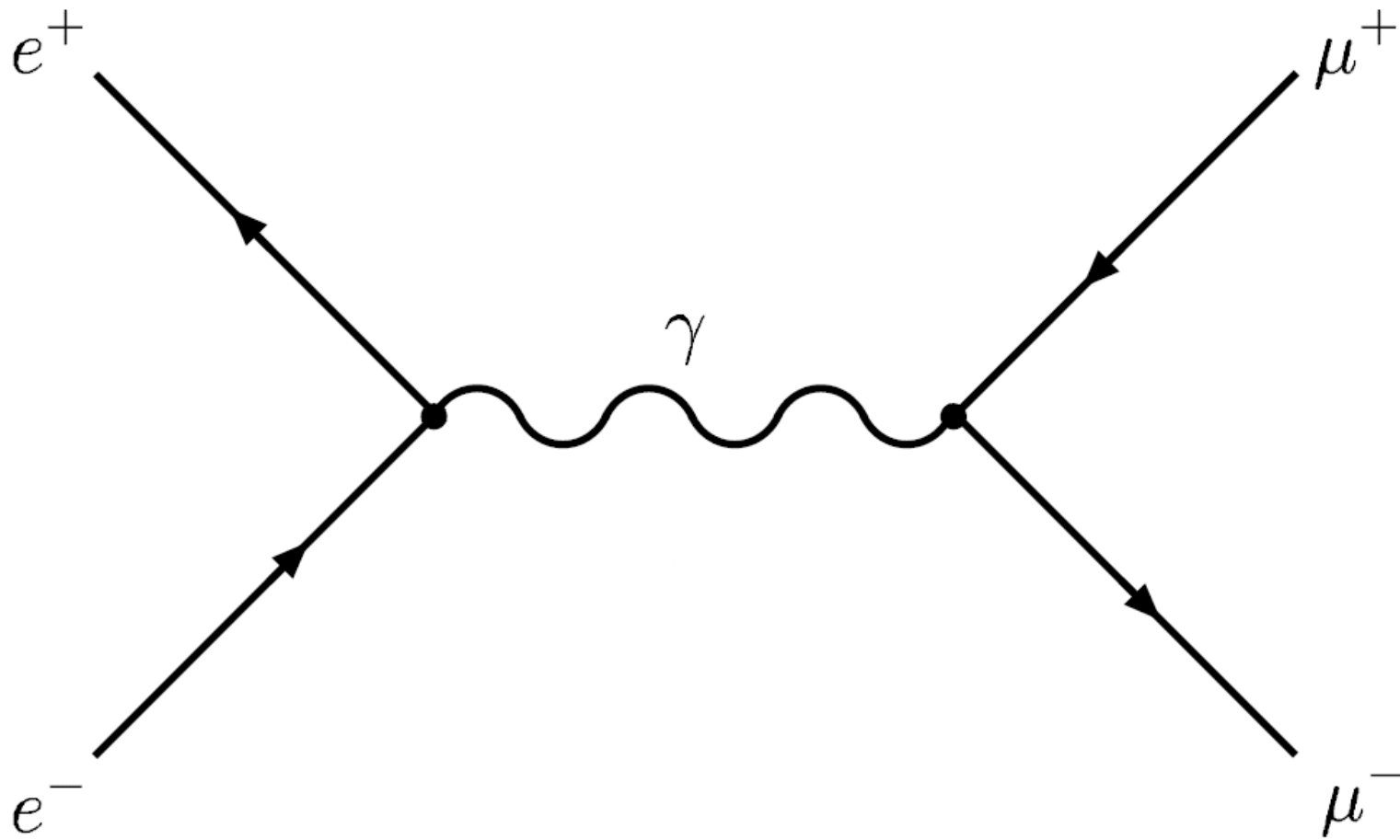
En physique des particules :



Diagrammes de Feynman

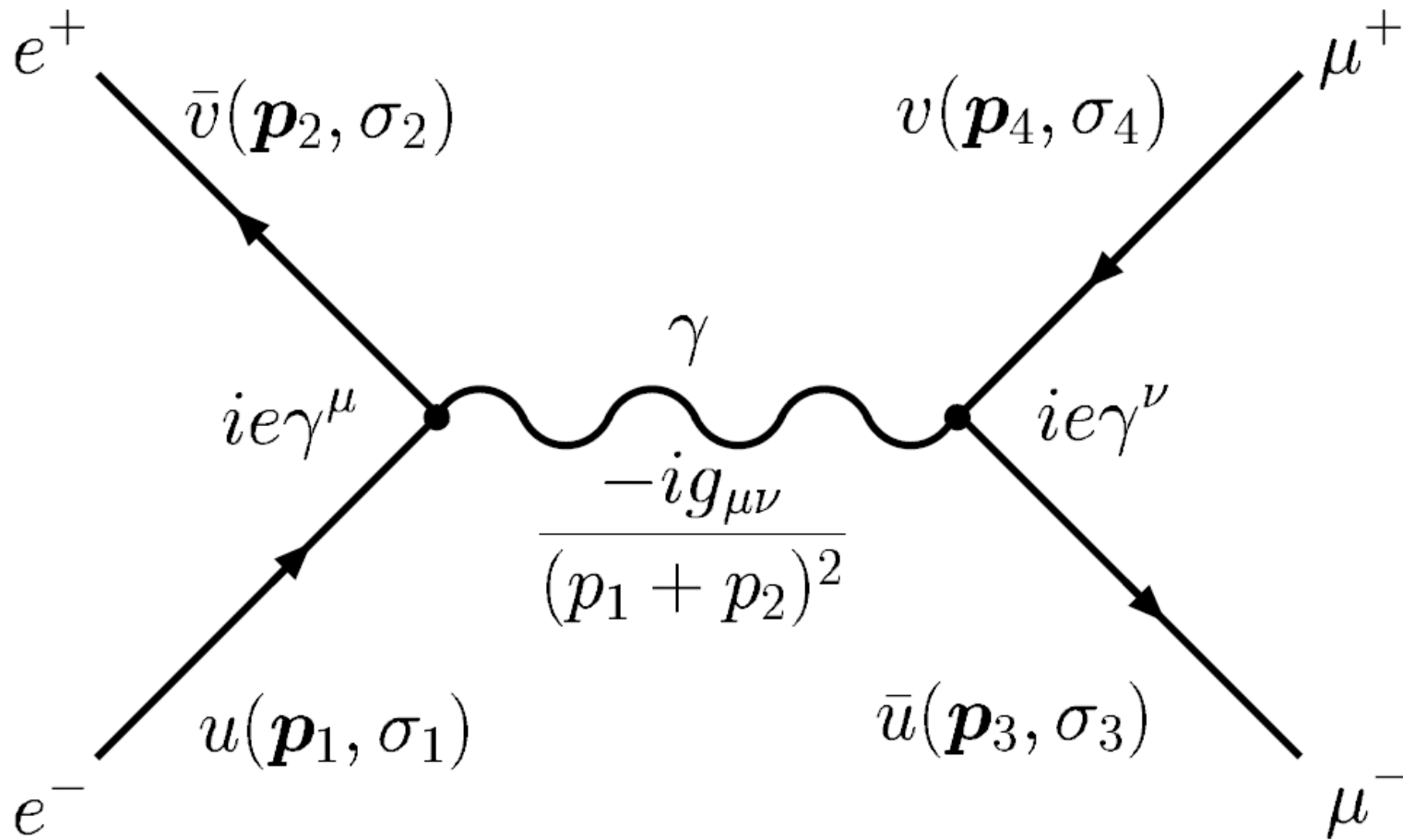
$$\mathcal{M} = \frac{e^2}{(p_1 + p_2)^2} [\bar{u}_3 \gamma_\mu v_4] [\bar{v}_2 \gamma^\mu u_1]$$

Diagrammes de Feynman



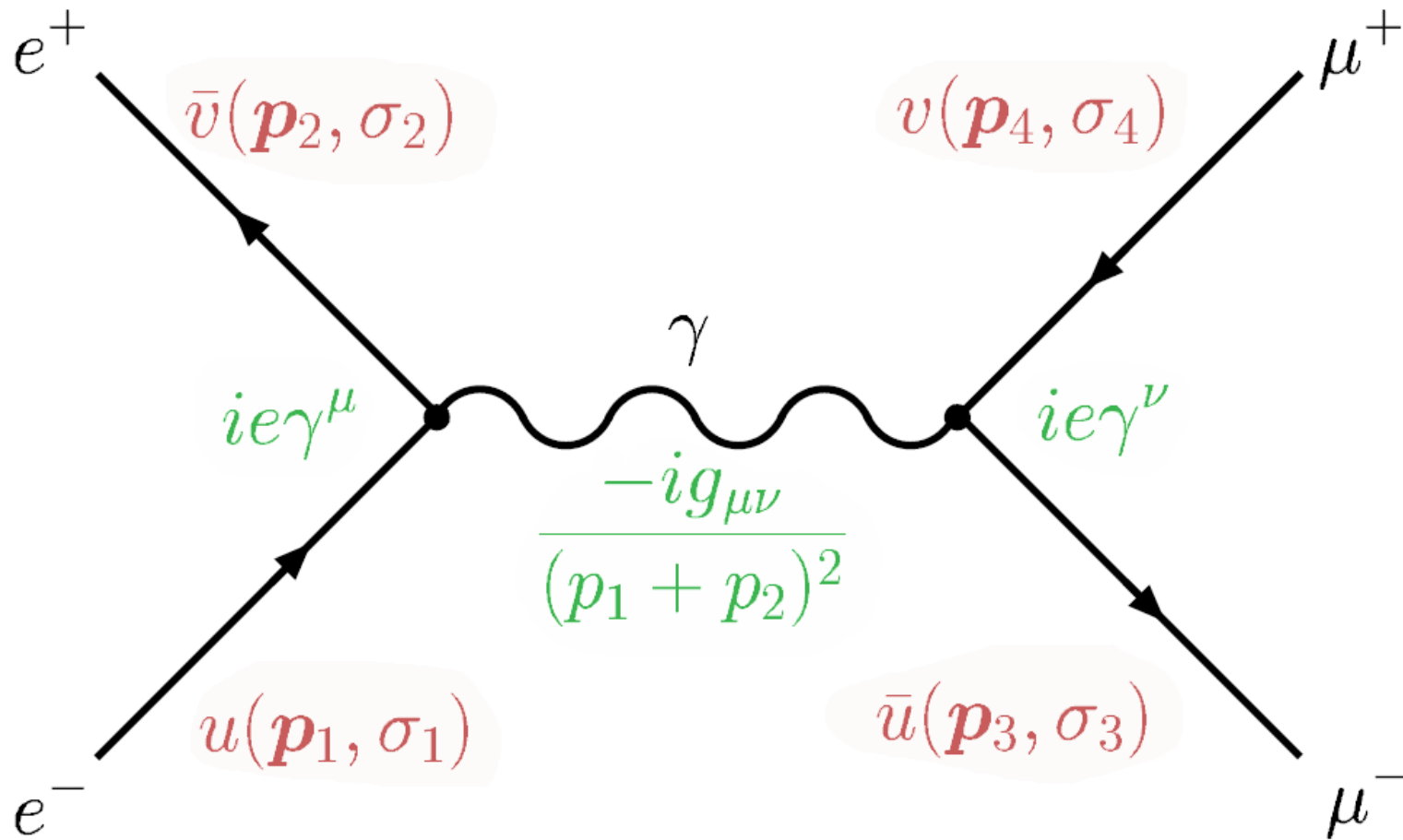
$$\mathcal{M} = \frac{e^2}{(p_1 + p_2)^2} [\bar{u}_3 \gamma_\mu v_4] [\bar{v}_2 \gamma^\mu u_1]$$

Diagrammes de Feynman



$$\mathcal{M} = \frac{e^2}{(p_1 + p_2)^2} [\bar{u}_3 \gamma_\mu v_4] [\bar{v}_2 \gamma^\mu u_1]$$

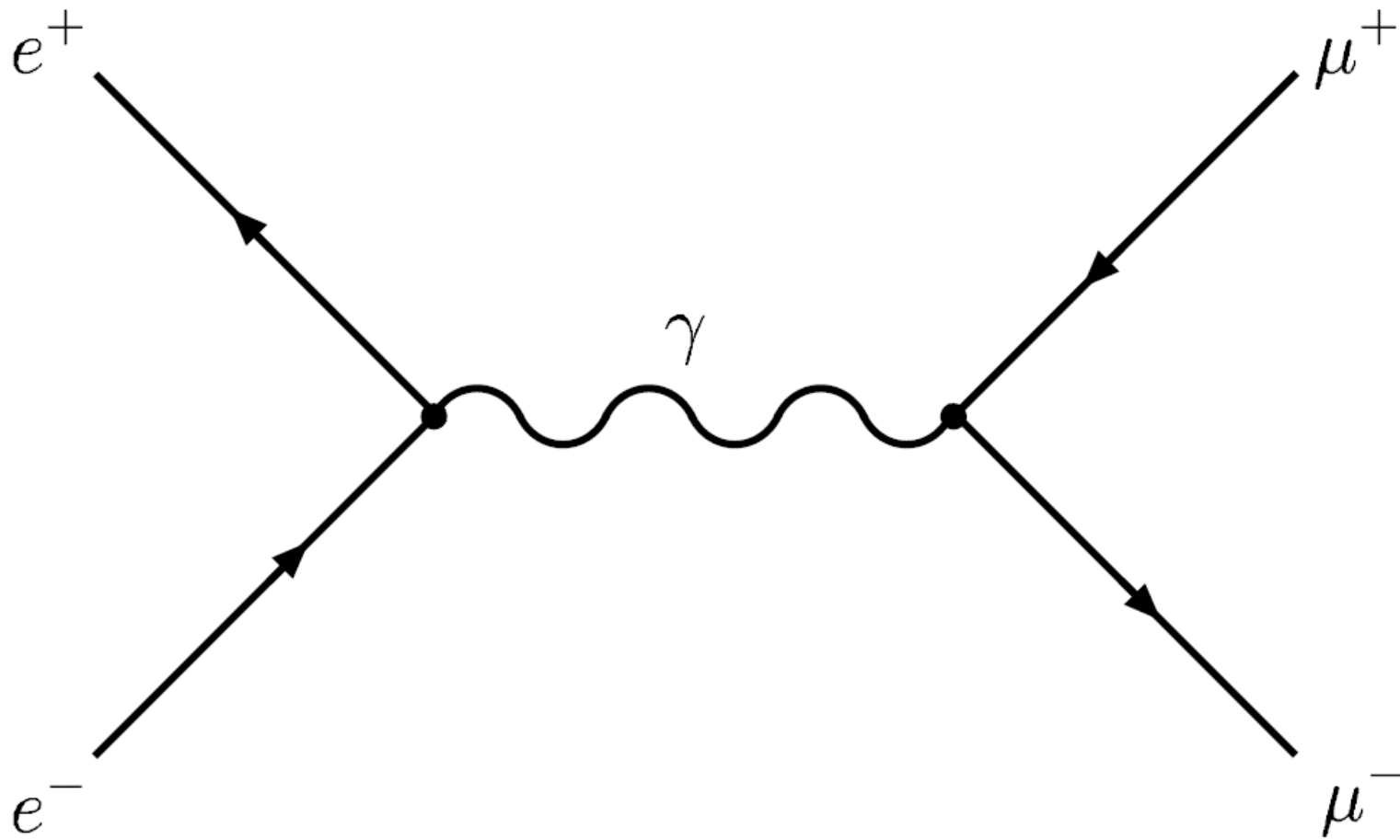
Diagrammes de Feynman



$$-i\mathcal{M} = [\bar{u}(\mathbf{p}_3, \sigma_3)(ie\gamma^\nu)v(\mathbf{p}_4, \sigma_4)] \frac{-ig_{\mu\nu}}{(p_1 + p_2)^2} [\bar{v}(\mathbf{p}_2, \sigma_2)(ie\gamma^\mu)u(\mathbf{p}_1, \sigma_1)]$$

$$\mathcal{M} = \frac{e^2}{(p_1 + p_2)^2} [\bar{u}_3 \gamma_\mu v_4] [\bar{v}_2 \gamma^\mu u_1]$$

Diagrammes de Feynman

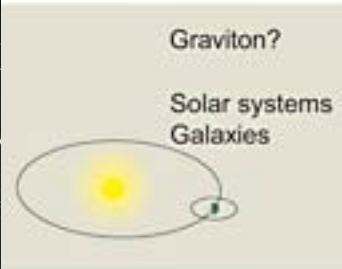


$$\mathcal{M} = \frac{e^2}{(p_1 + p_2)^2} [\bar{u}_3 \gamma_\mu v_4] [\bar{v}_2 \gamma^\mu u_1]$$

Les forces

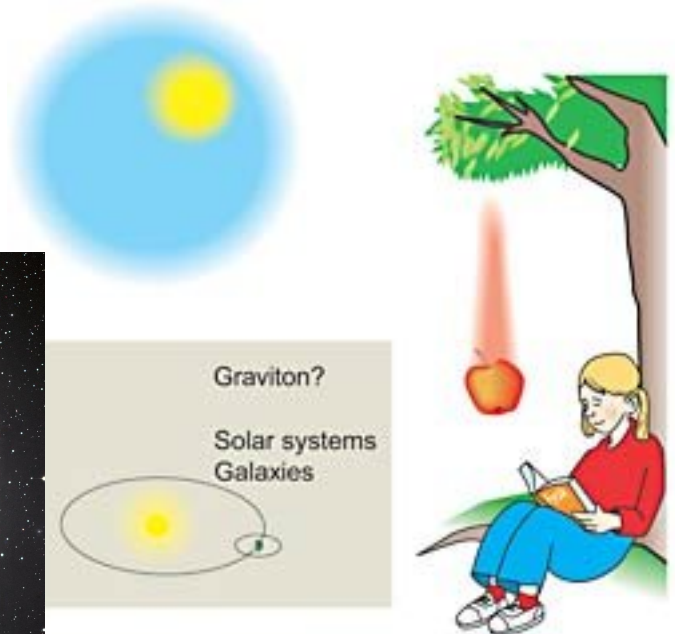


Les forces

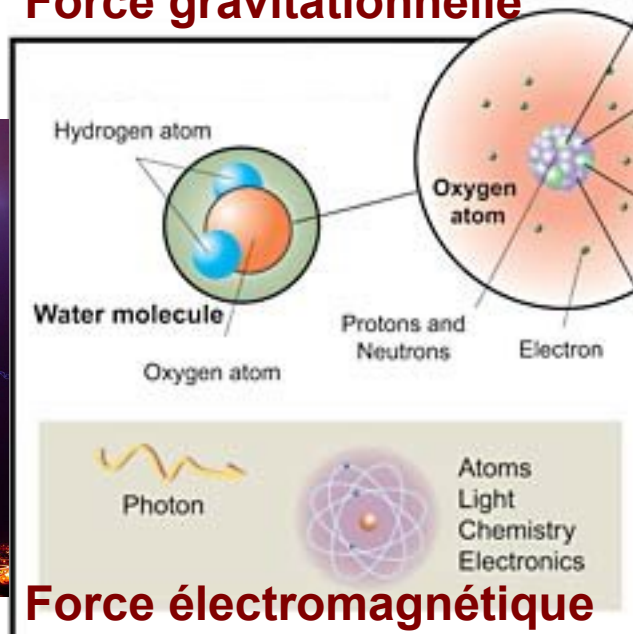


Force gravitationnelle

Les forces



Force gravitationnelle

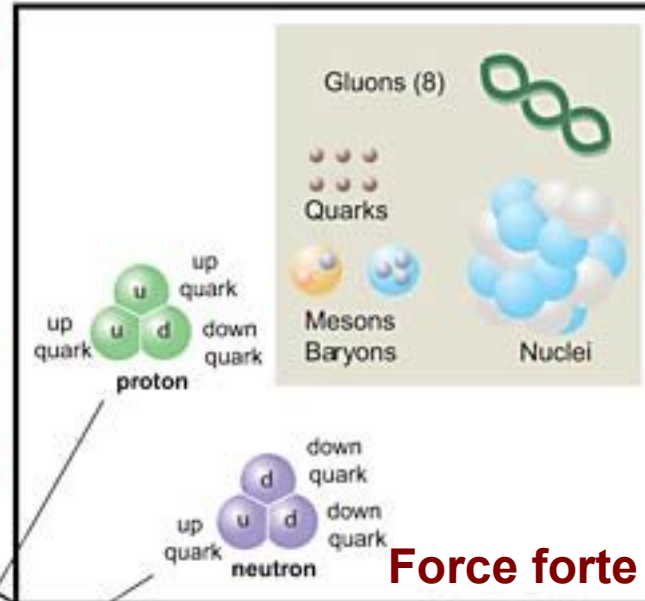


Force électromagnétique

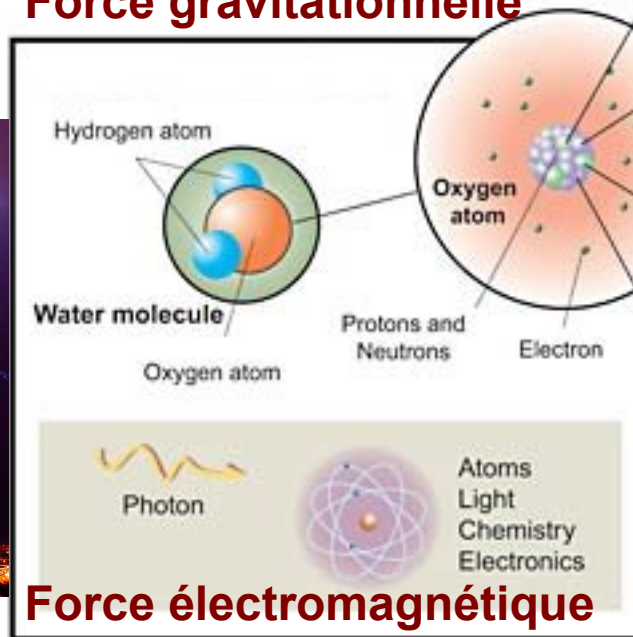
Les forces



Force gravitationnelle

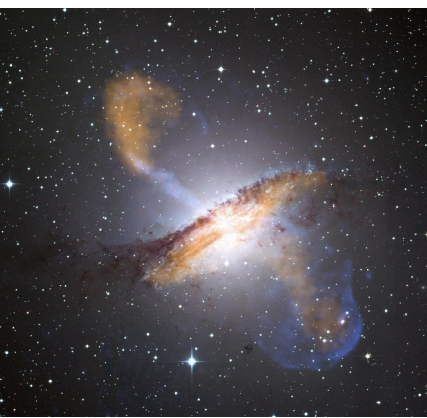


Force forte

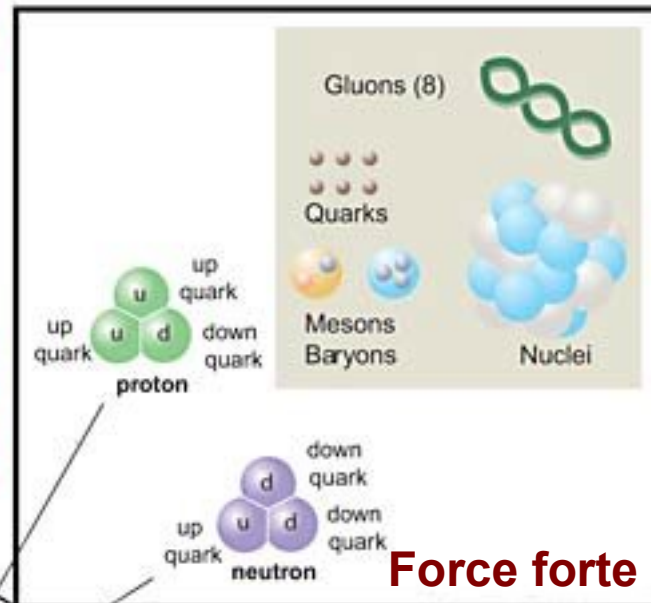


Force électromagnétique

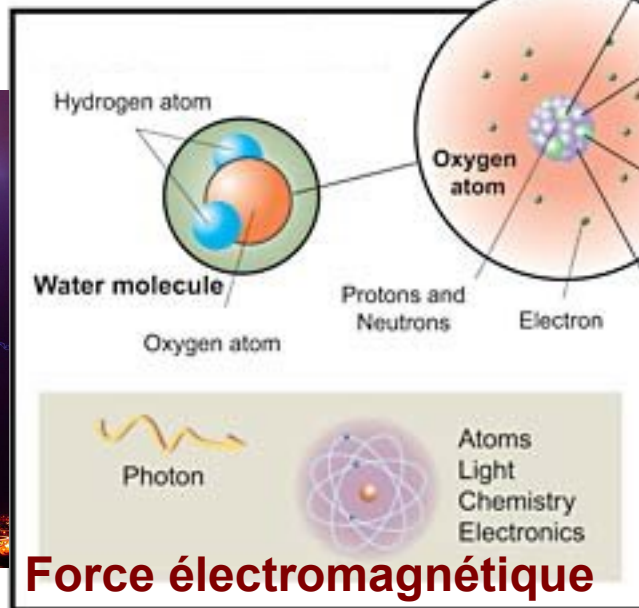
Les forces



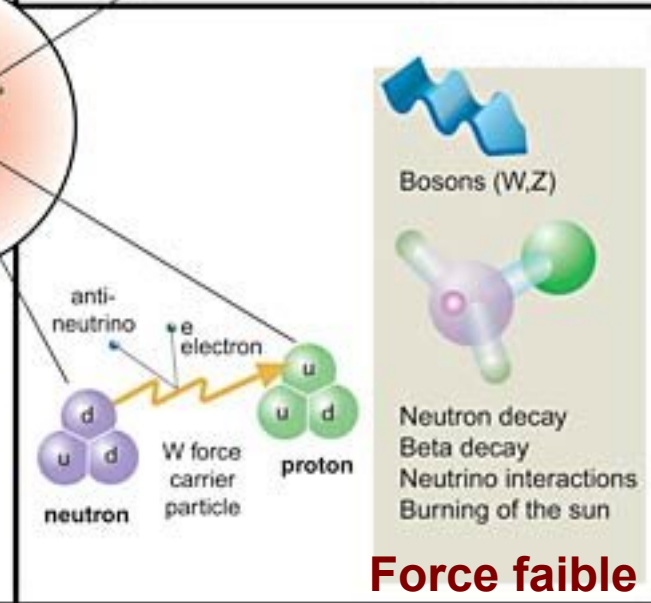
Force gravitationnelle



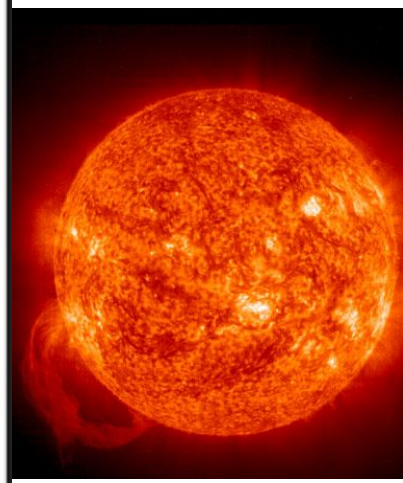
Force forte



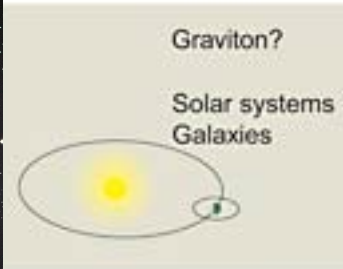
Force électromagnétique



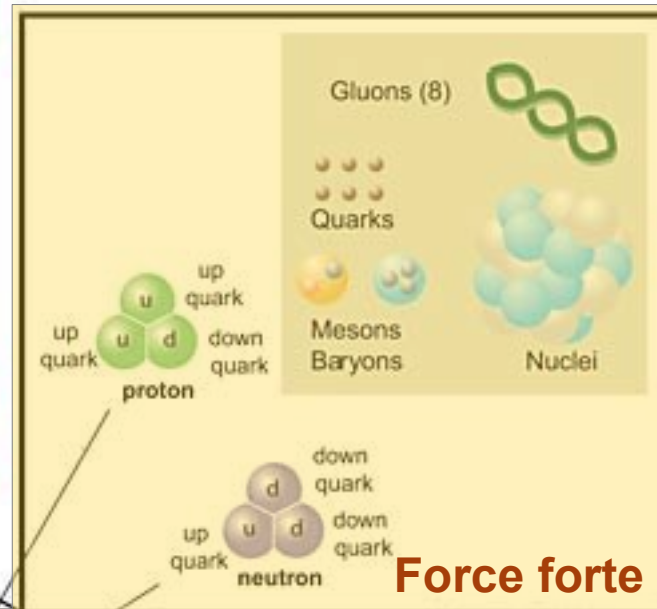
Force faible



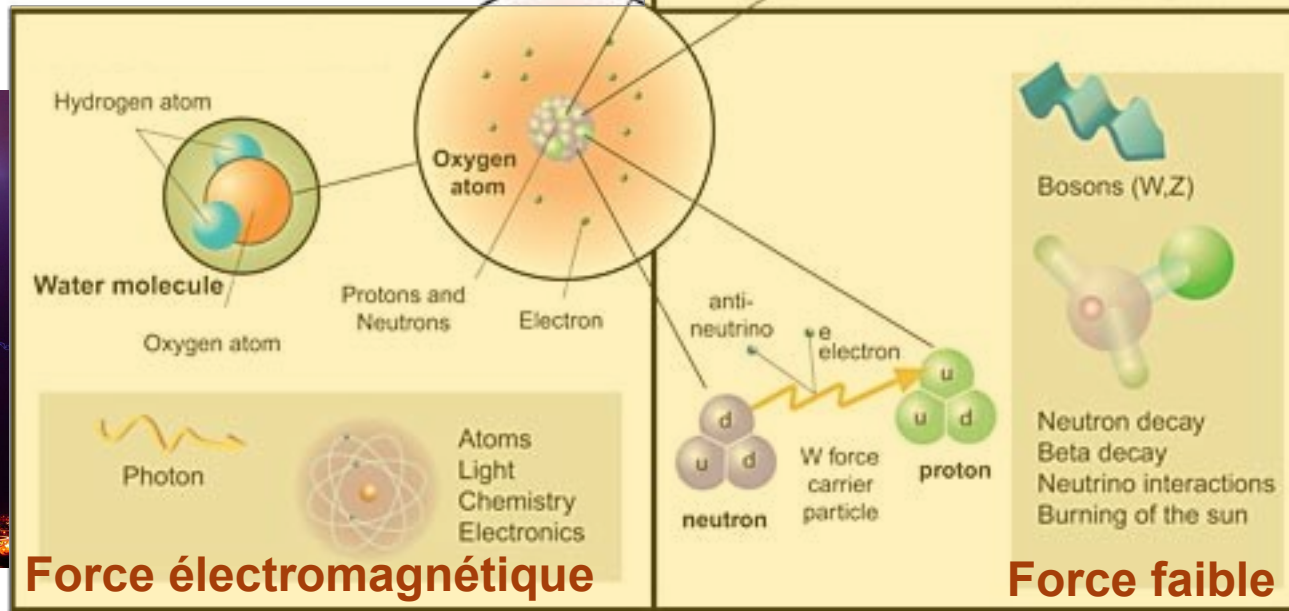
Les forces



Force gravitationnelle

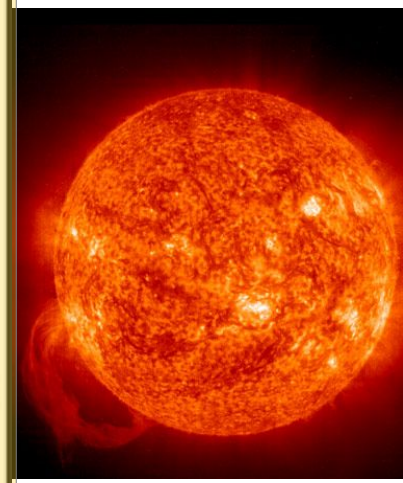


Force forte



Force électromagnétique

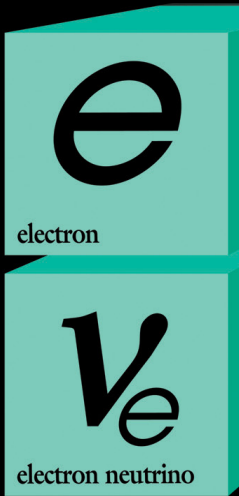
Force faible



Quarks



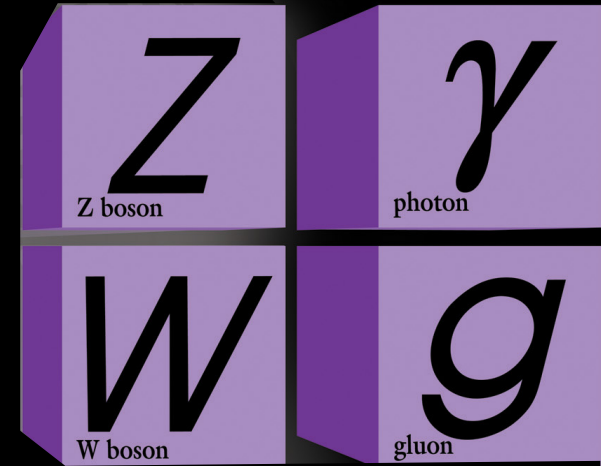
+ anti-matière



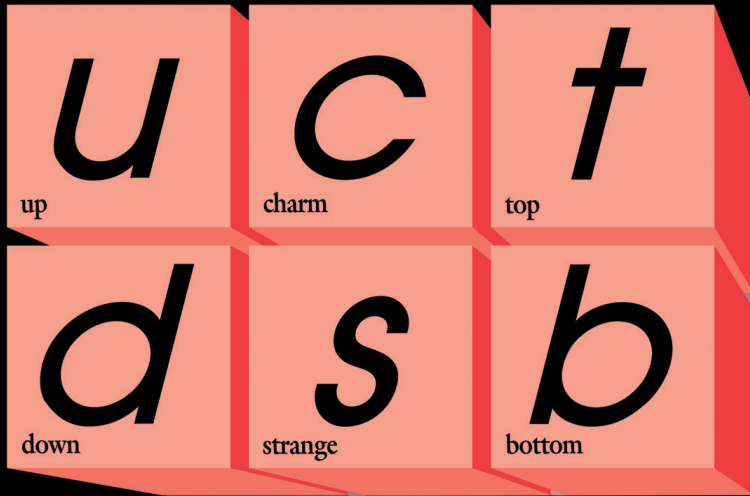
Leptons

Le modèle standard

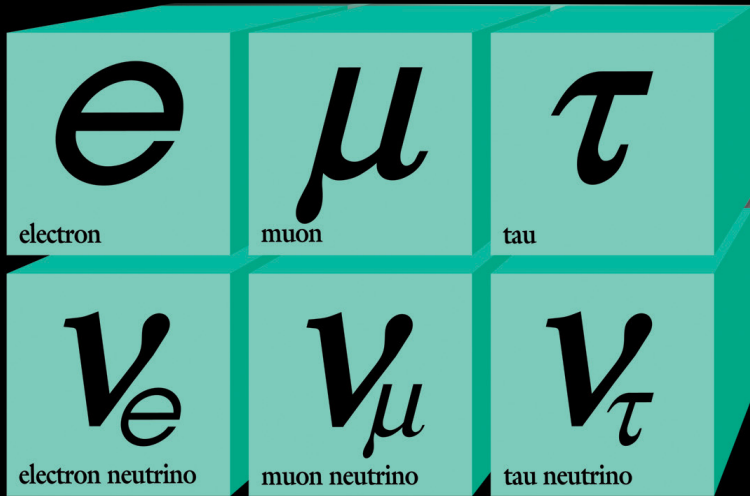
Forces



Quarks



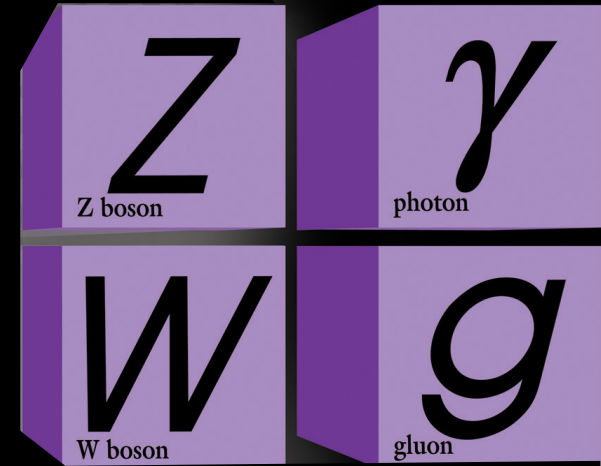
+ anti-matière



Leptons

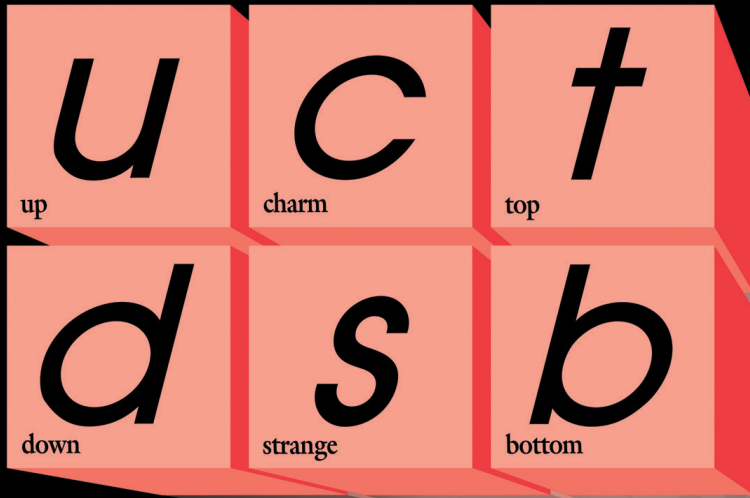
Le modèle standard

Forces



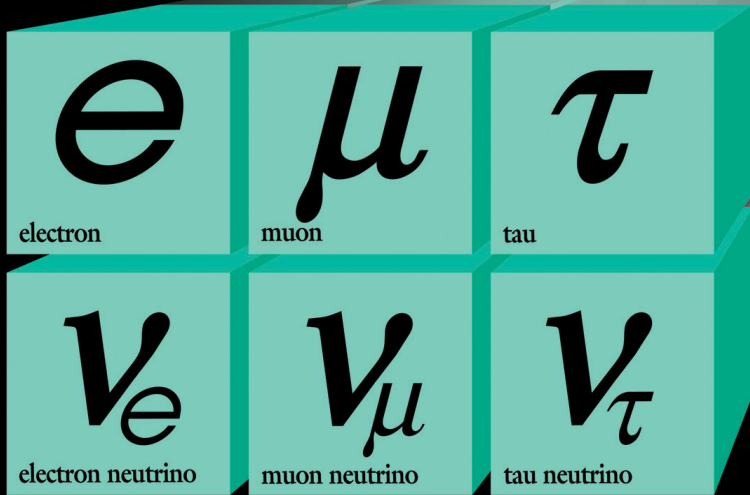
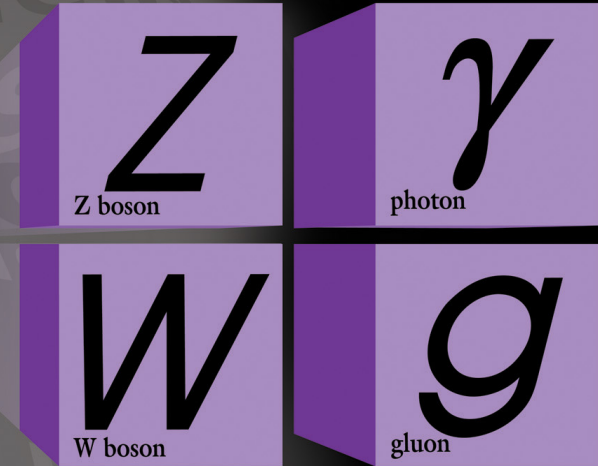
Quarks

Le modèle standard



+ anti-matière

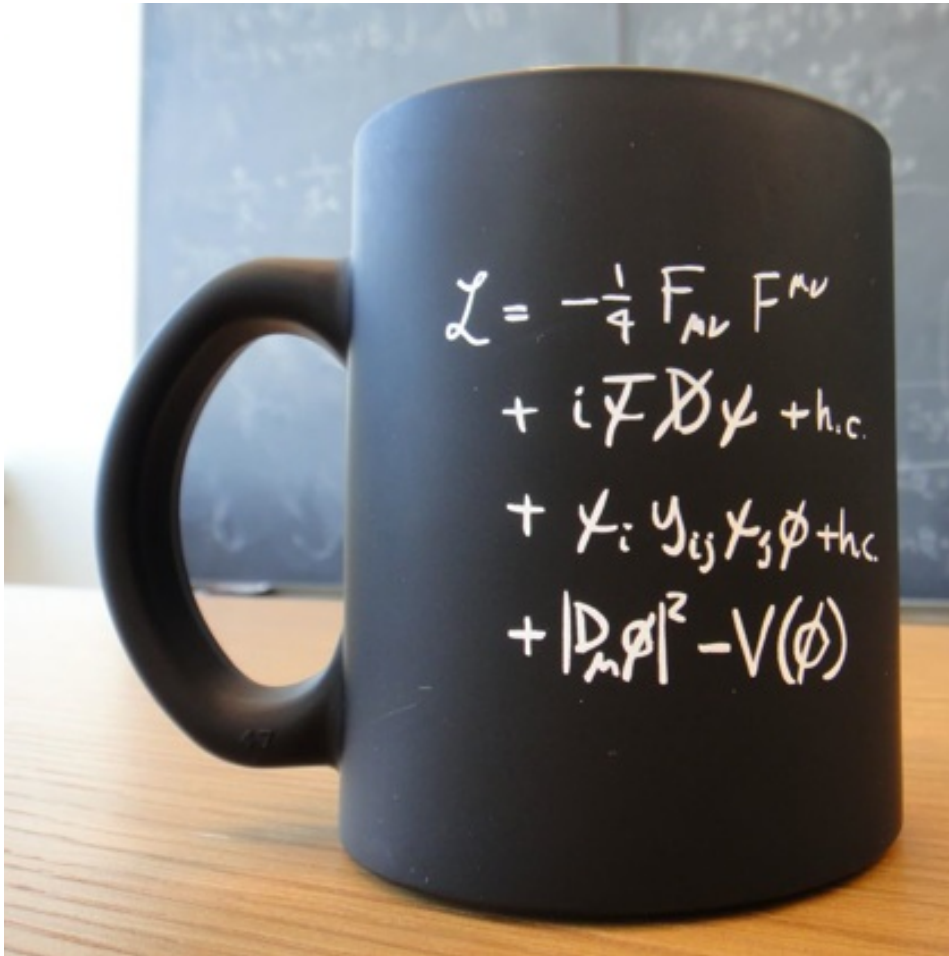
Forces



Leptons

Le modèle standard

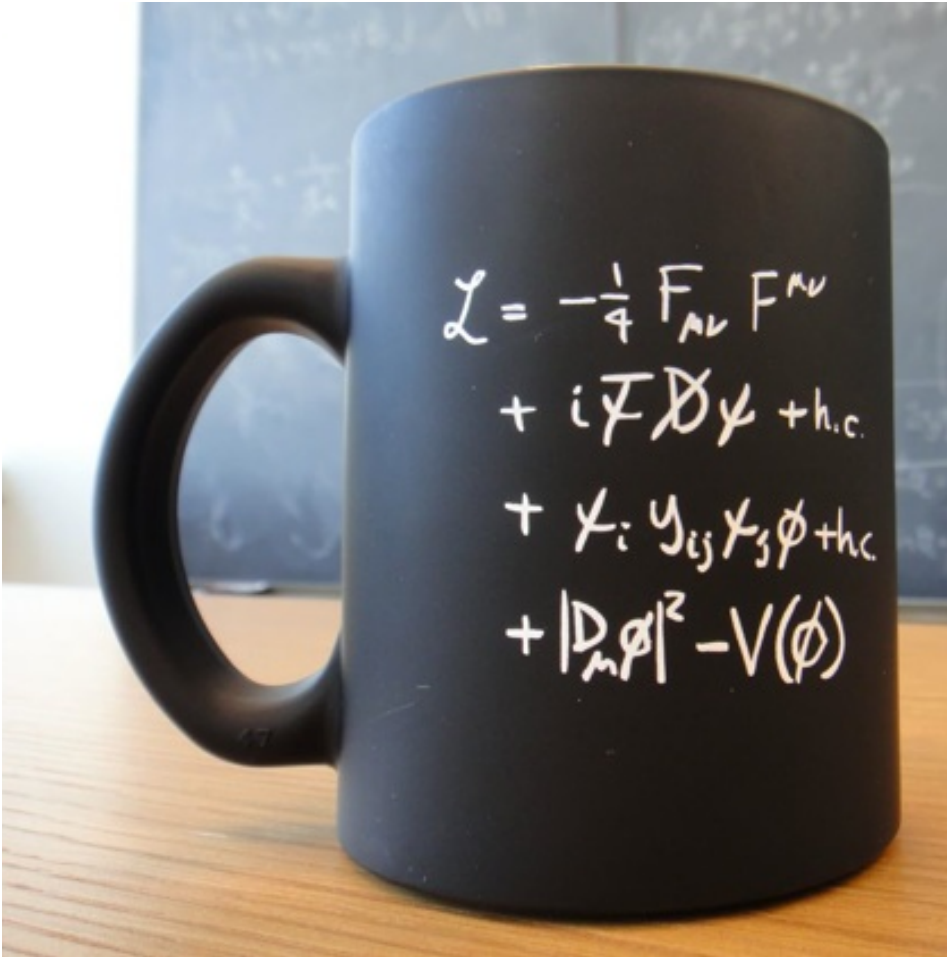
- Version synthétique



Le modèle standard

- Version synthétique

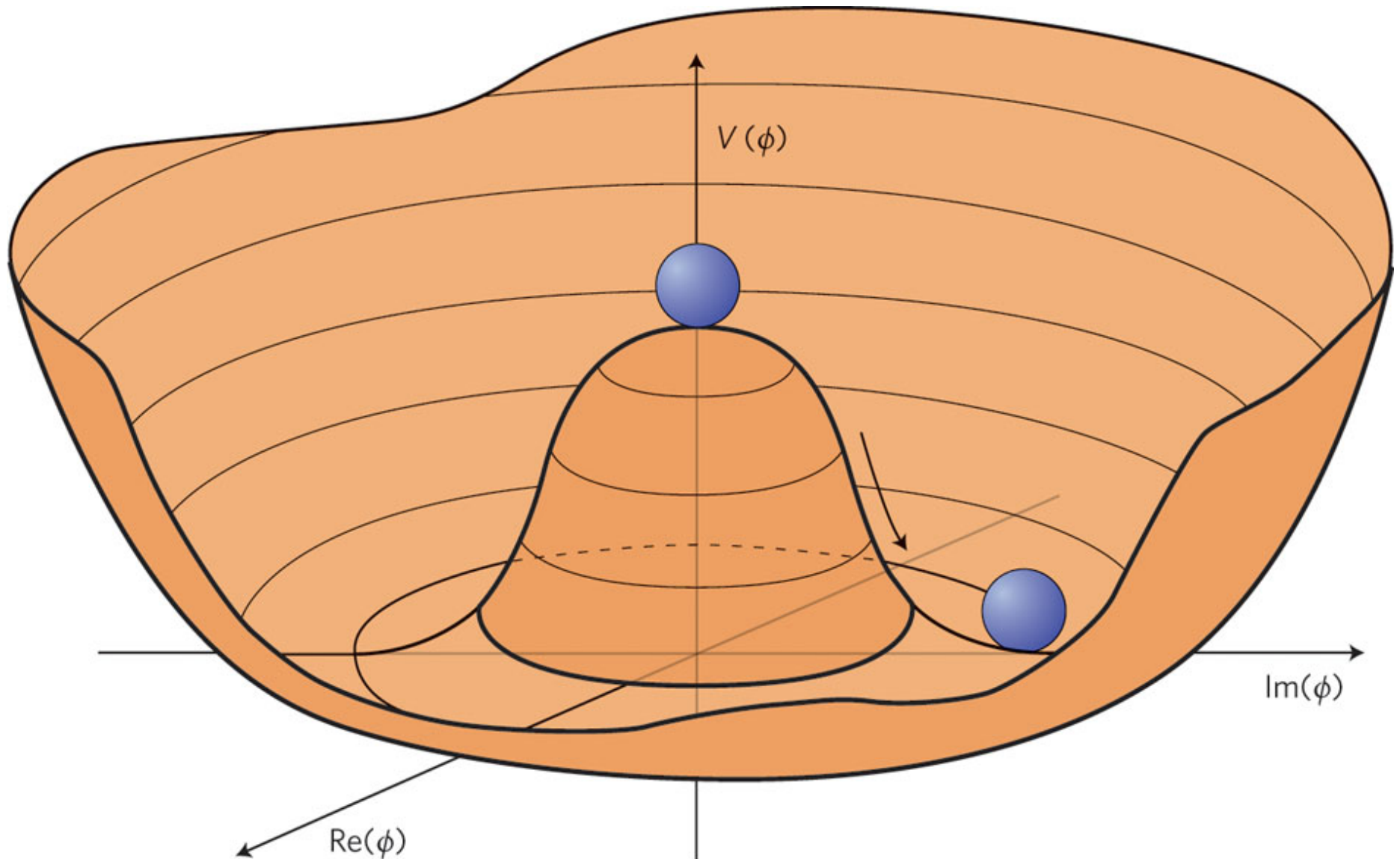
- Version développée...



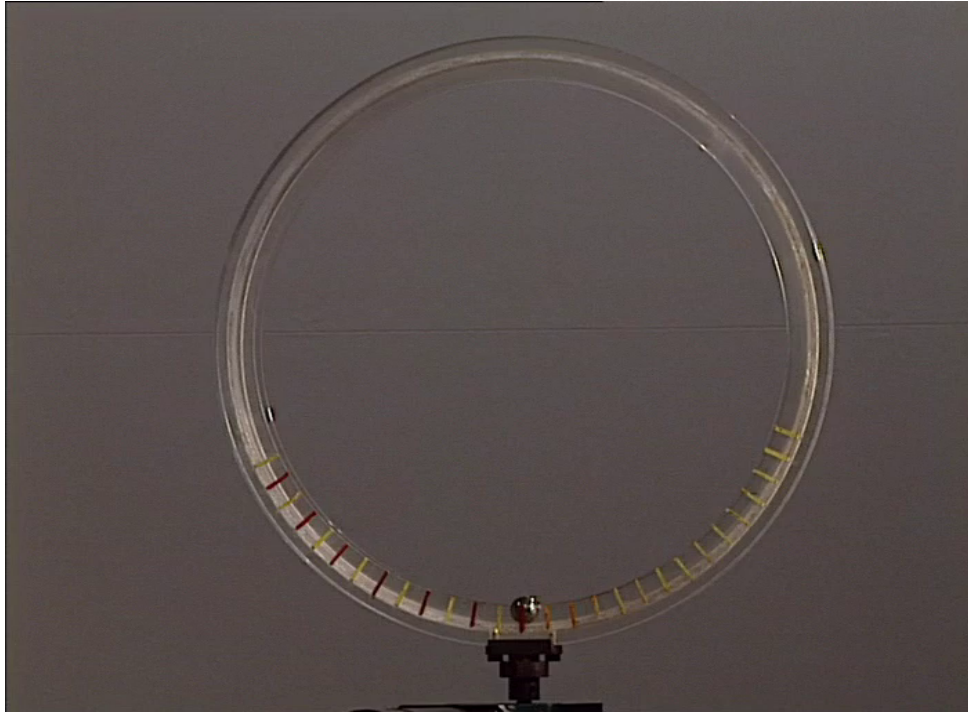
$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc}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

Brisure spontanée de la symétrie électrofaible

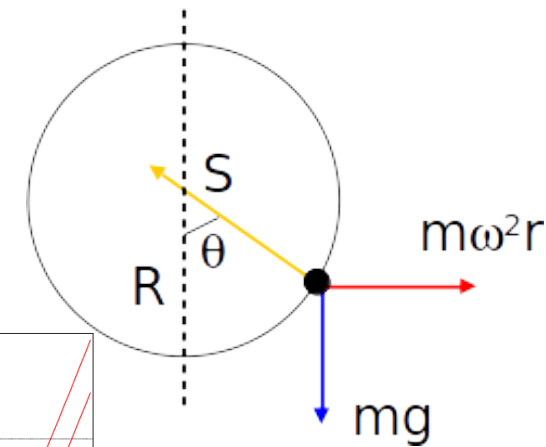
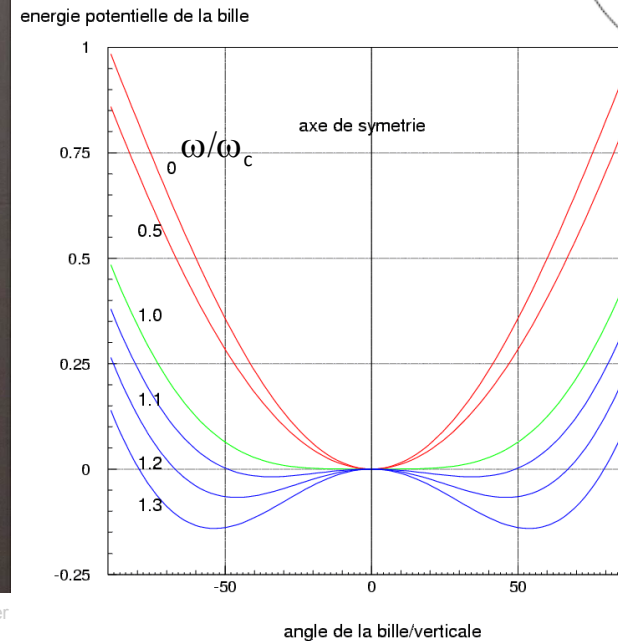
Le potentiel de Higgs : le « chapeau mexicain »



Brisure spontanée de symétrie



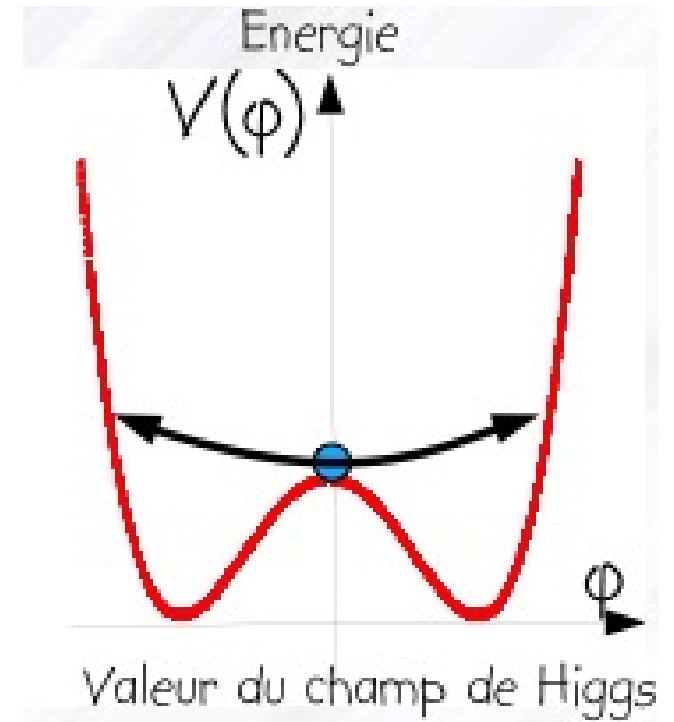
© M. Davier



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

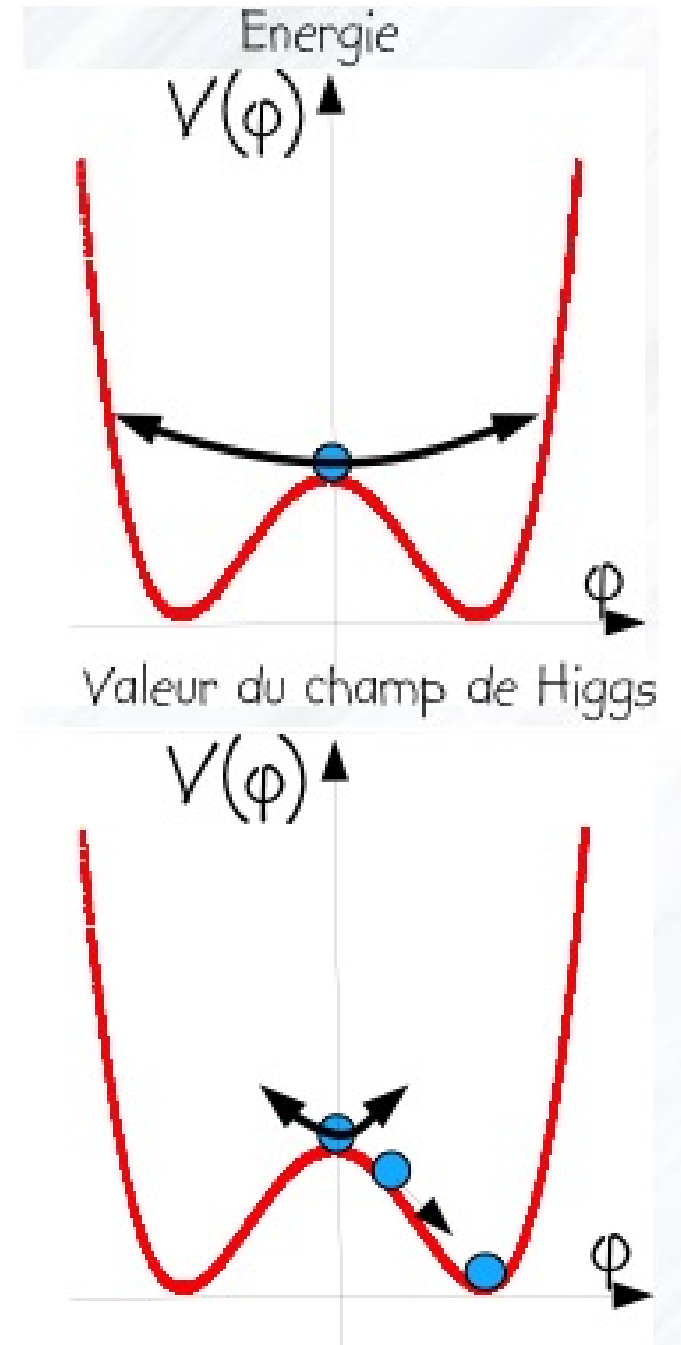
Brisure de la symétrie électrofaible

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

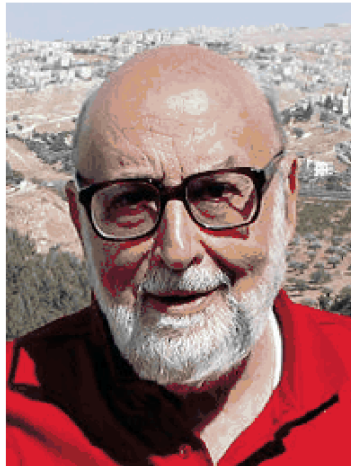


Brisure de la symétrie électrofaible

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



1964 : Le mécanisme de Higgs



BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.⁴⁻⁶ A

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local γ_5 -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_5 invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reason-

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenome-

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta\varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

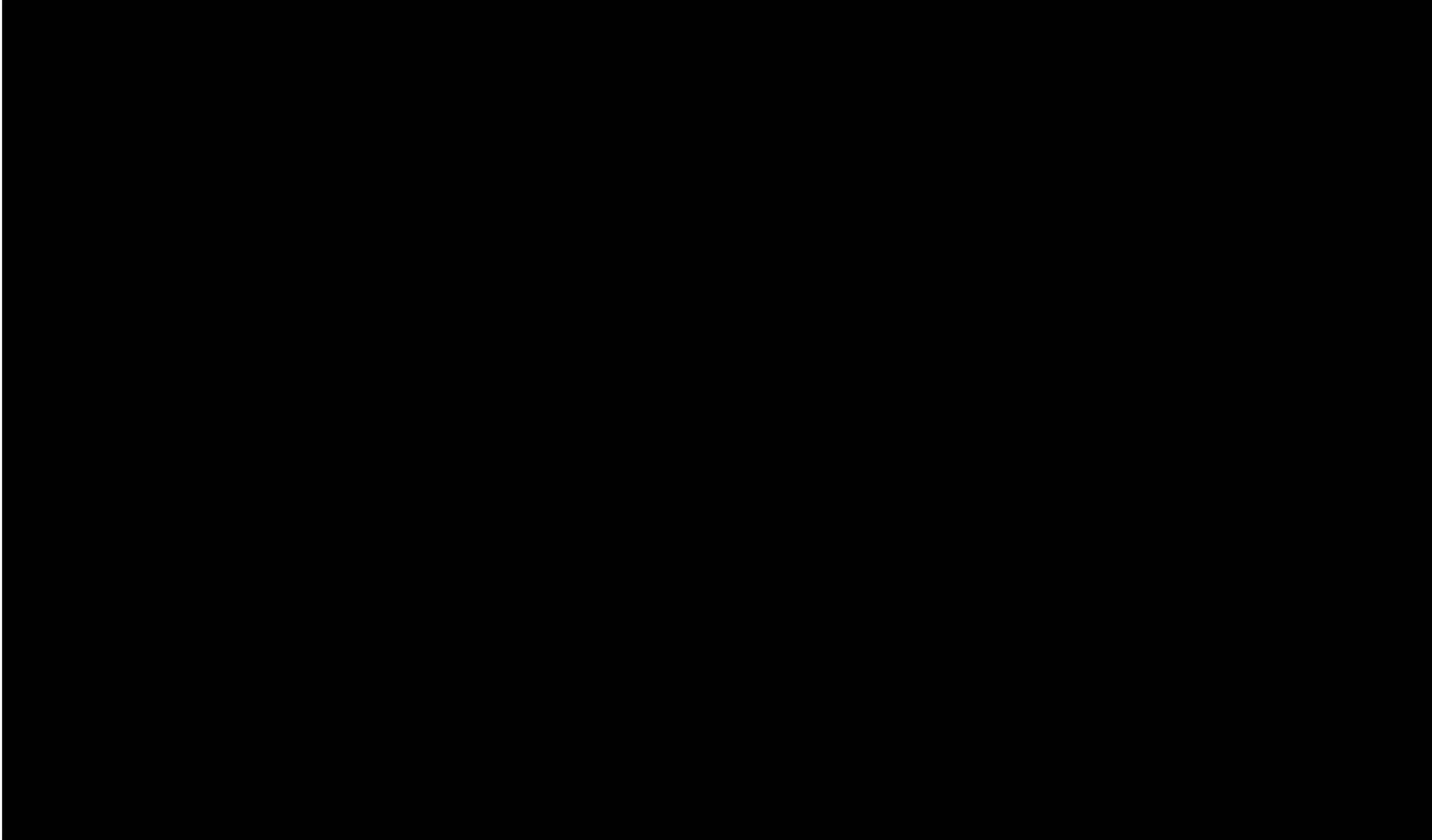
$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e\varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

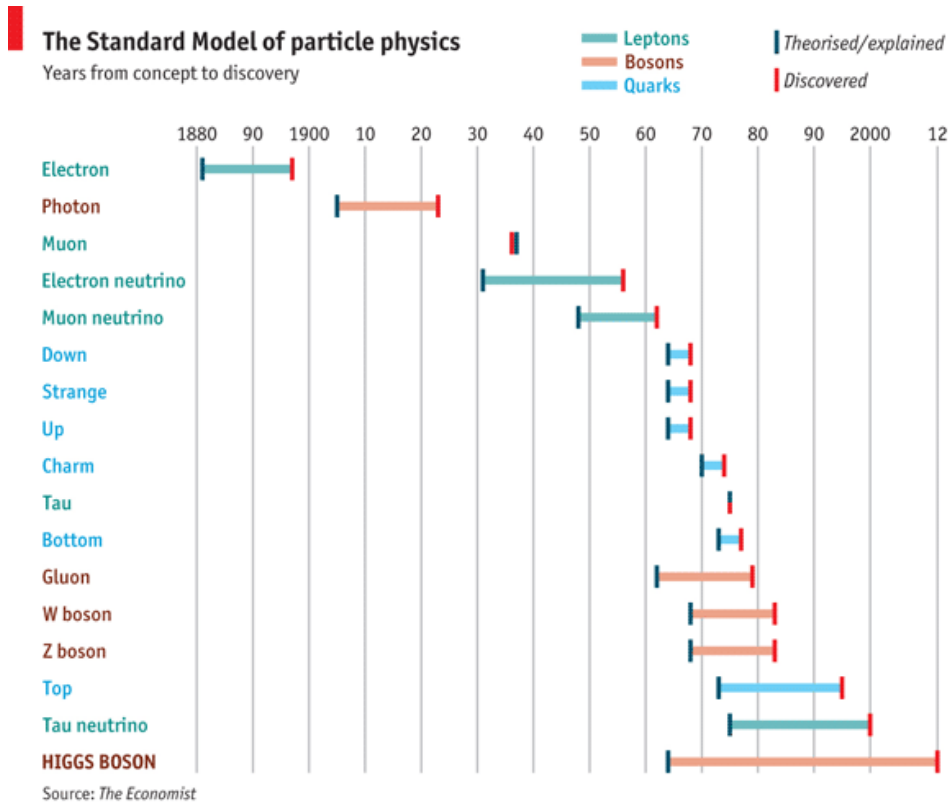
$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

- Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble publient à quelques mois d'intervalle
- Prédiction : existence du **champ de Higgs**, manifestation sous forme d'une nouvelle particule, le **boson de Higgs**

Interactions avec le boson de Higgs

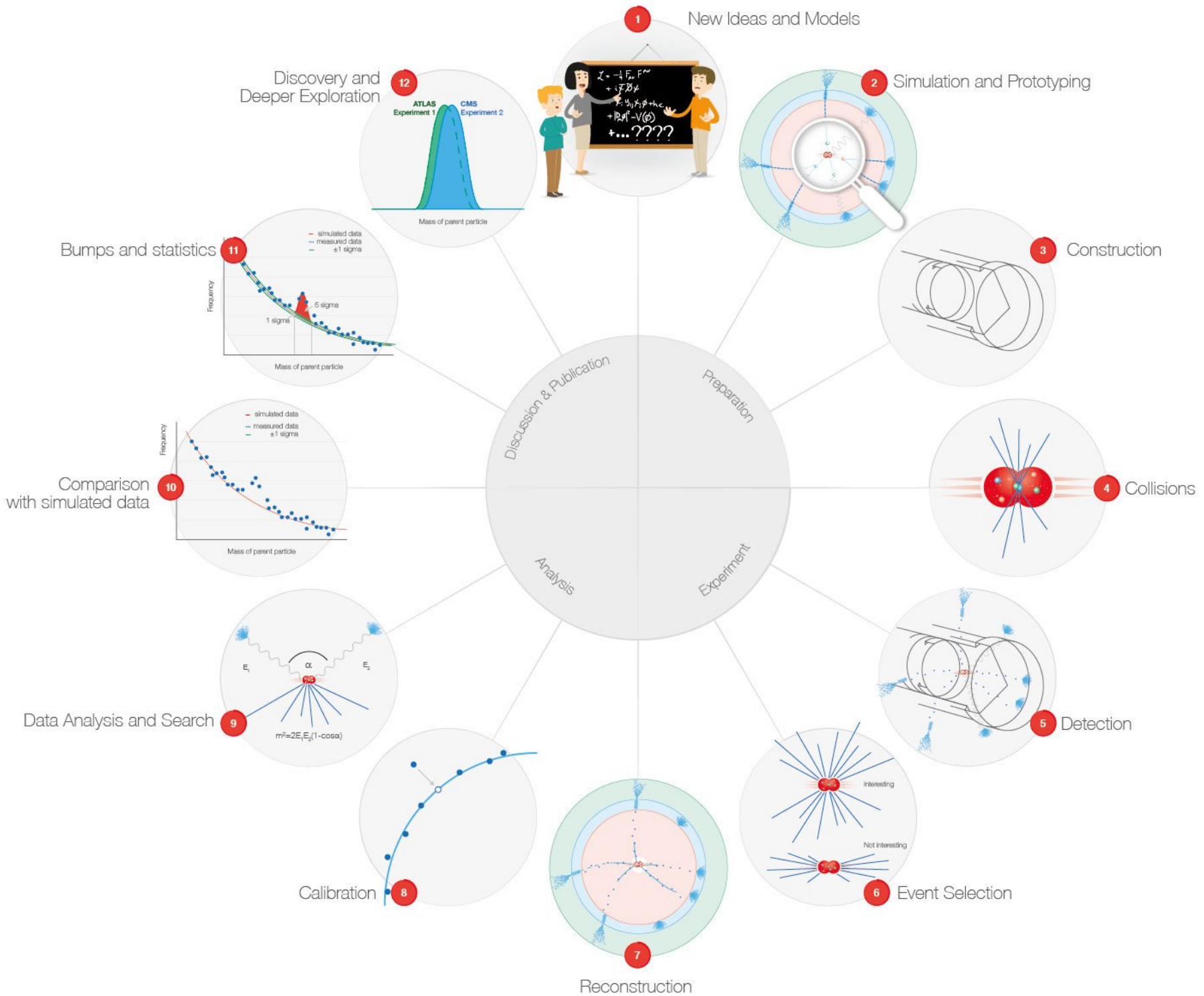


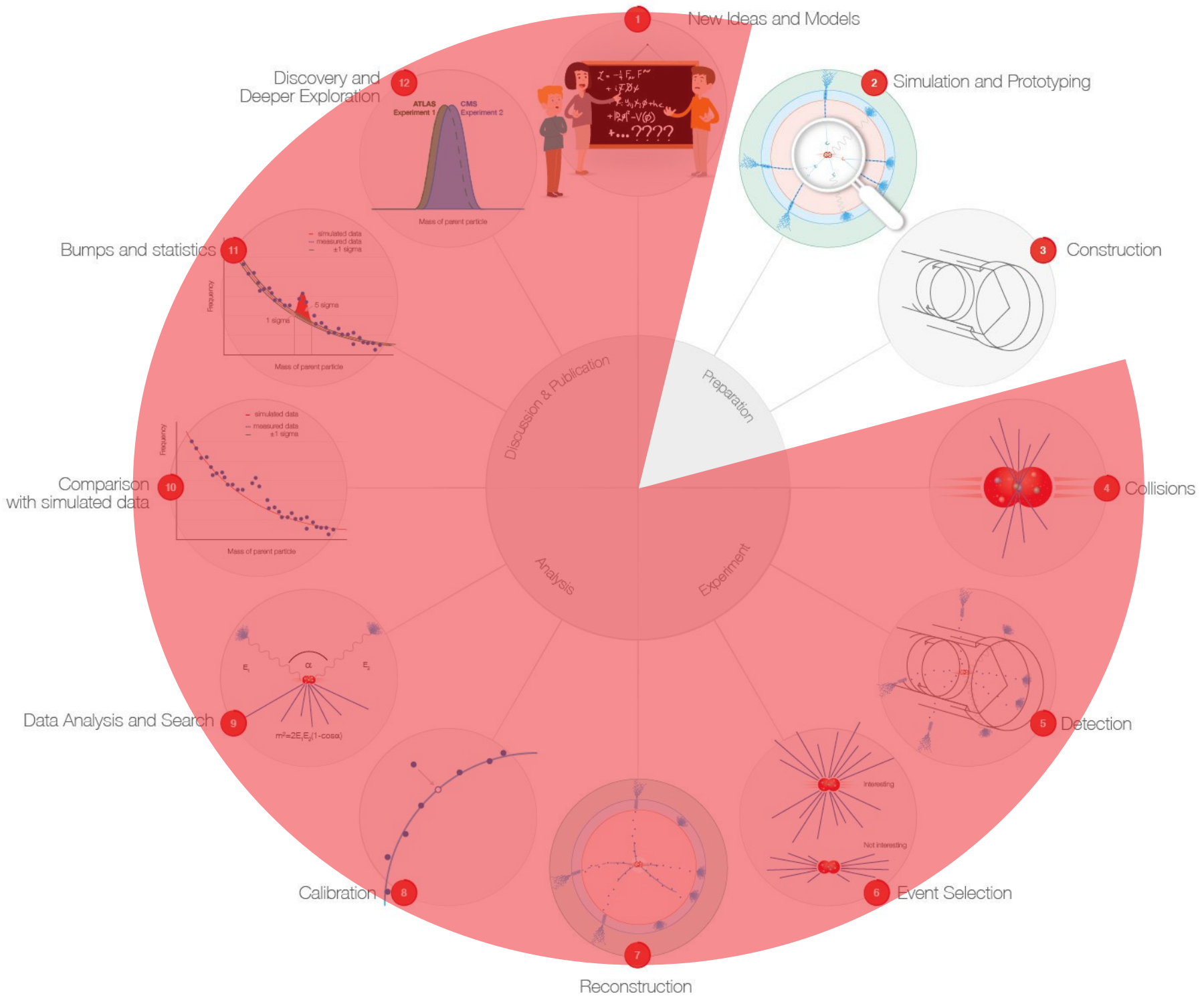
Une longue quête expérimentale



© The Economist

- Modèle standard : énorme succès, sauf que les particules n'ont pas de masse...
- Boson de Higgs : pièce essentielle pour accorder théorie et expérience
- 48 ans entre la prédiction théorique et la découverte expérimentale !
- Pourquoi ? La théorie prédit tout sur le boson de Higgs, sauf sa masse ! Il faut donc chercher partout...

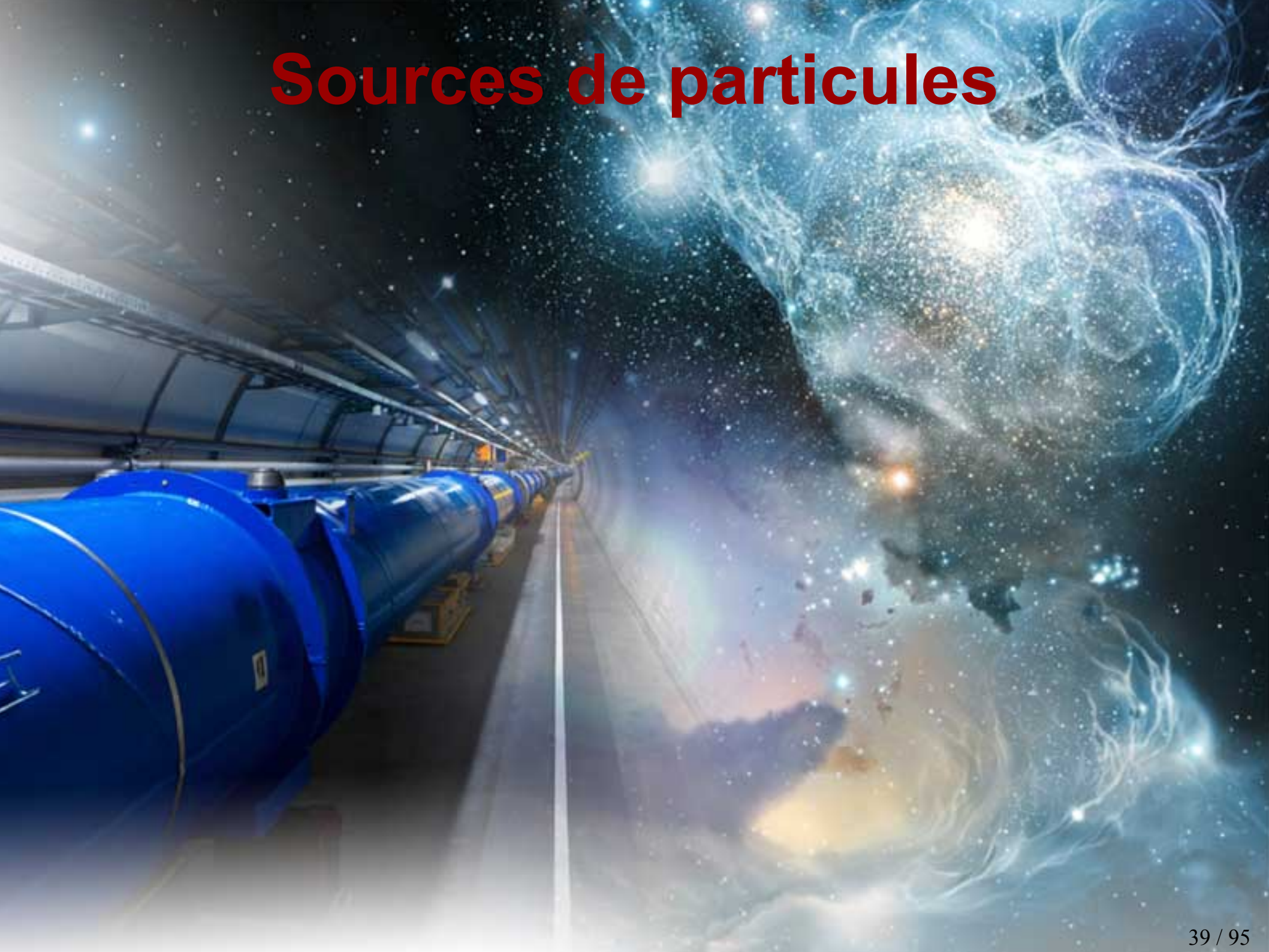




Beaucoup d'énergie

- Augmenter l'énergie permet de :
 - ▶ sonder des distances plus courtes ($E = hc/\lambda$)
 - ▶ produire des particules plus massives ($E=mc^2$)
 - ▶ « remonter » dans le temps (conditions qui prévalaient au début de l'univers quand il était plus chaud)
- Sources d'énergie :
 - ▶ accélérateurs de particules
 - le LHC au CERN
 - ▶ premiers âges de l'Univers
 - cosmologie
 - ▶ phénomènes cosmiques violents
 - rayons cosmiques et astroparticules

Sources de particules

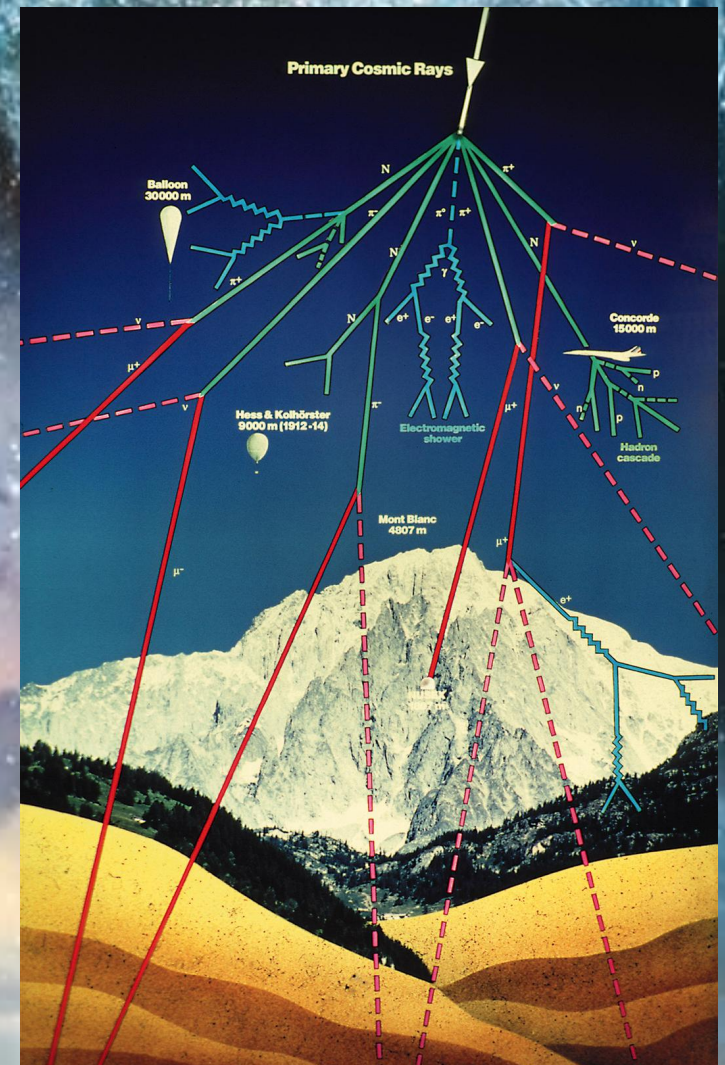


Sources de particules

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

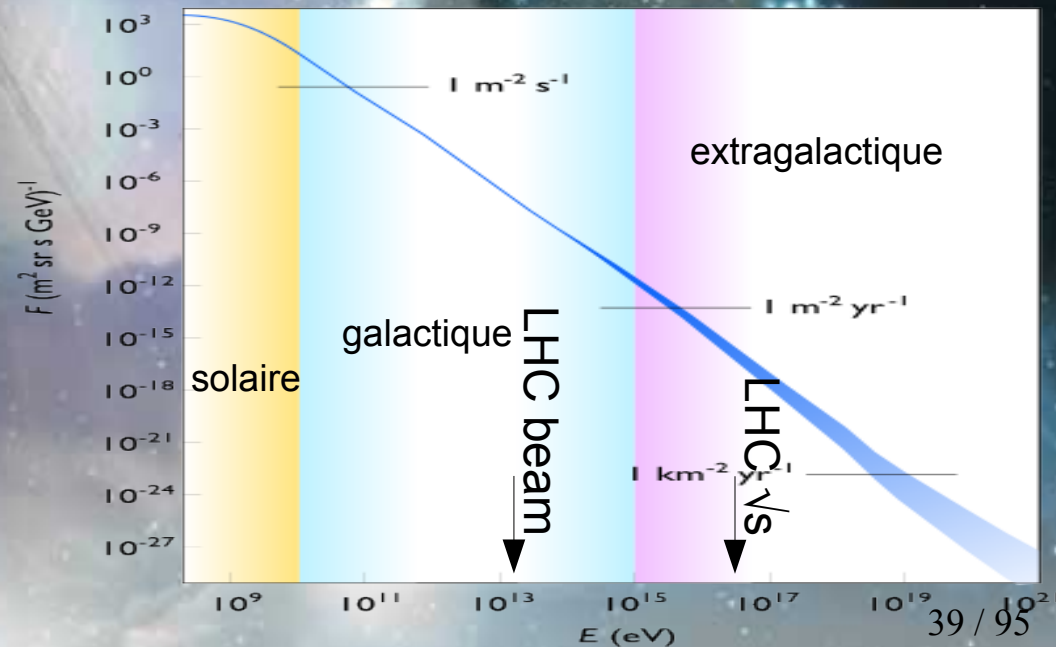
Sources de particules

L'Univers et les rayons cosmiques



Sources de particules

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



Sources de particules

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

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

Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



LHCb

ATLAS

CMS

ALICE

Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)

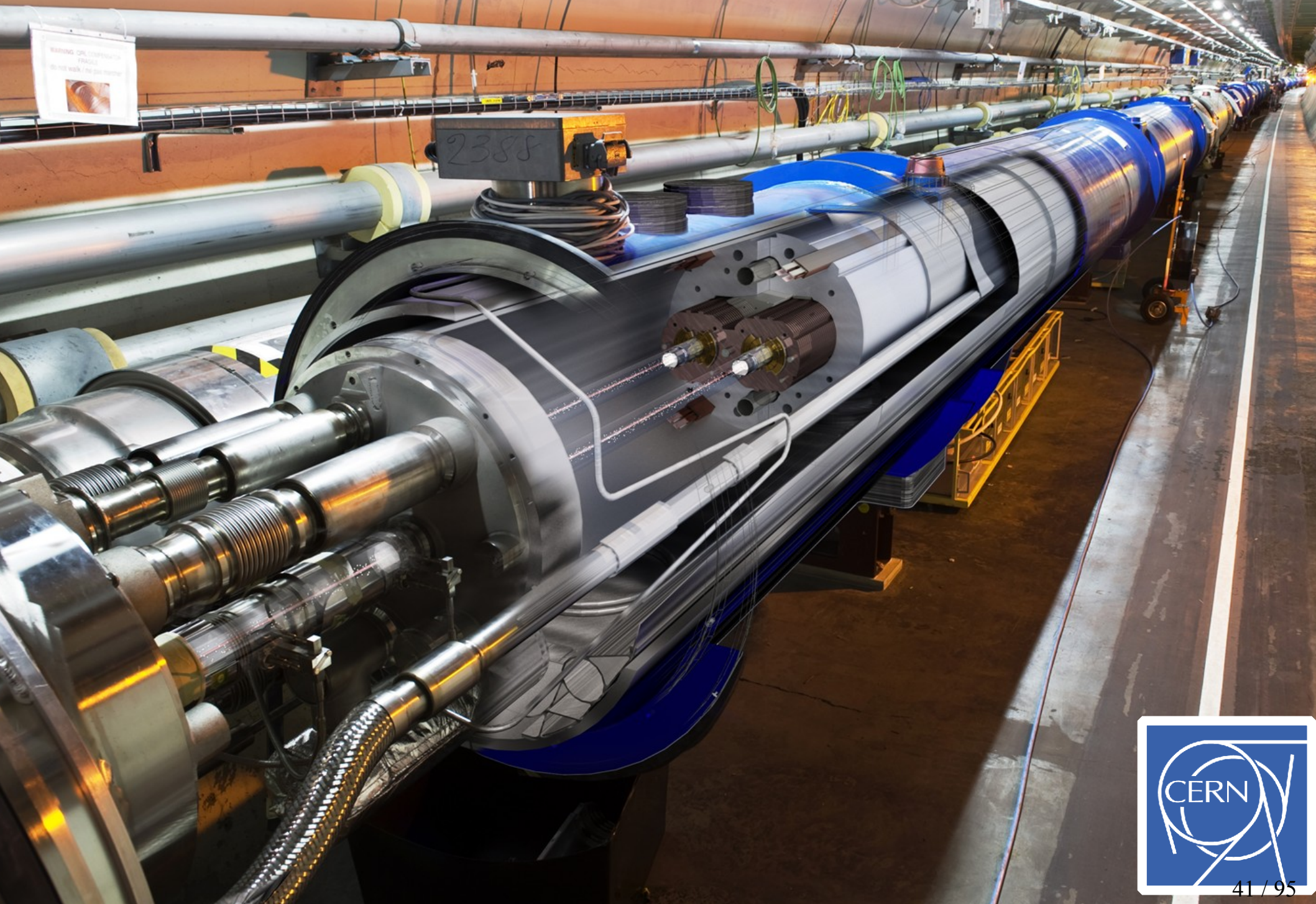


Le LHC

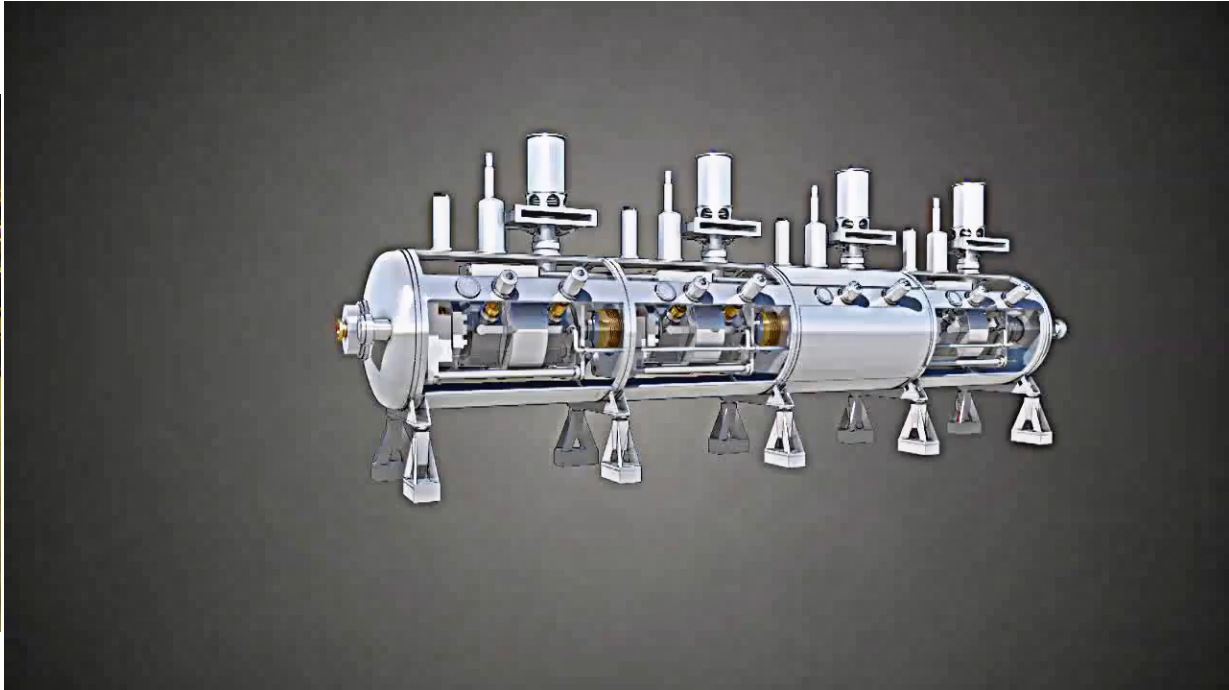
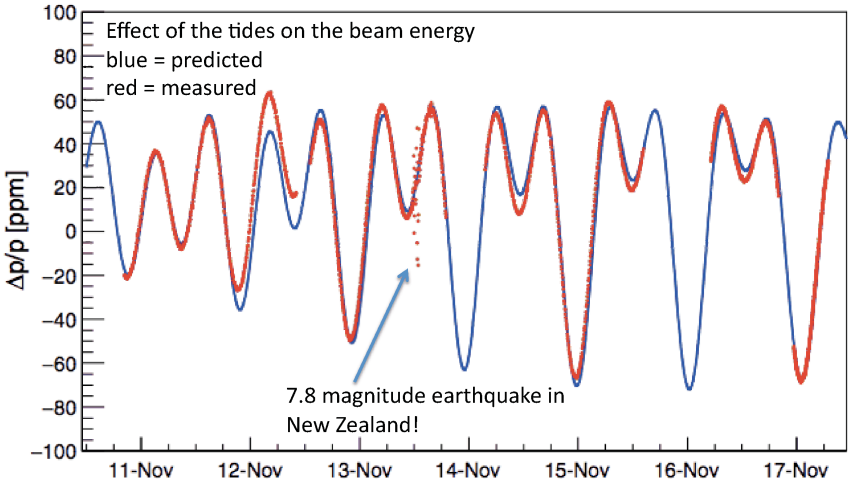
(grand collisionneur de hadrons)



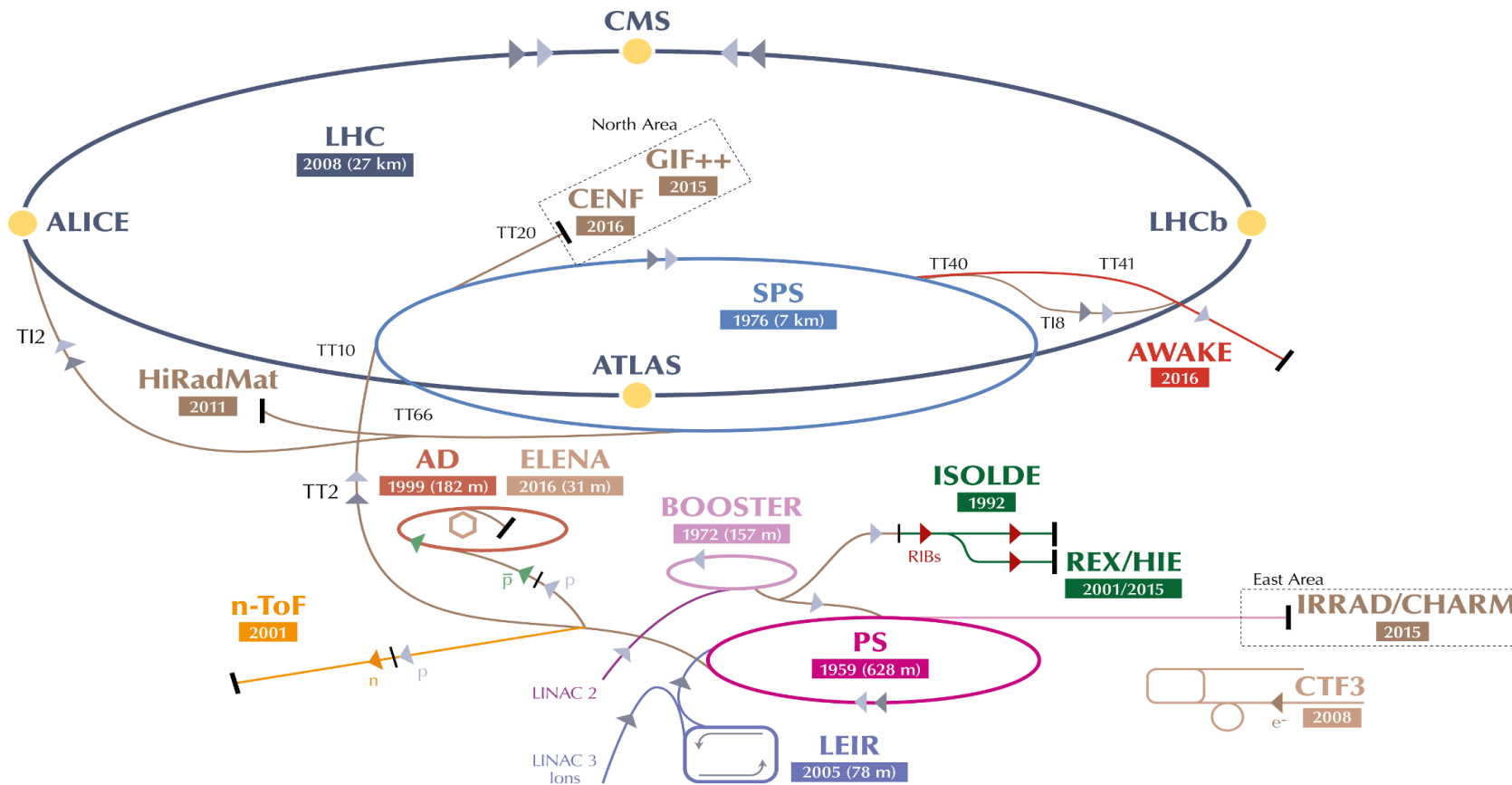
Le LHC : la machine à superlatifs



Aimants et cavités

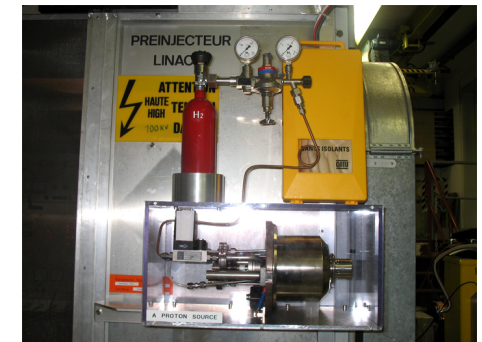


Le CERN : les accélérateurs



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

LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility
 AWAKE Advanced WAKEfield Experiment ISOLDE Isotope Separator OnLine REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight HiRadMat High-Radiation to Materials
 CHARM Cern High energy AcceleRator Mixed field facility IRRAD proton IRRADIation facility GIF++ Gamma Irradiation Facility
 CENF CErn Neutrino platForm



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
	1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
	Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
35 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
	Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
	2029-2041	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grands pays
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

35 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
Fin 2018	Fin du Run 2
Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
2029-2041	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
	1998-2008	Construction du LHC
35 ans d'exploitation	Septembre 2008	Mise en service
	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
	Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
	2029-2041	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



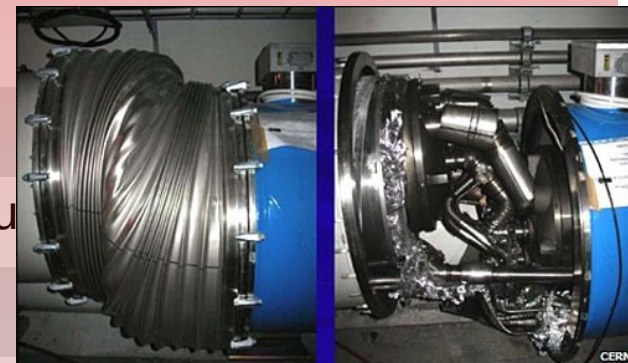
Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

35 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
Fin 2018	Fin du Run 2
Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
2029-2041	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

35 ans d'exploitation

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



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
	1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
	Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
35 ans d'exploitation	Octobre 2009	Redémarrage
	Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
	Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV (Run 1)
	Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
	Fin 2018	Fin du Run 2
	Juillet 2022	Début du Run 3 à 13.6 TeV
	Fin 2025	Fin des collisions à luminosité nominale
	2029-2041	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



Le CERN



Organisation européenne pour la recherche nucléaire

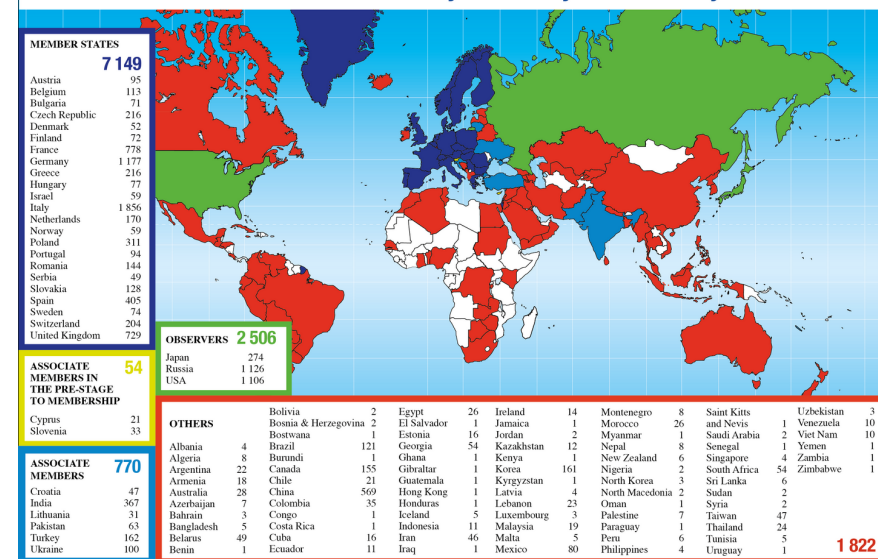
Le laboratoire européen pour la physique des particules

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

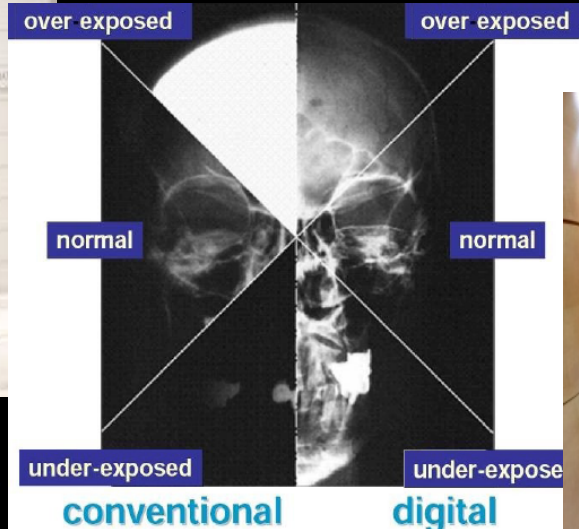
- 500 instituts, 80 pays

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

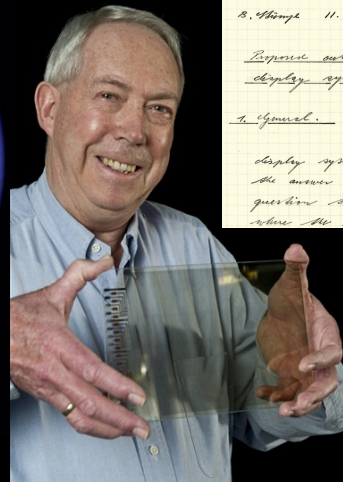
Distribution of All CERN Users by Nationality on 27 January 2020



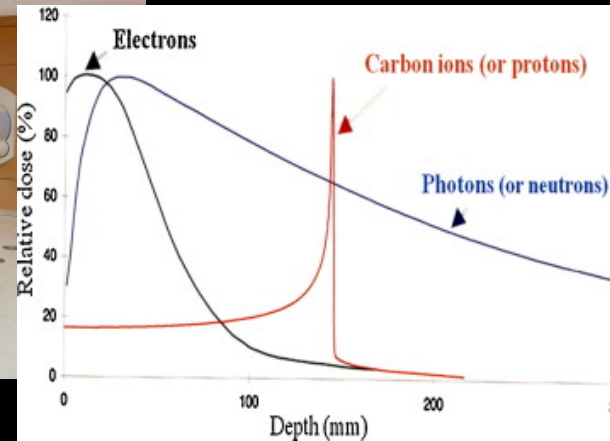
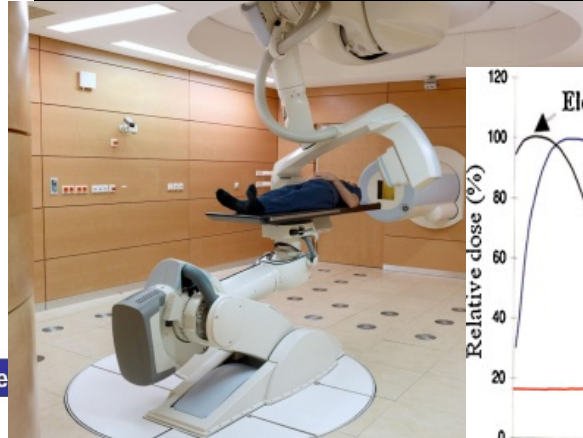
A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



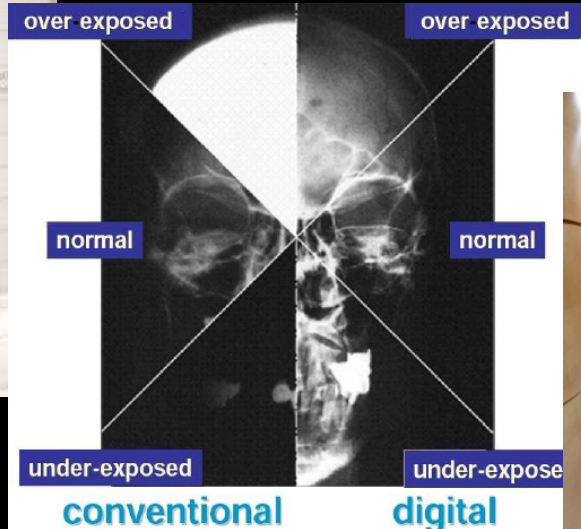
Running jobs: 246791
Transfer rate: 13.98 GiB/sec



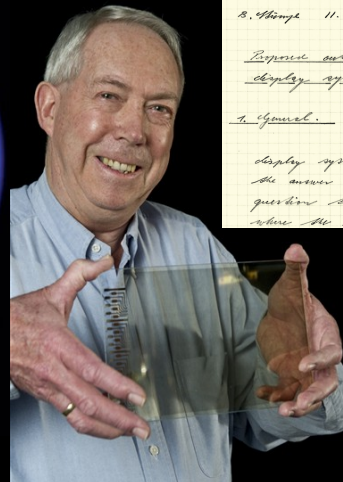
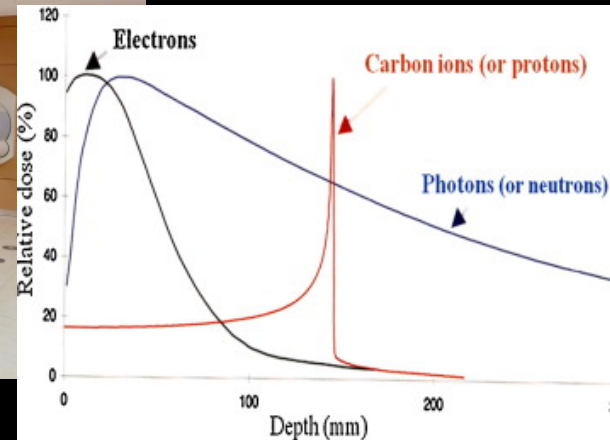
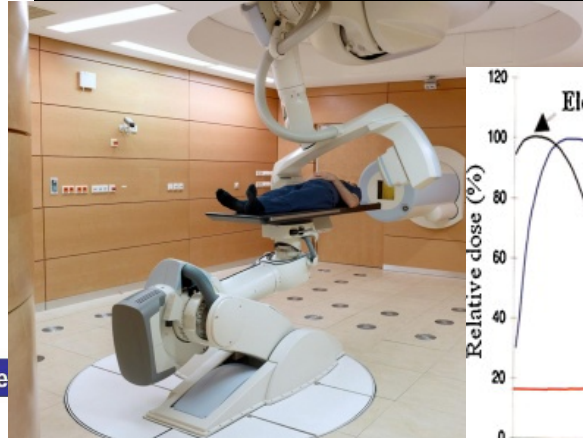
B. Thompson 11.03.1972 PAGE 7.
Propose outline for a fast interactive computer display system*
1. General:
nearly all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to



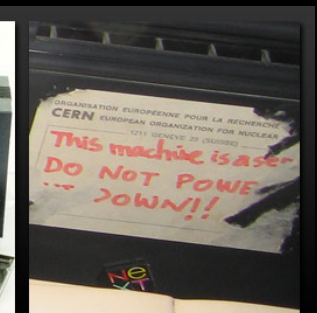
A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



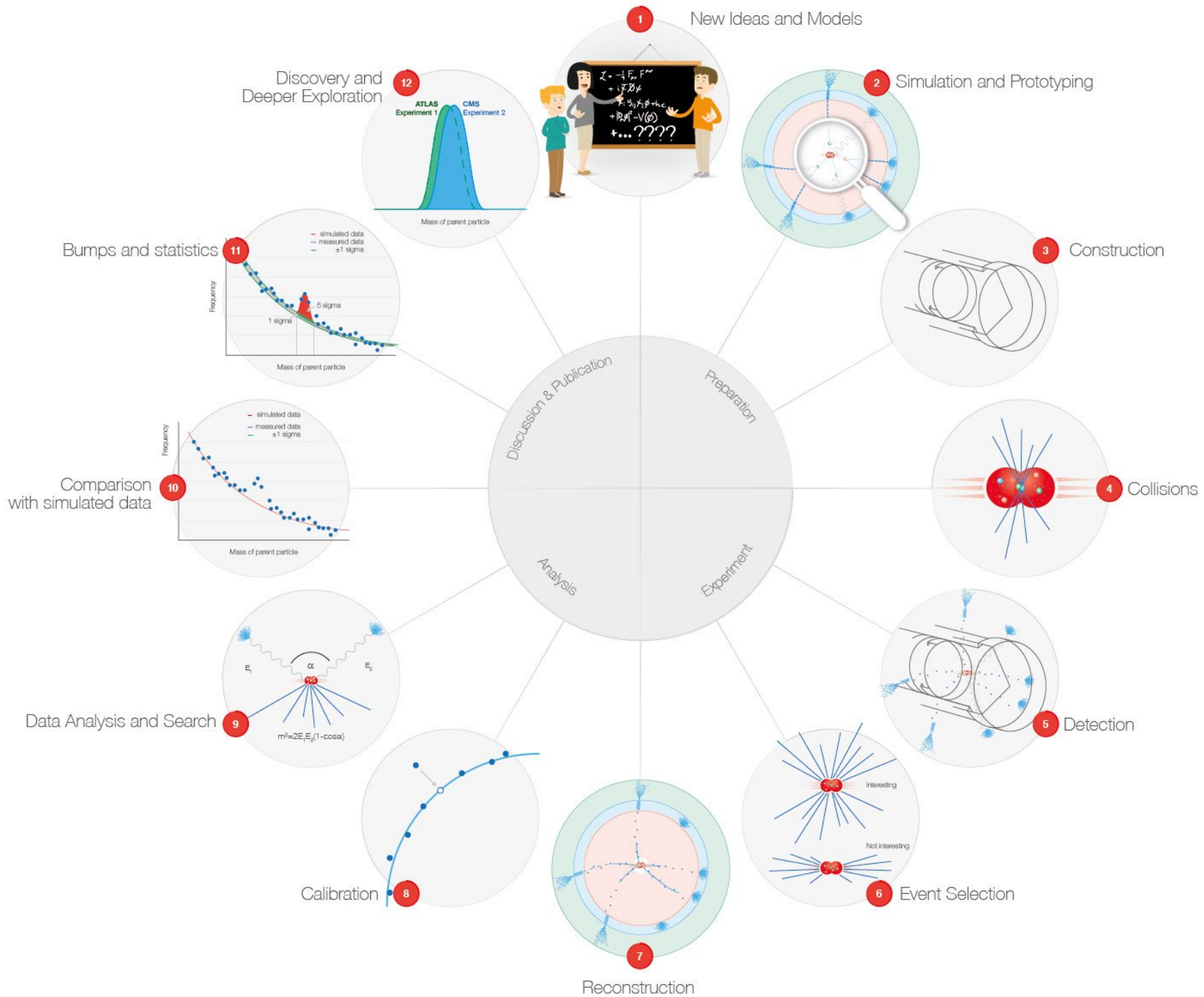
Running jobs: 246791
Transfer rate: 13.98 GiB/sec

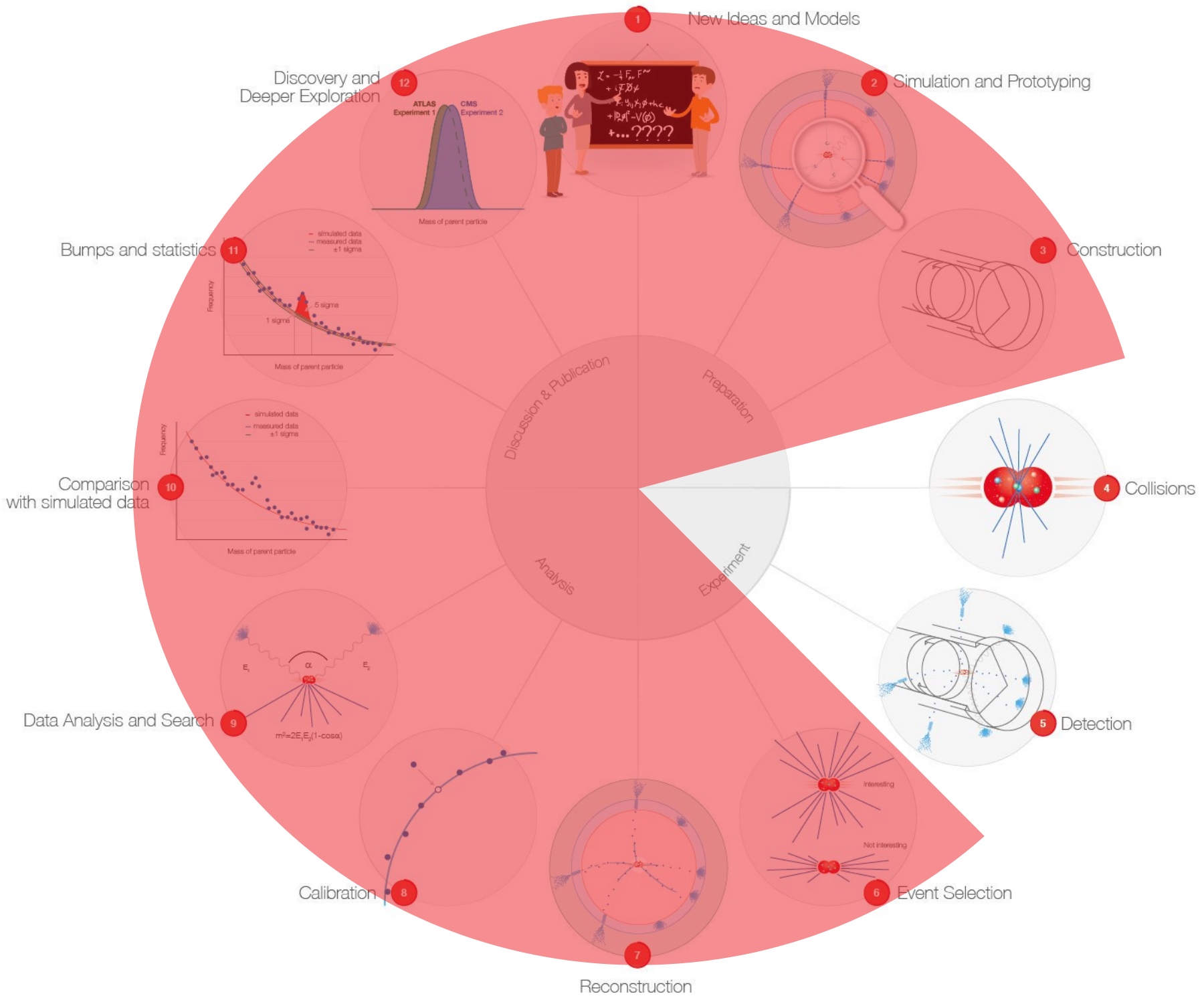


B. Thompson 11.03.1972 PAGE 7.
Expense outline for a fast interactive computer display system*
1. General: *... nearly all interactive display systems operate in a way where the answer to a given (and displayed) question takes place via a keyboard and from where the information is coded back to*

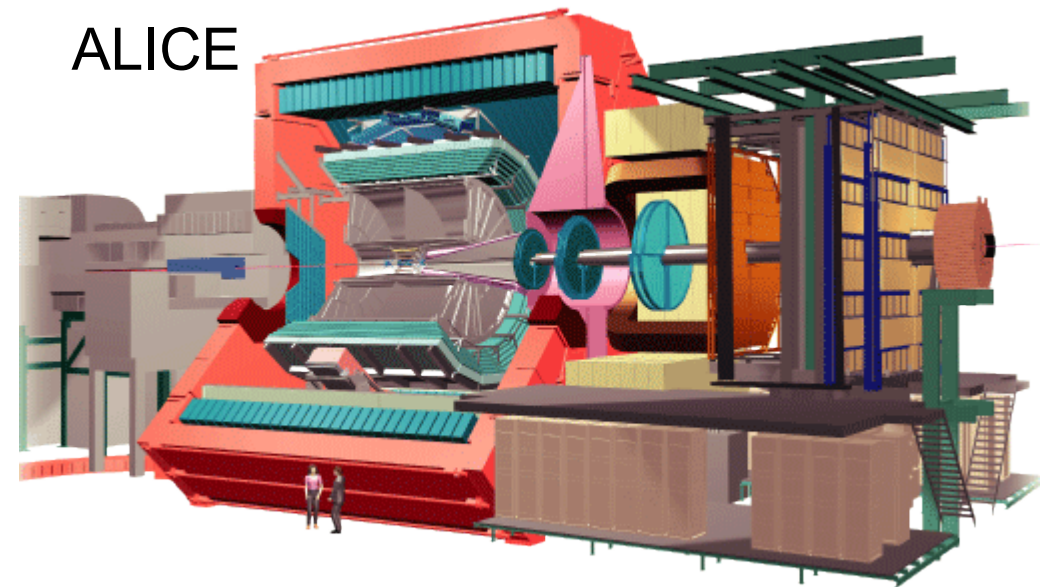
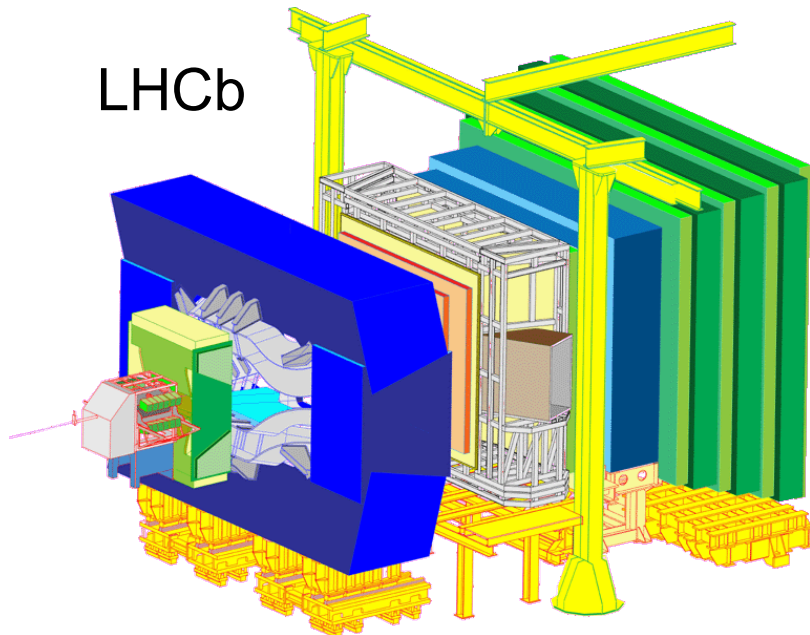
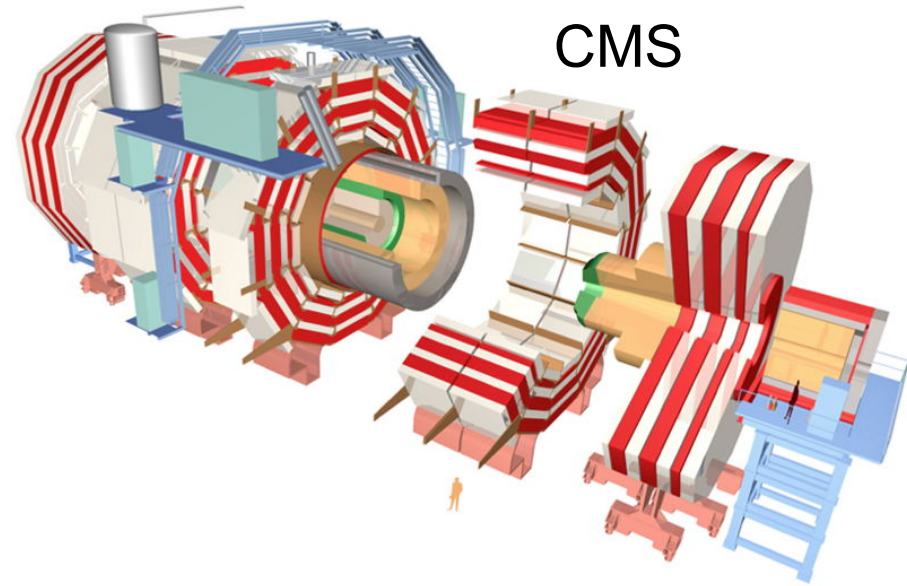
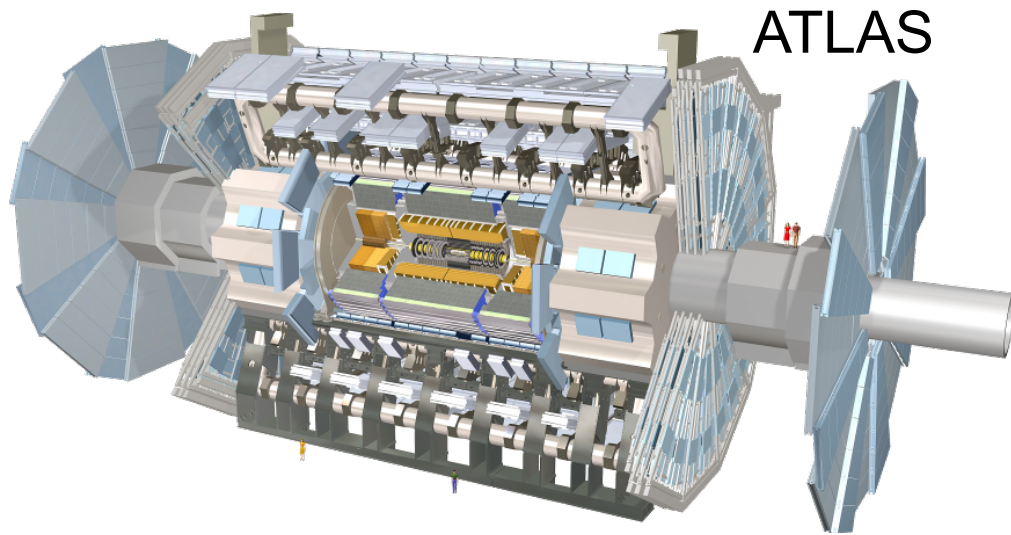


► **Le Web a été inventé au CERN !**

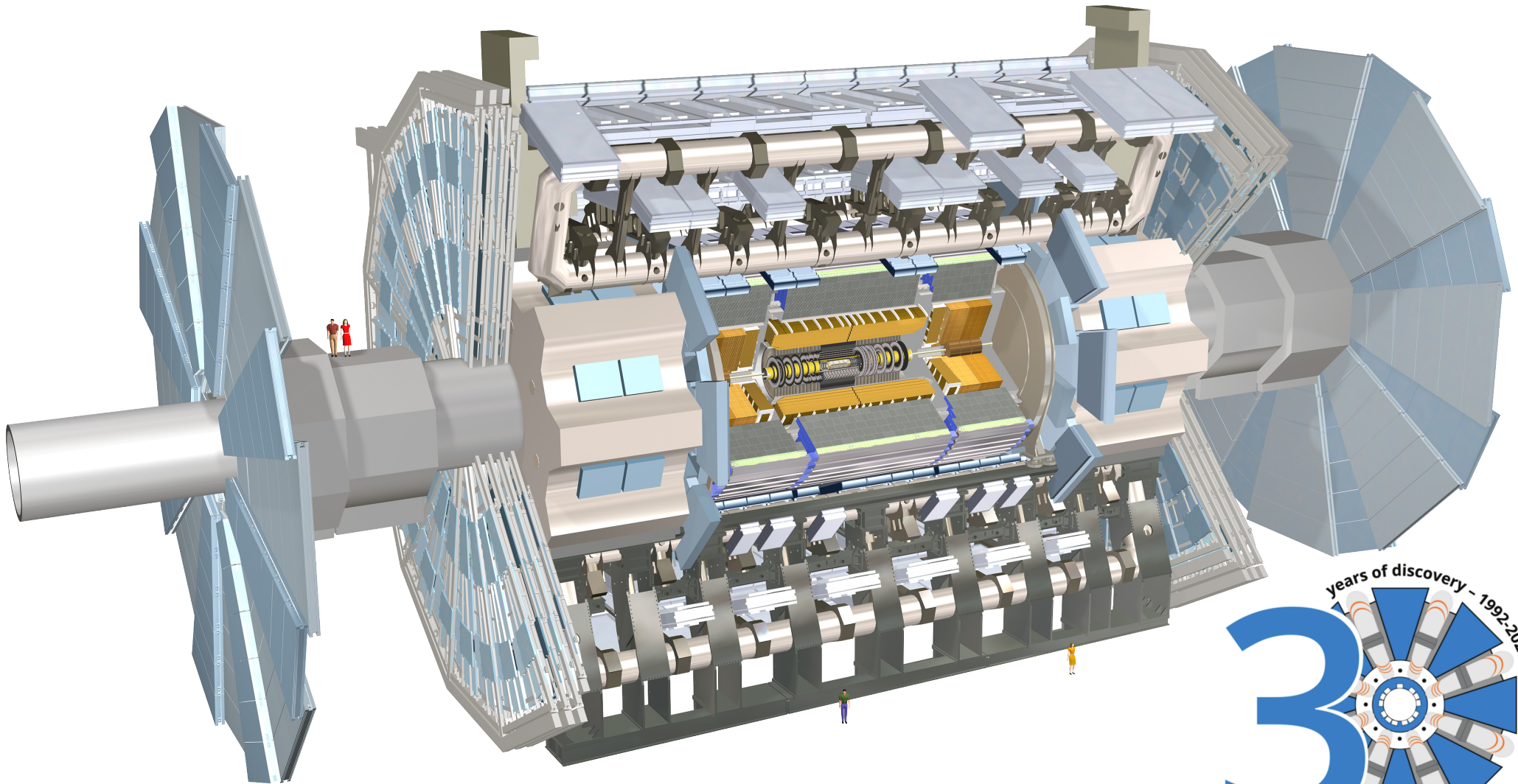




Les détecteurs géants du LHC



Le détecteur ATLAS



La collaboration ATLAS

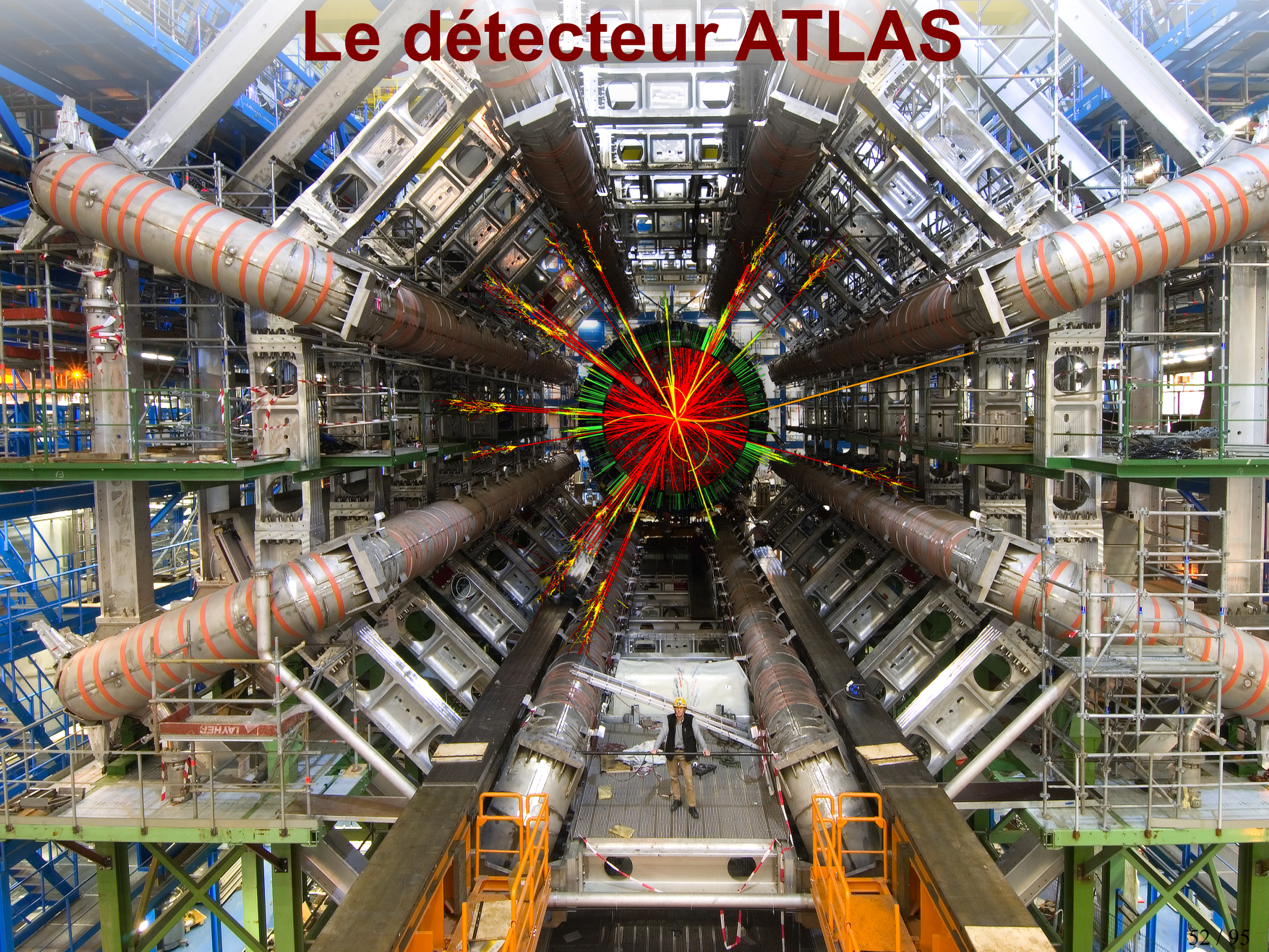


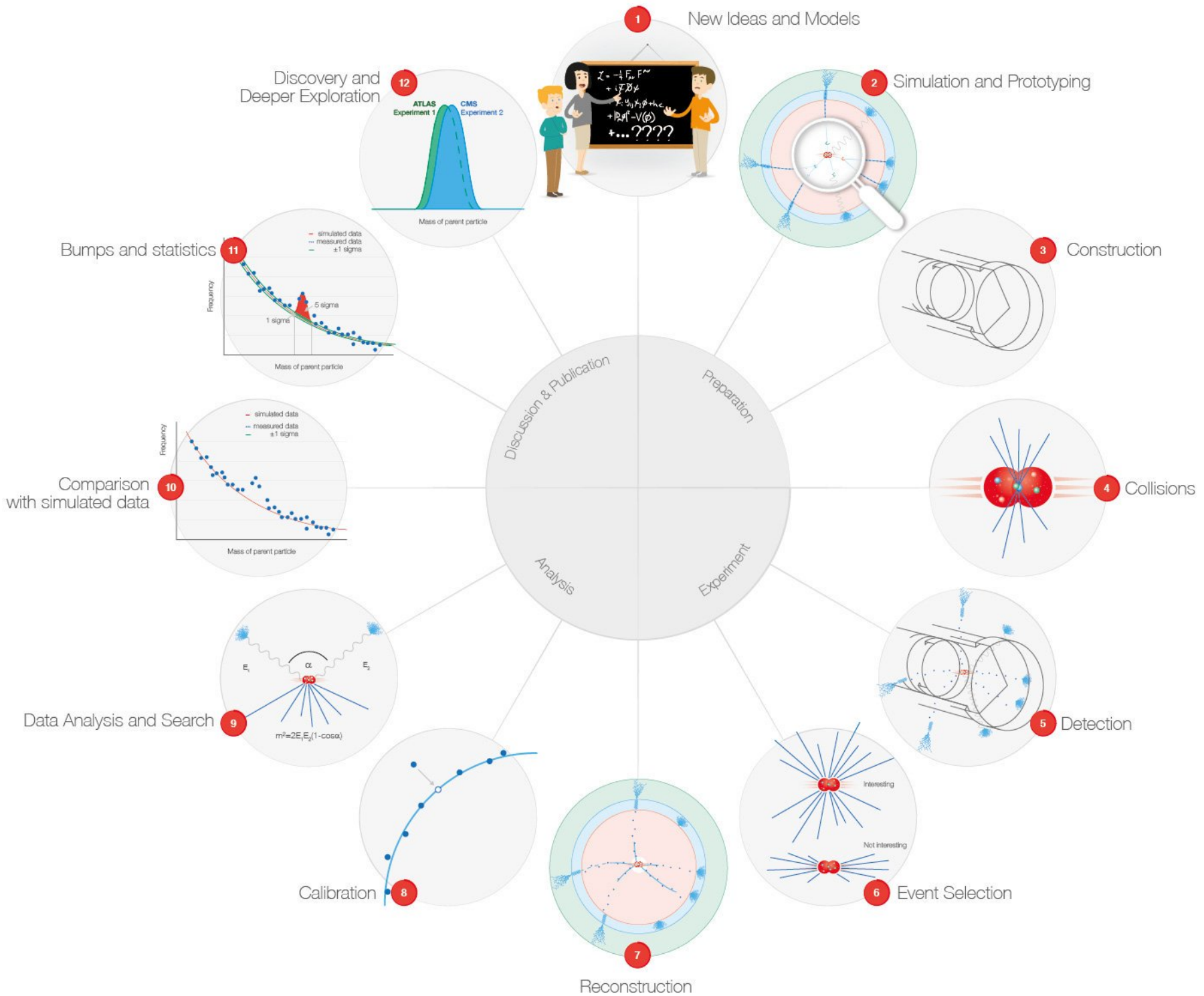
40 pays
236 instituts
2900 scientifiques

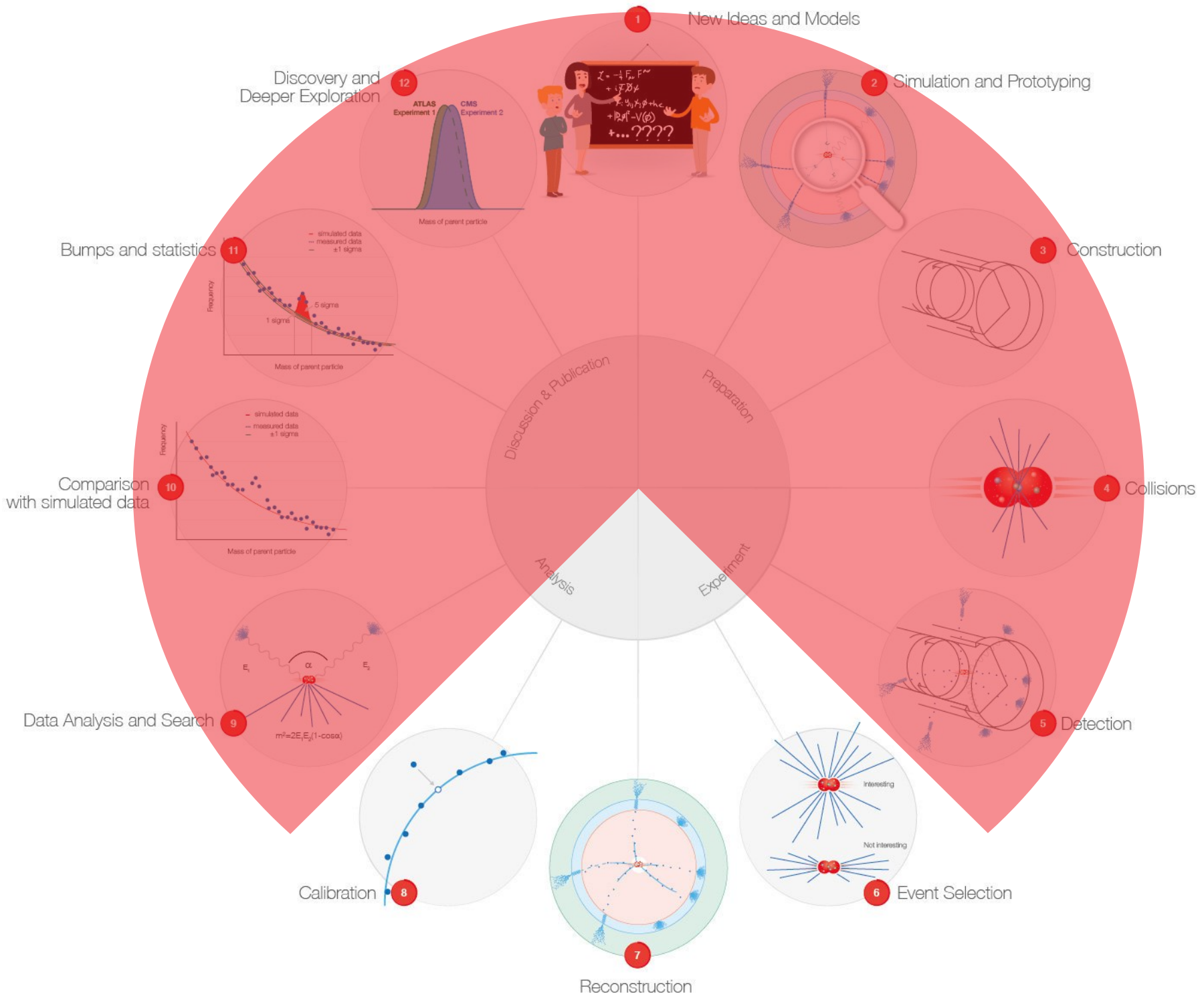
<https://atlas.cern>



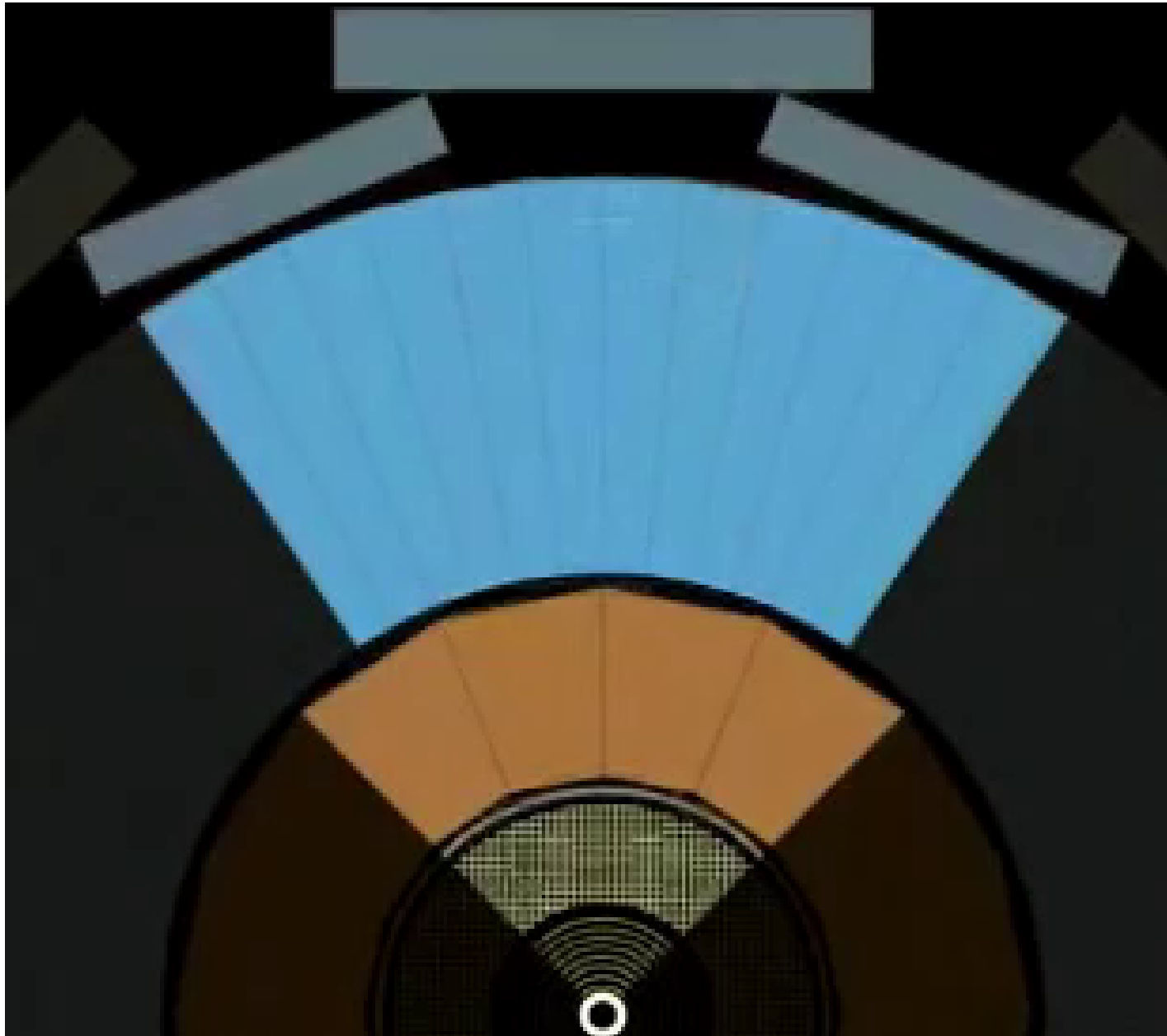
Le détecteur ATLAS







Interaction des particules avec le détecteur

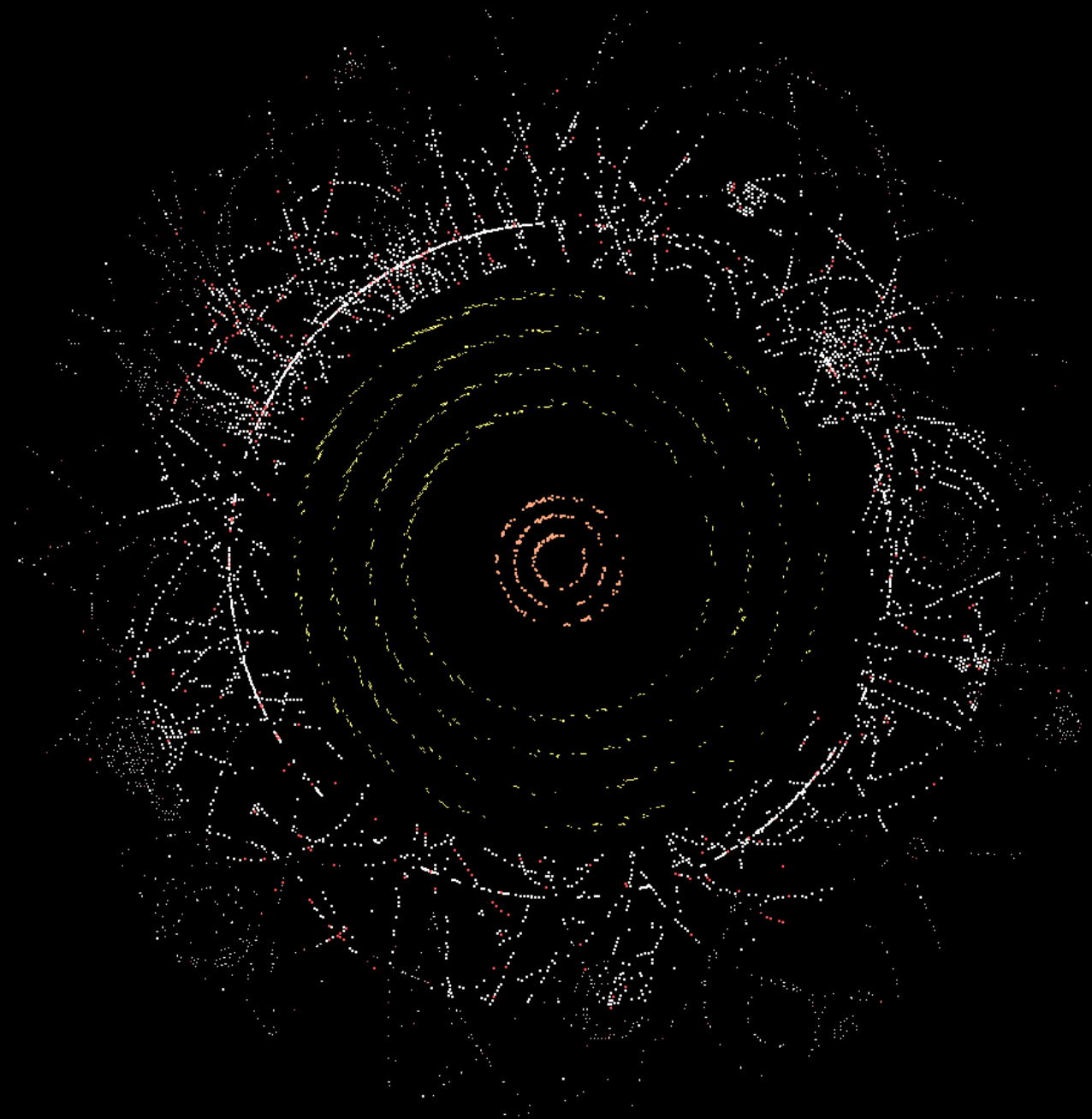


Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



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

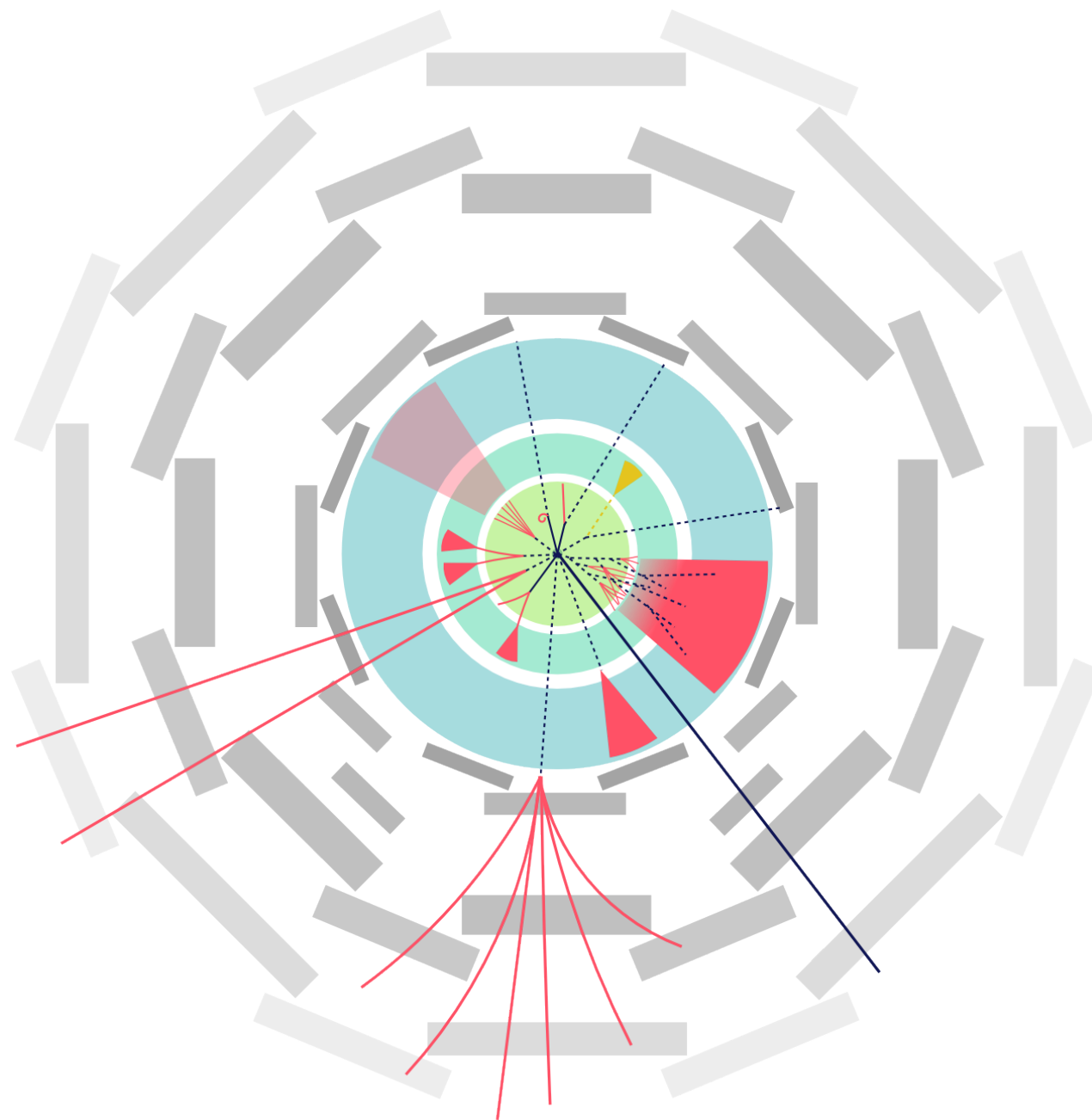
Passage des particules

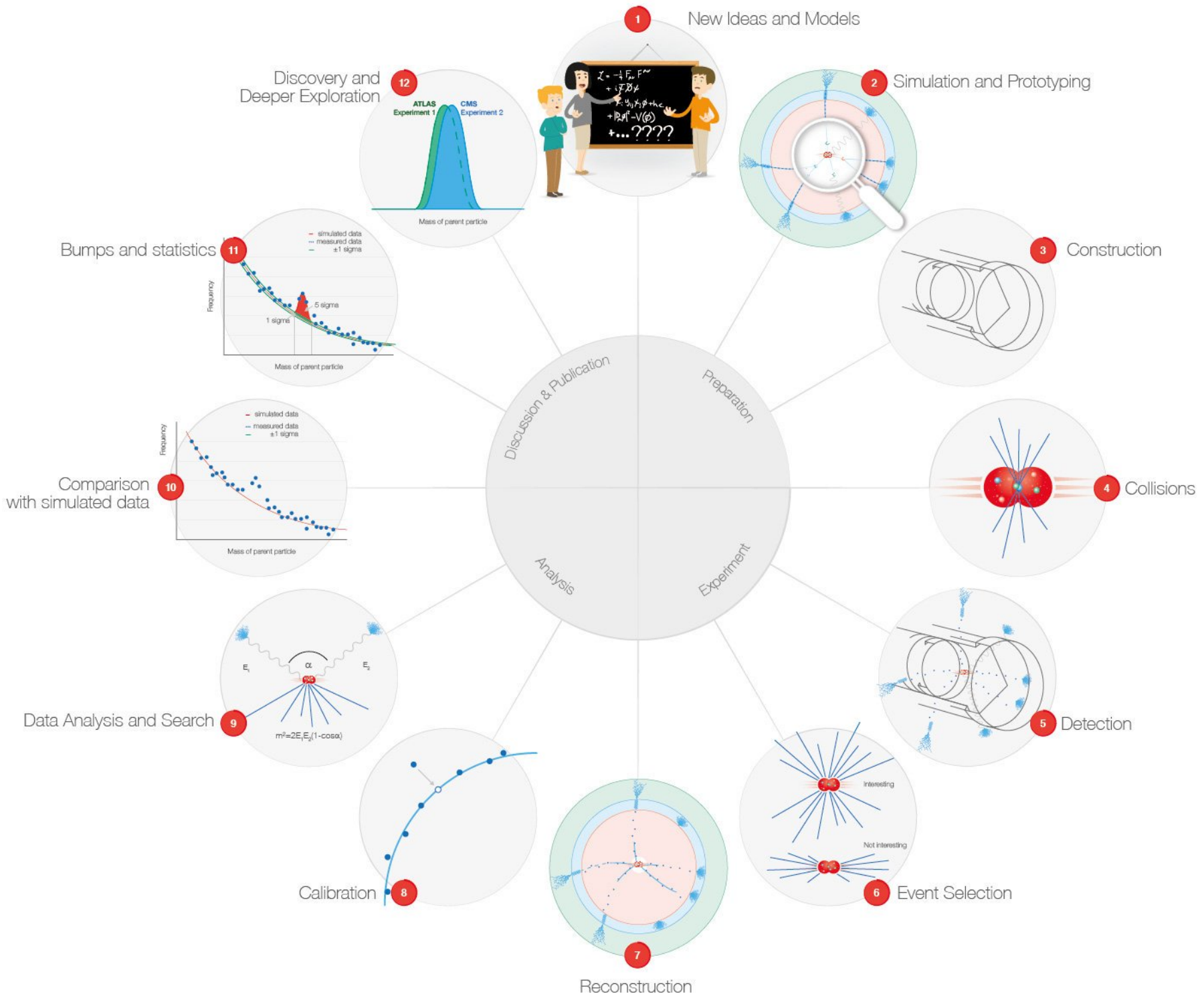


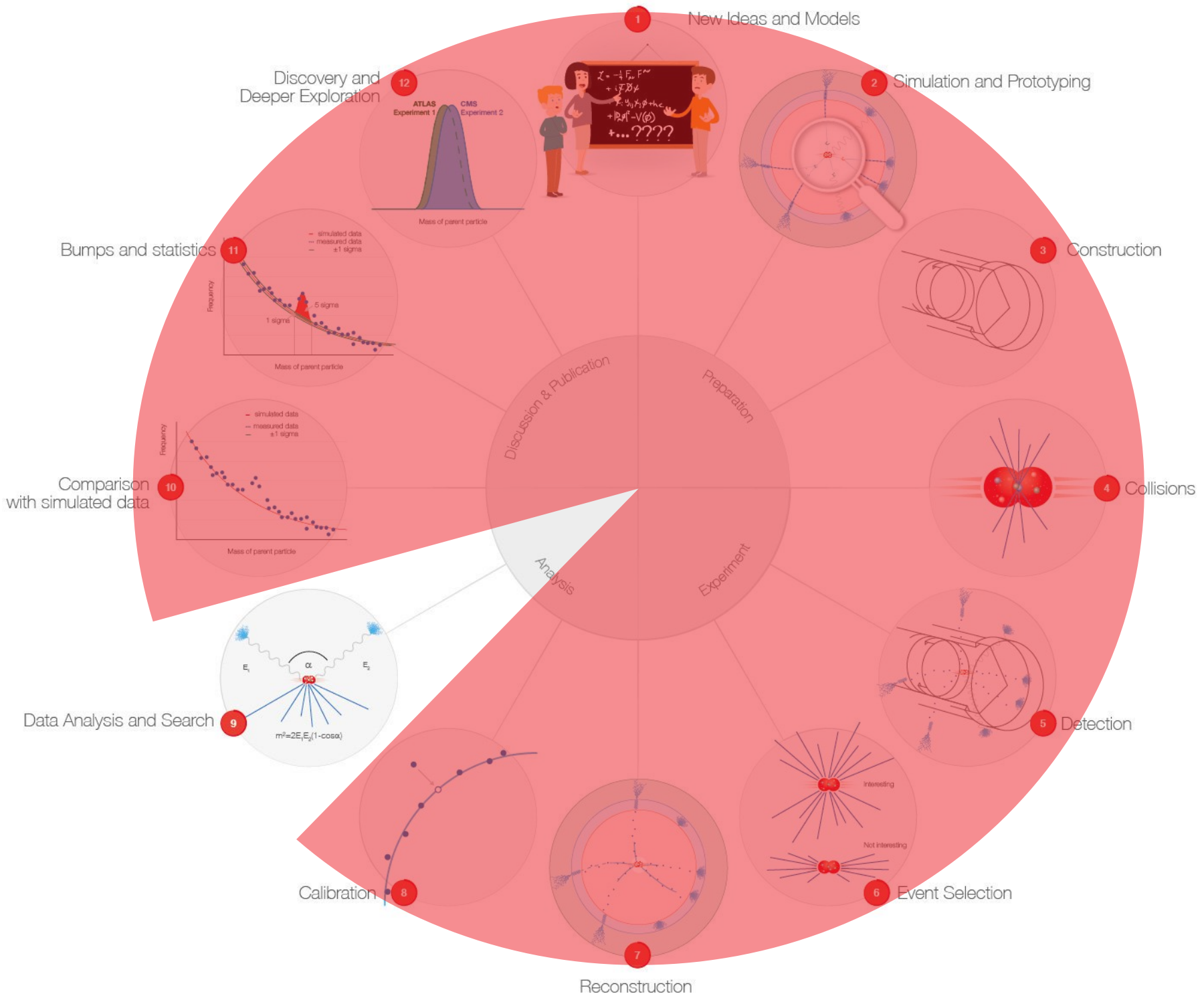
Reconstruction des trajectoires



Variété d'objets



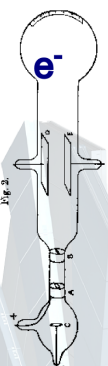




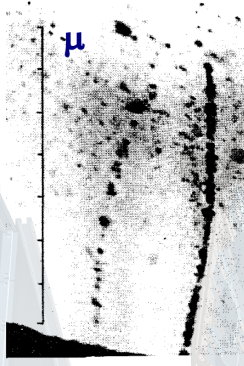
Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

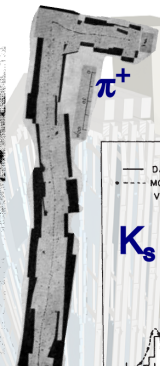
Découverte historique



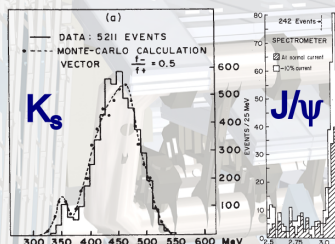
1897



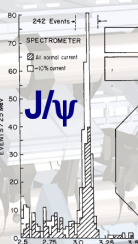
1937



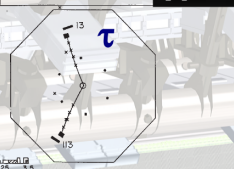
1947



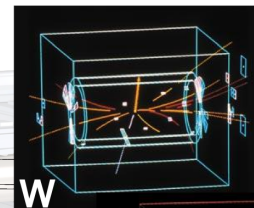
1964



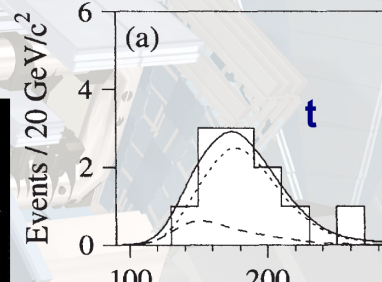
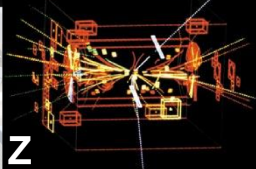
1974



1976



1983

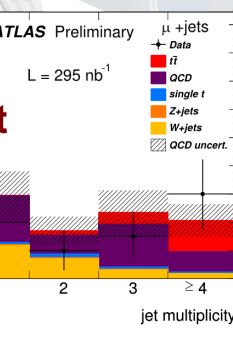
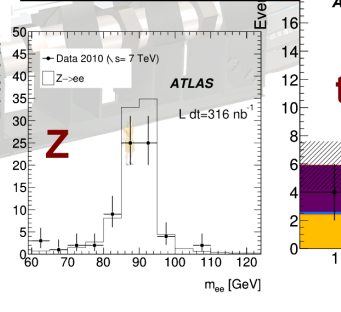
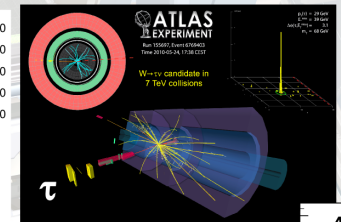
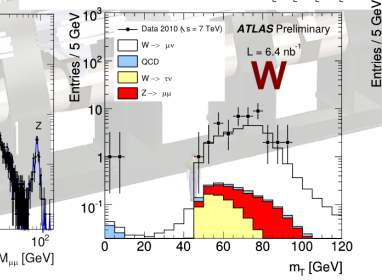
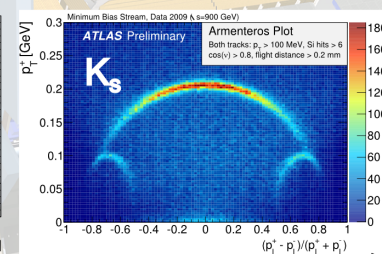
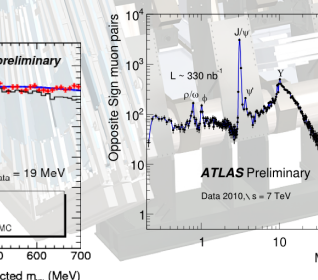
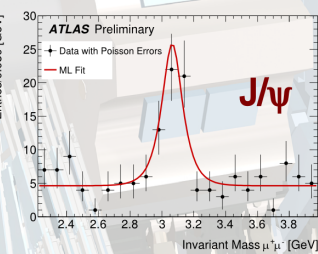
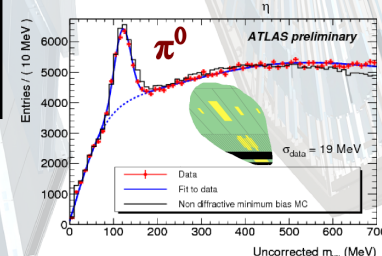
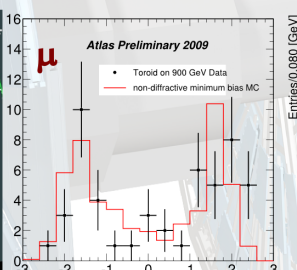
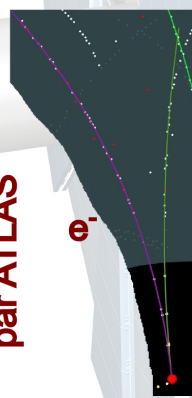


1995

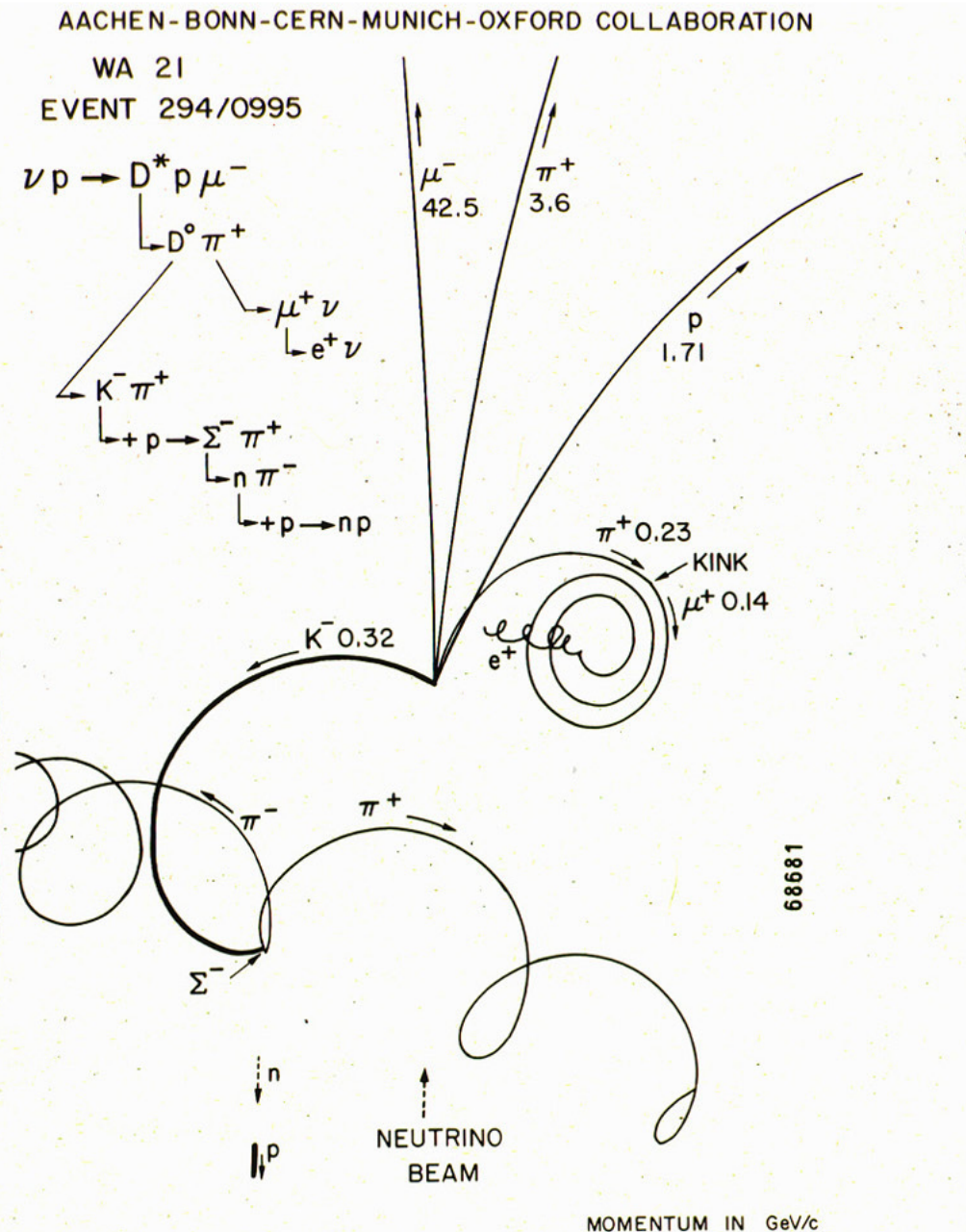
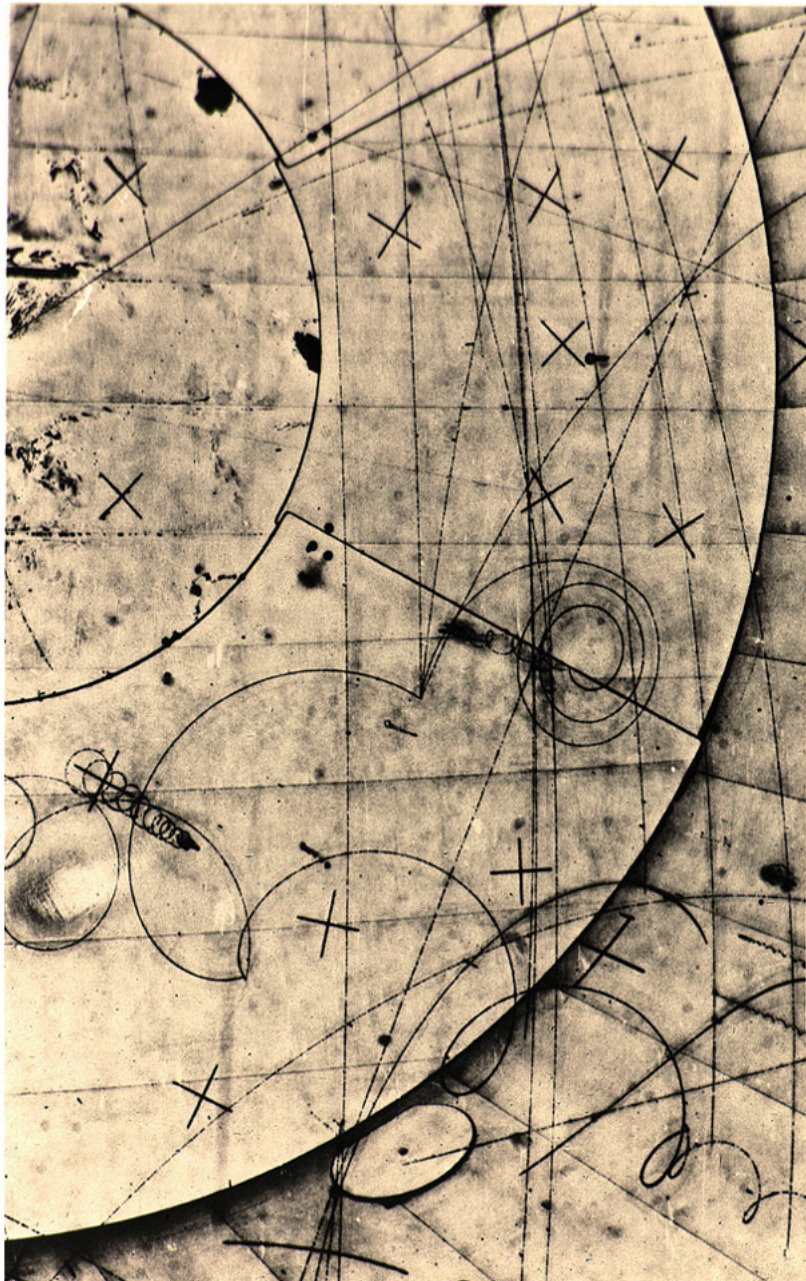
déc 2009

août 2010

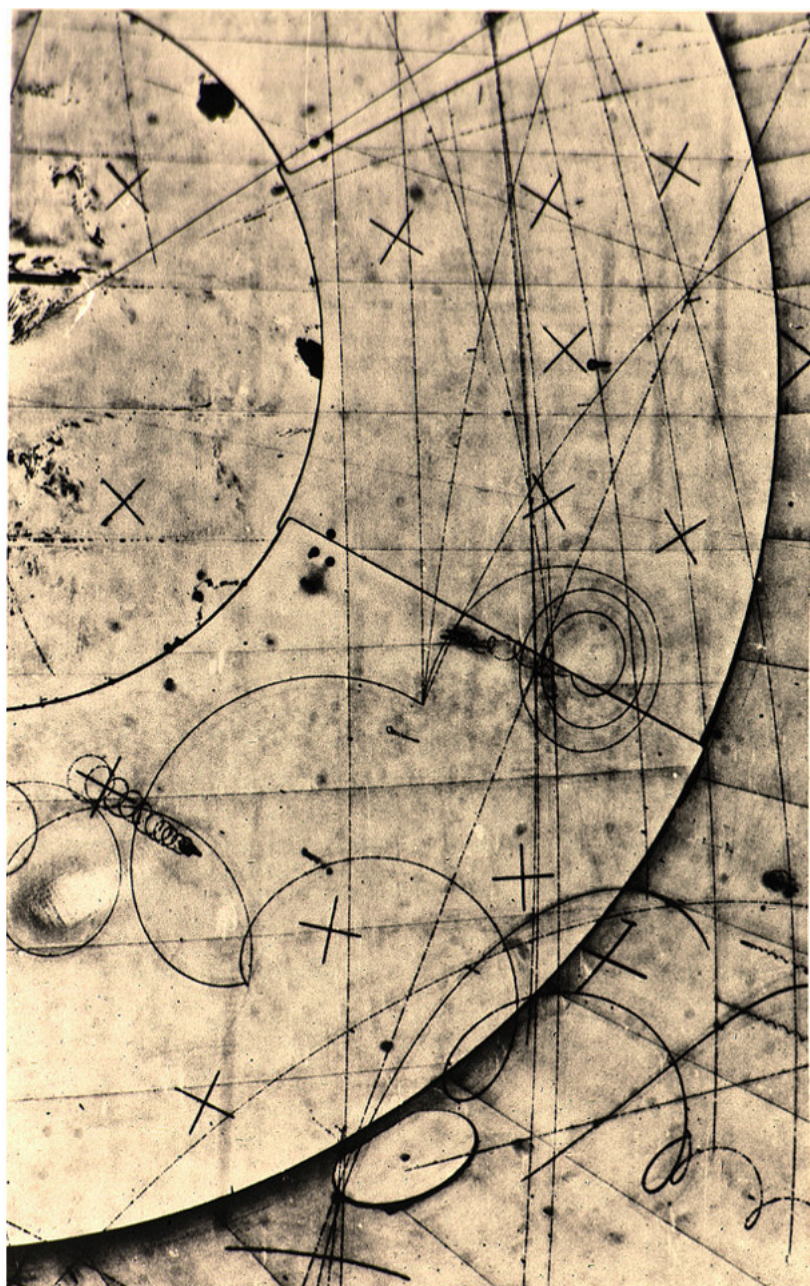
Redécouverte par ATLAS



« Vraies » photographies



« Vraies » photographies



AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION

EVE
 νp



KINK

.14



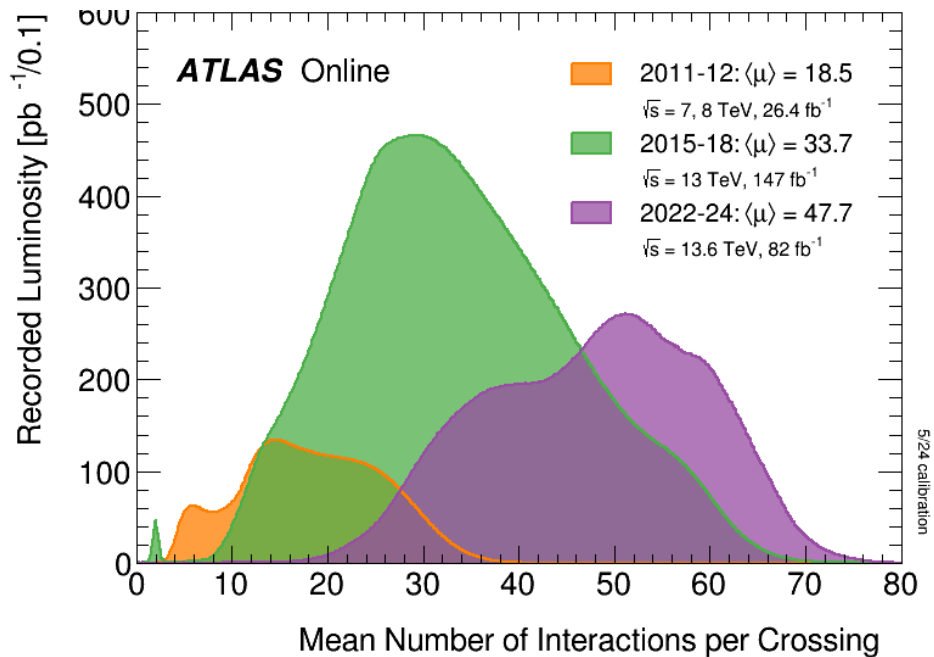
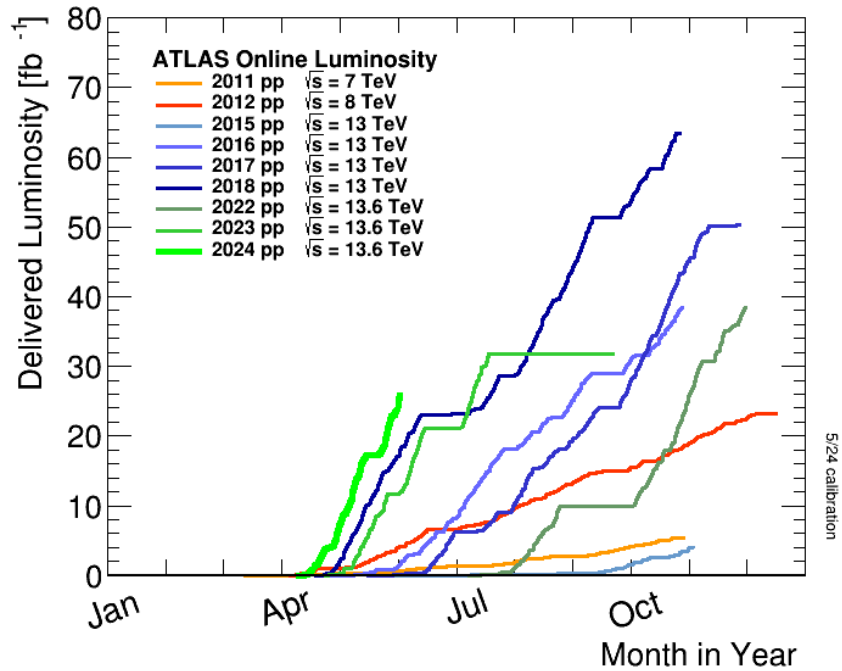
68681

n
 p

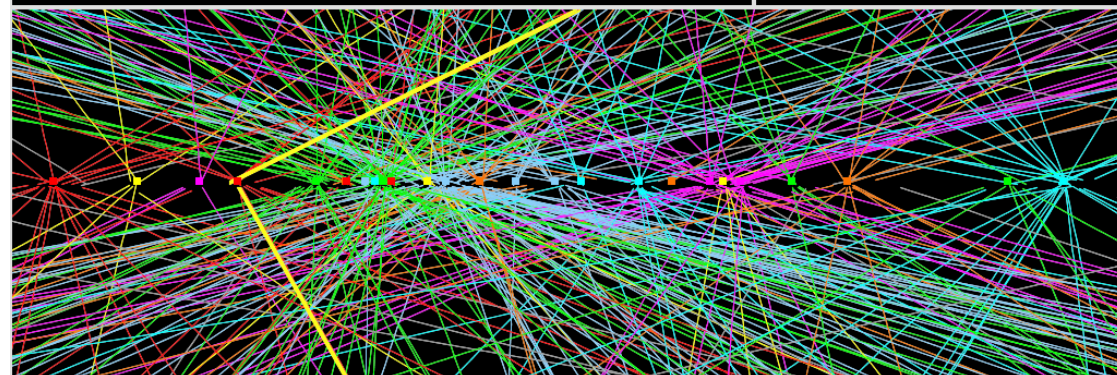
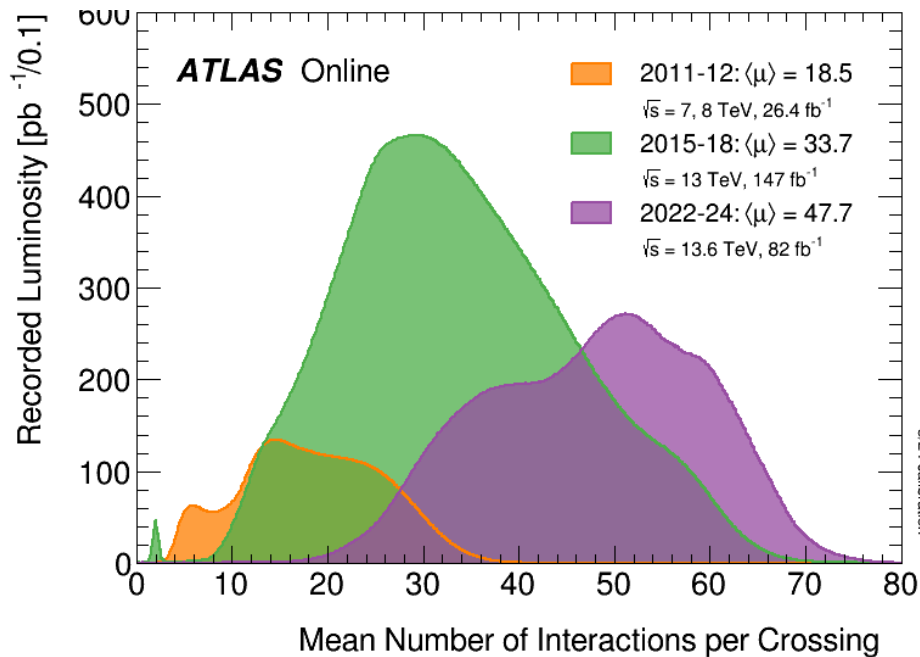
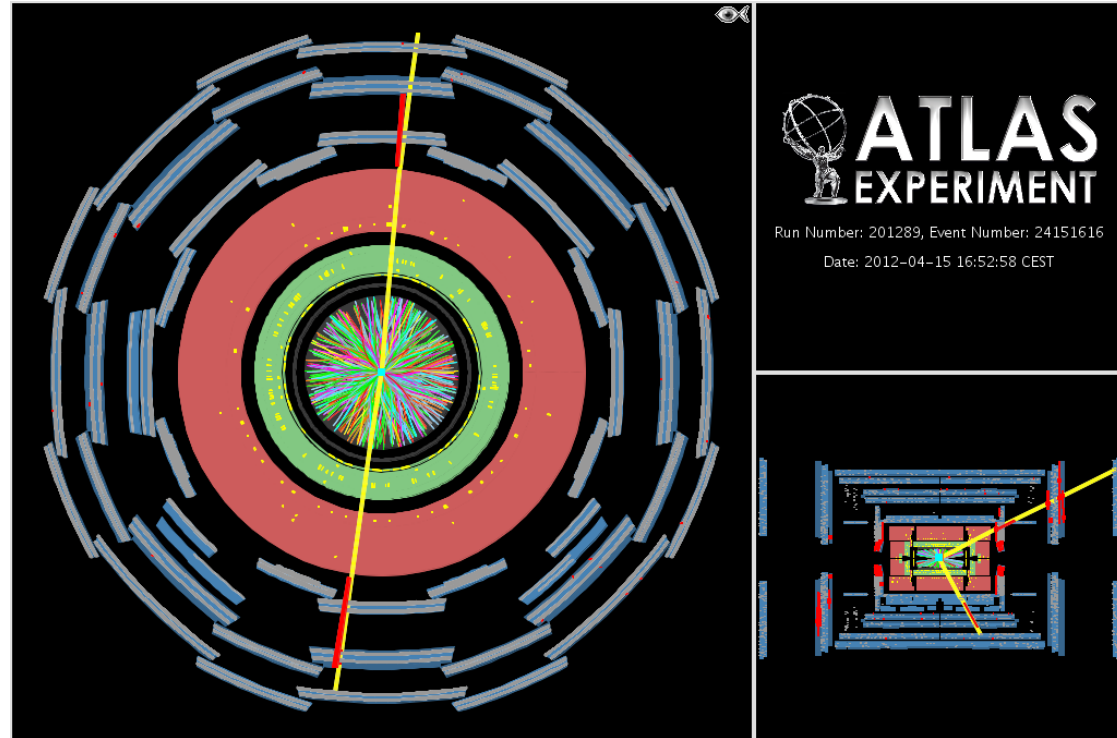
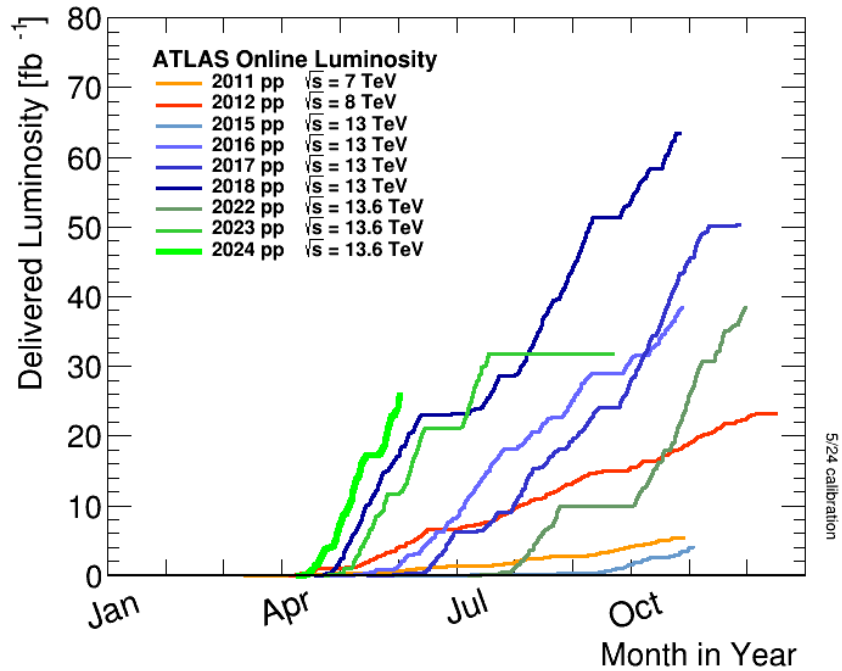
NEUTRINO
BEAM

MOMENTUM IN GeV/c

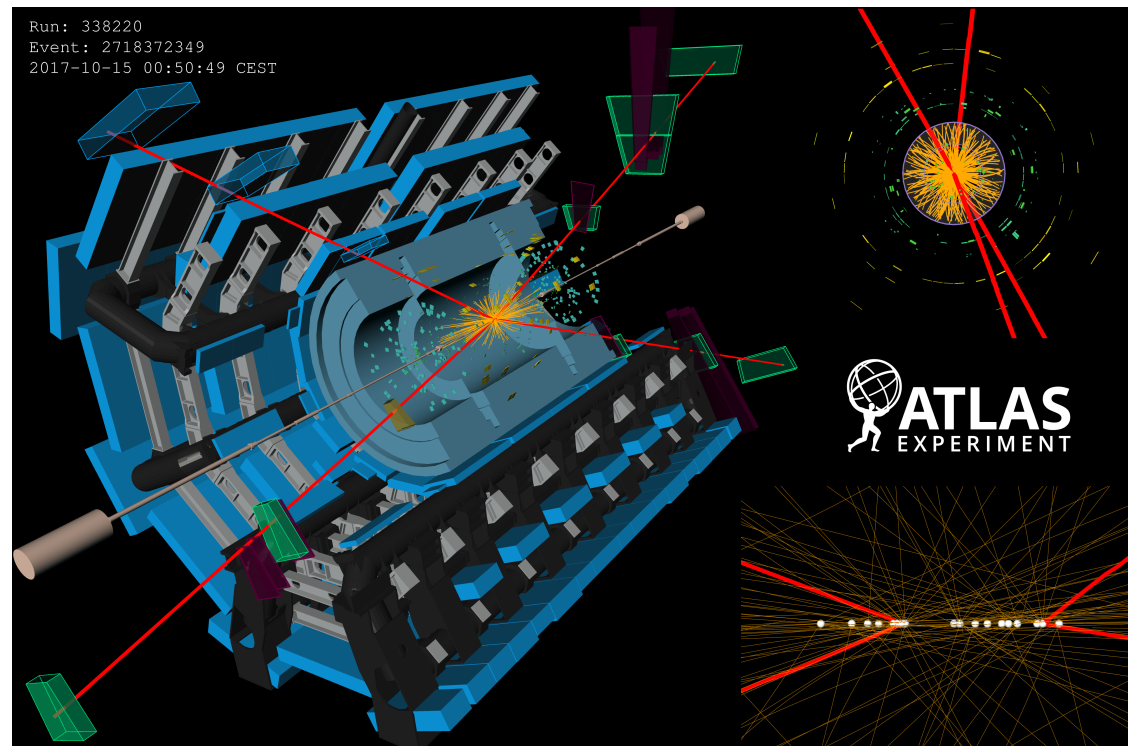
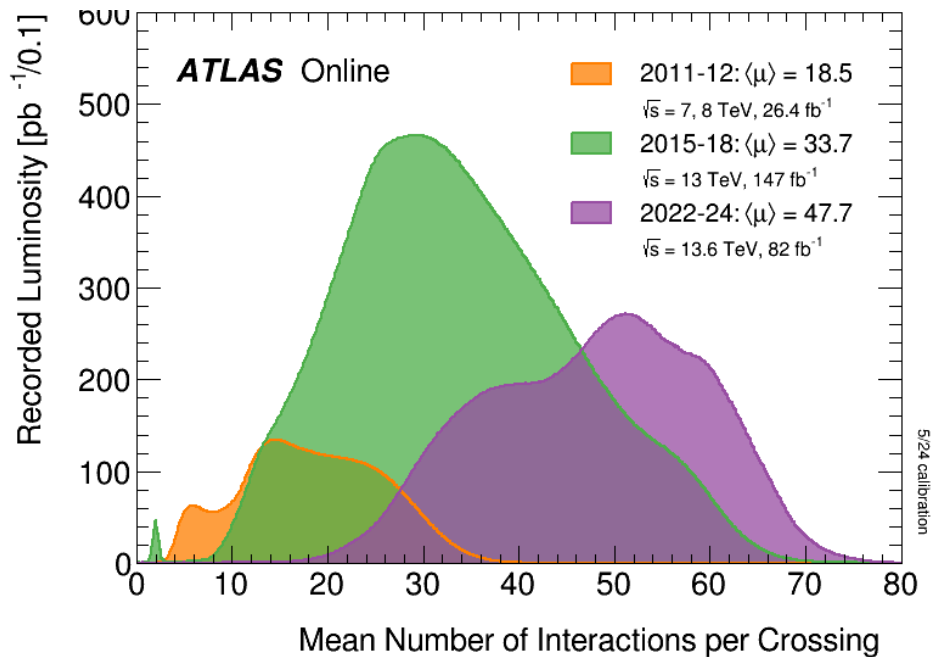
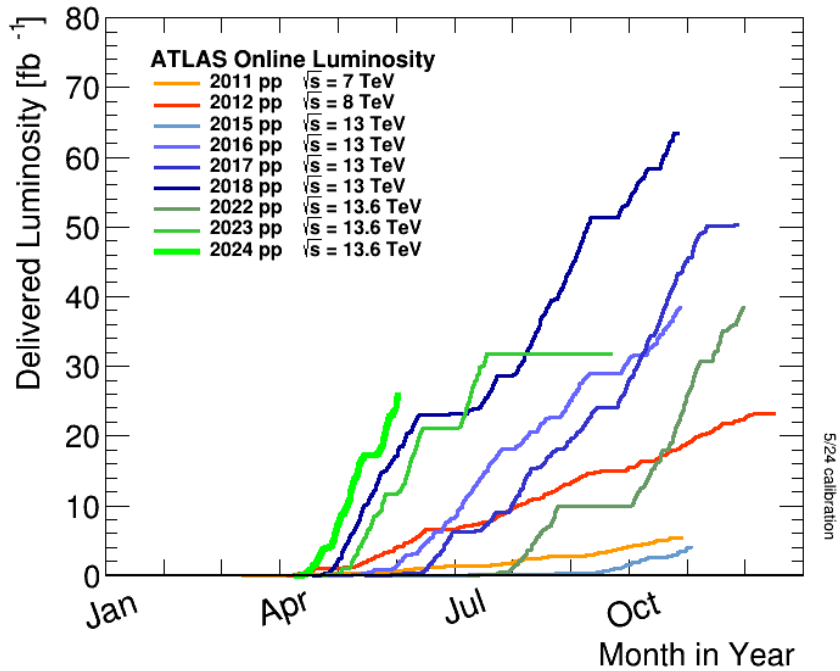
Accumulation des données



Accumulation des données



Accumulation des données



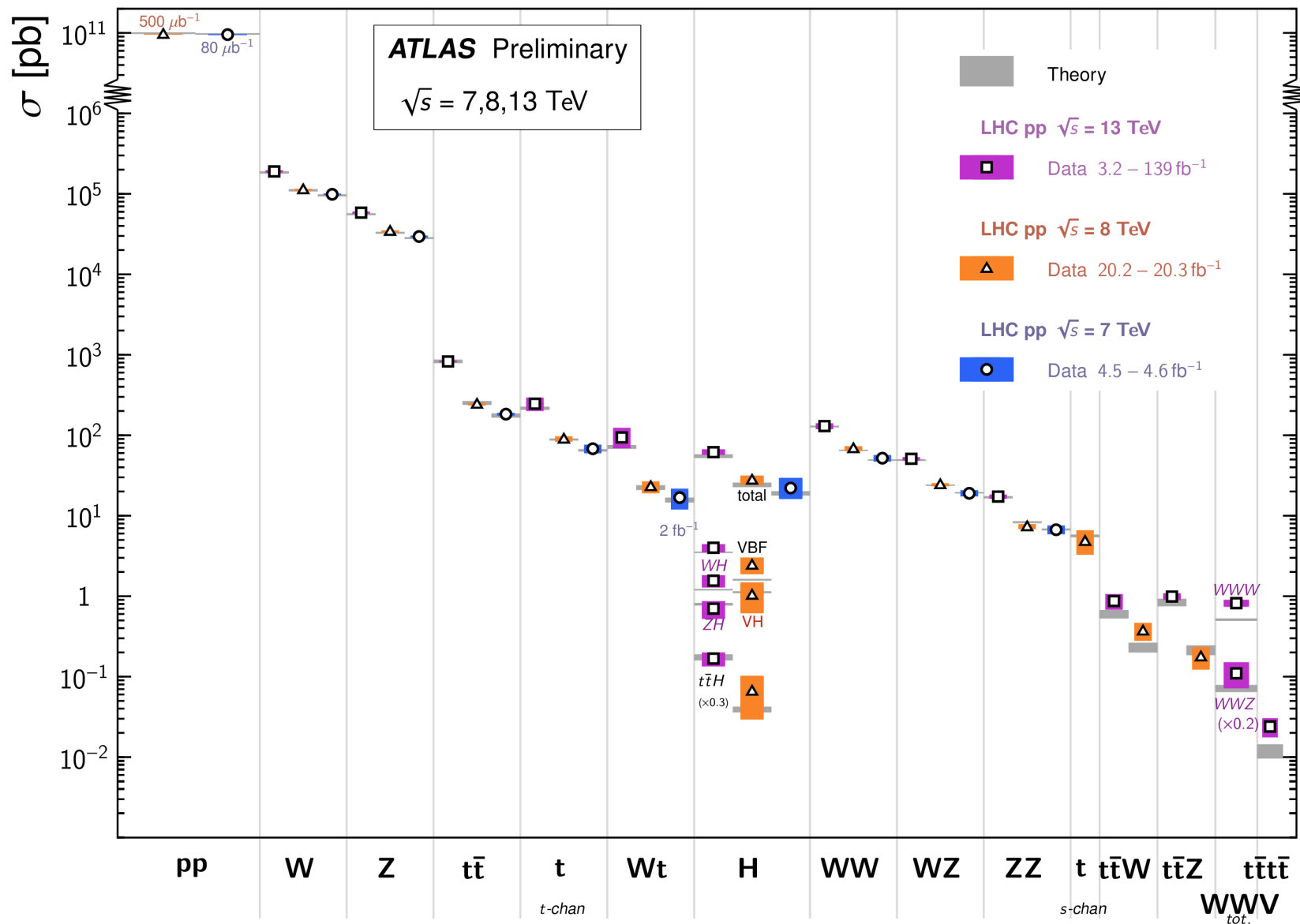


Accélérateur de science

Modèle standard : état des lieux

Standard Model Total Production Cross Section Measurements

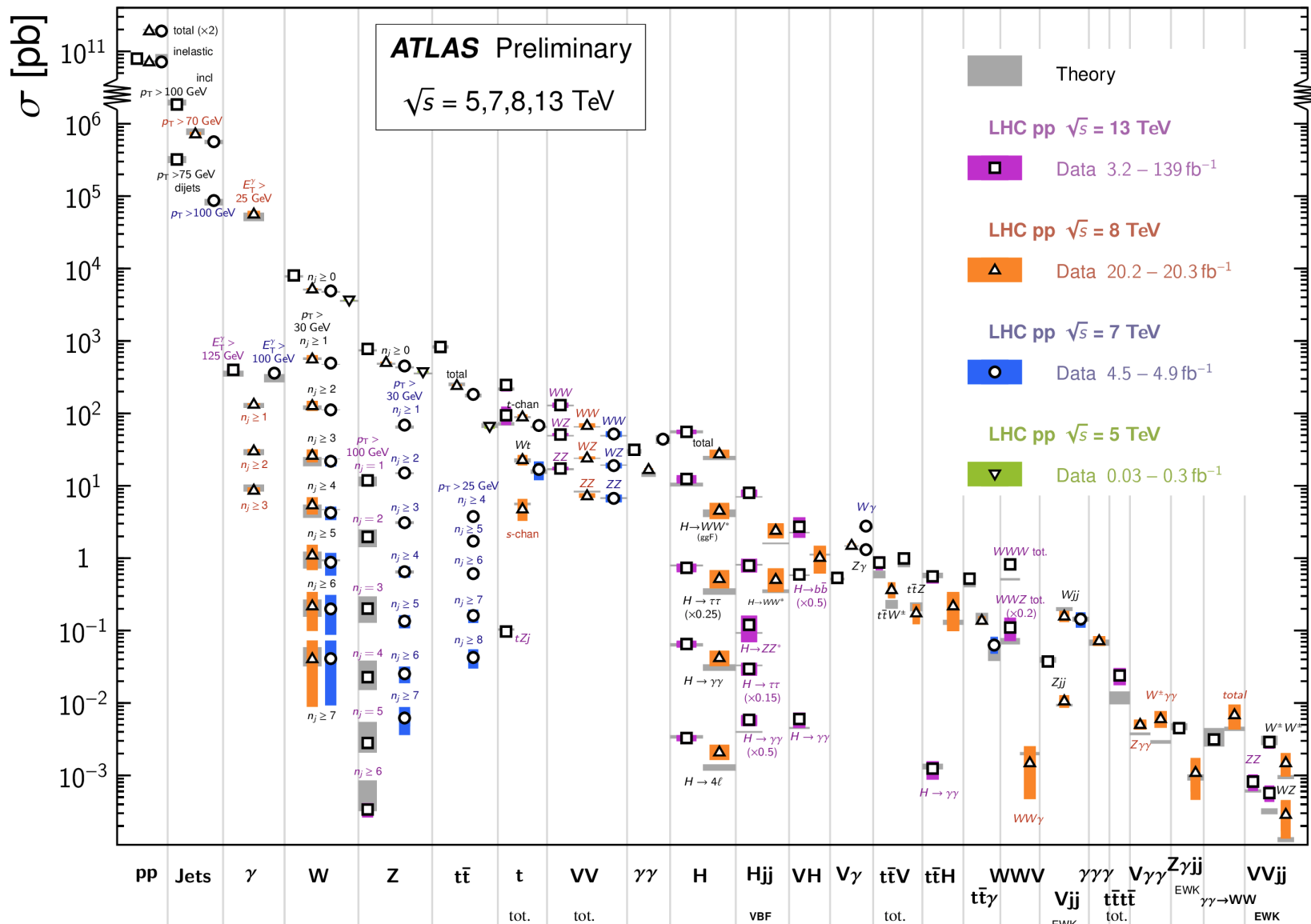
Status: February 2022

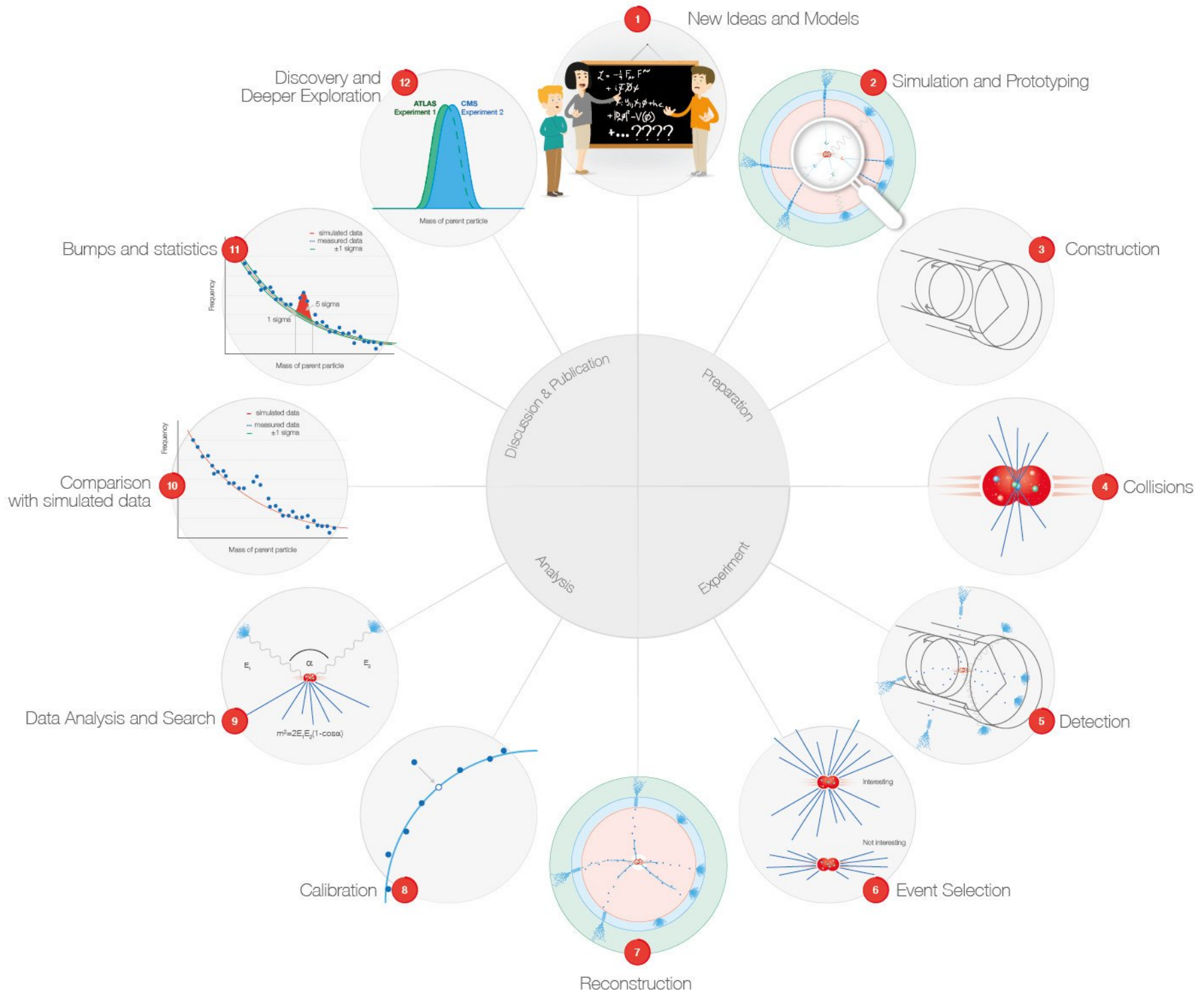


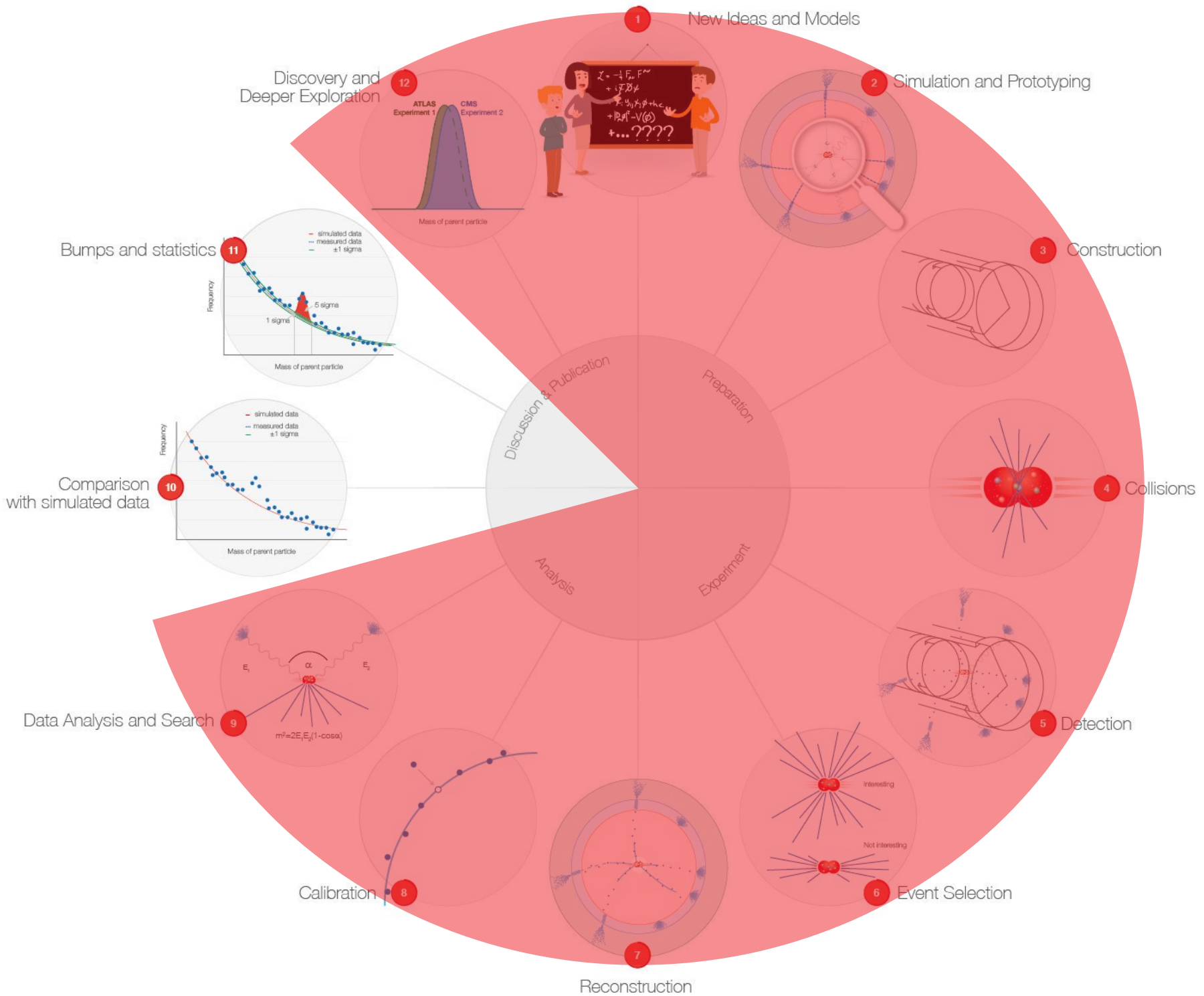
Modèle standard : état des lieux

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: February 2022







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

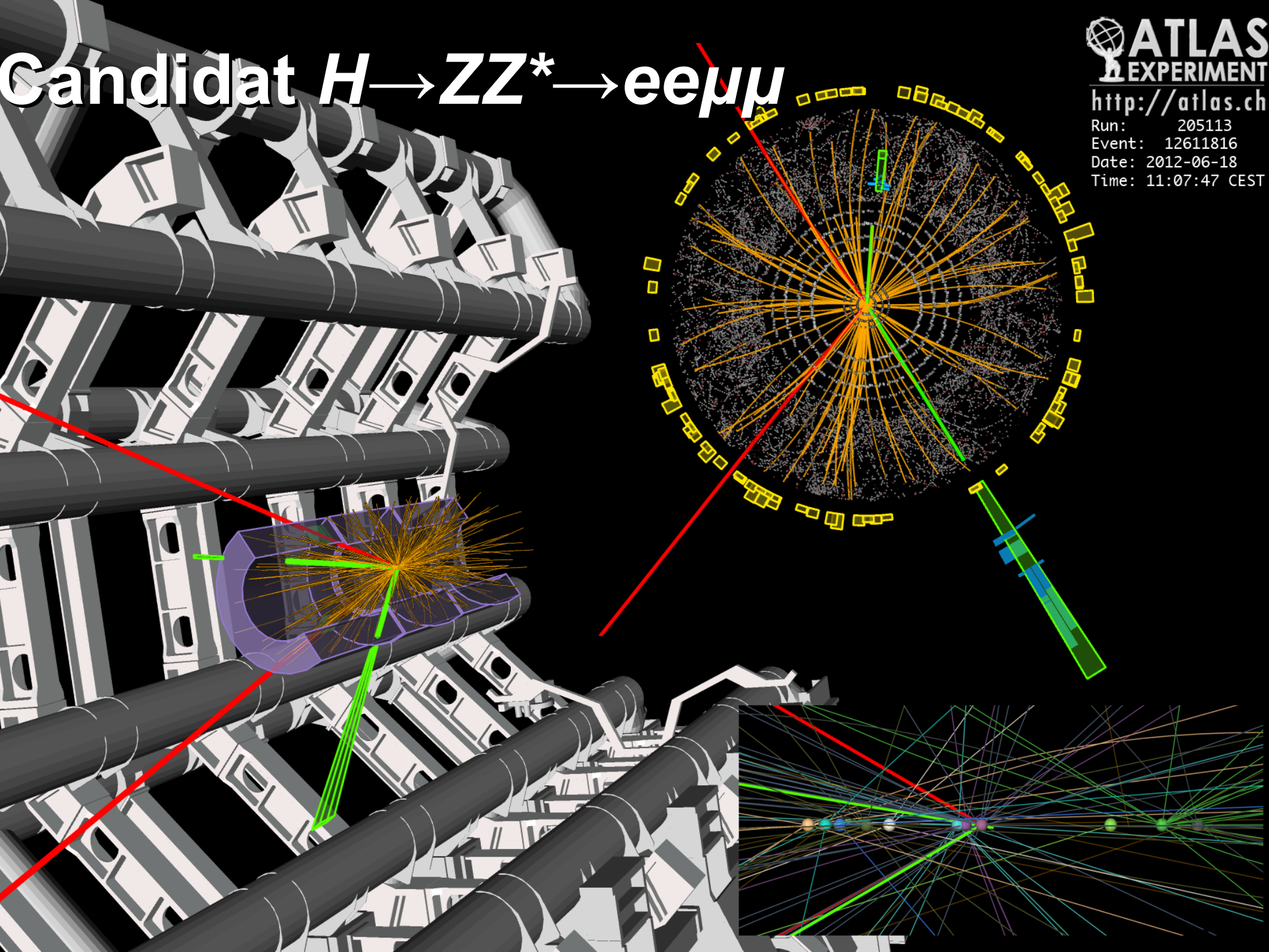
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, très difficiles à différencier de ce que l'on cherche
- Une aiguille dans une botte d'aiguilles



Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

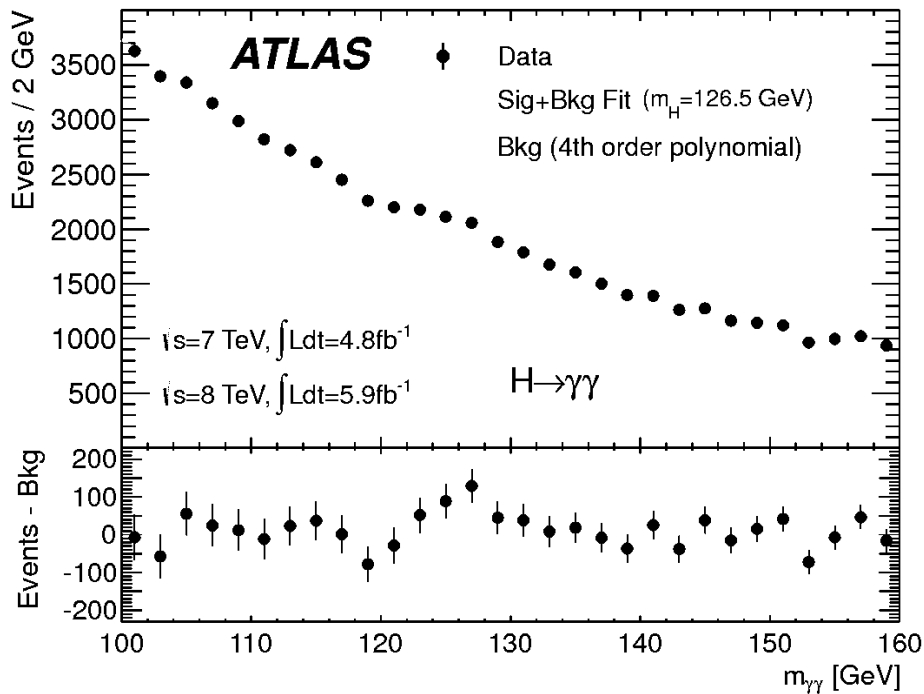


Candidate $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$



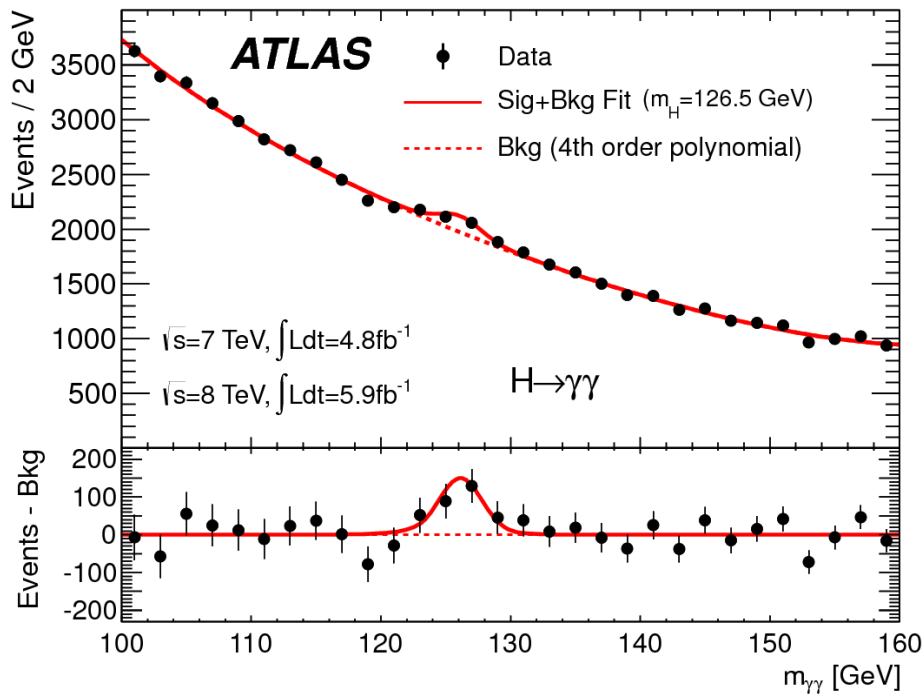
Mesure

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



Mesure

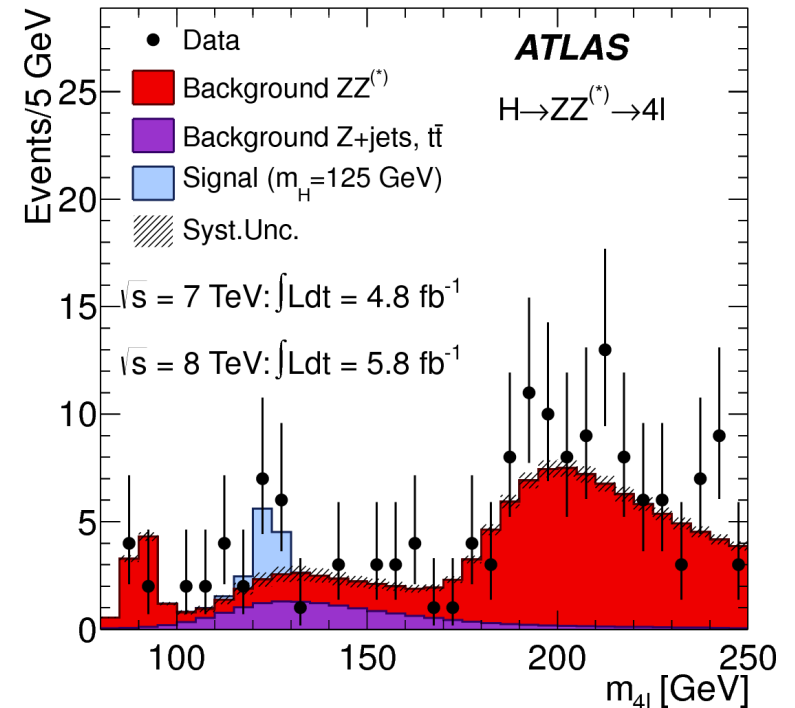
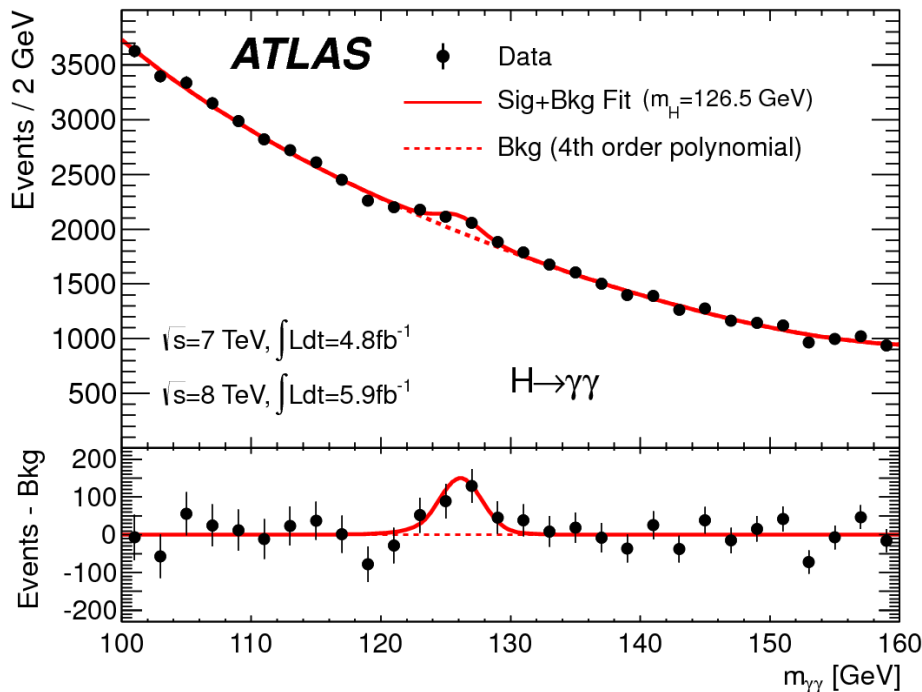
- Higgs en 2 photons
 - ▶ Bruit de fond important
 - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



Mesure

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

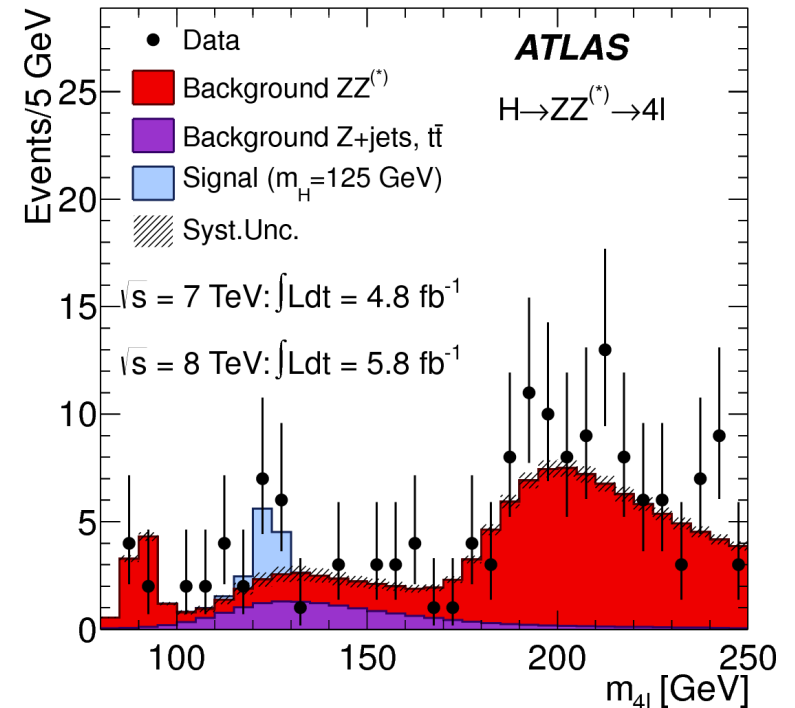
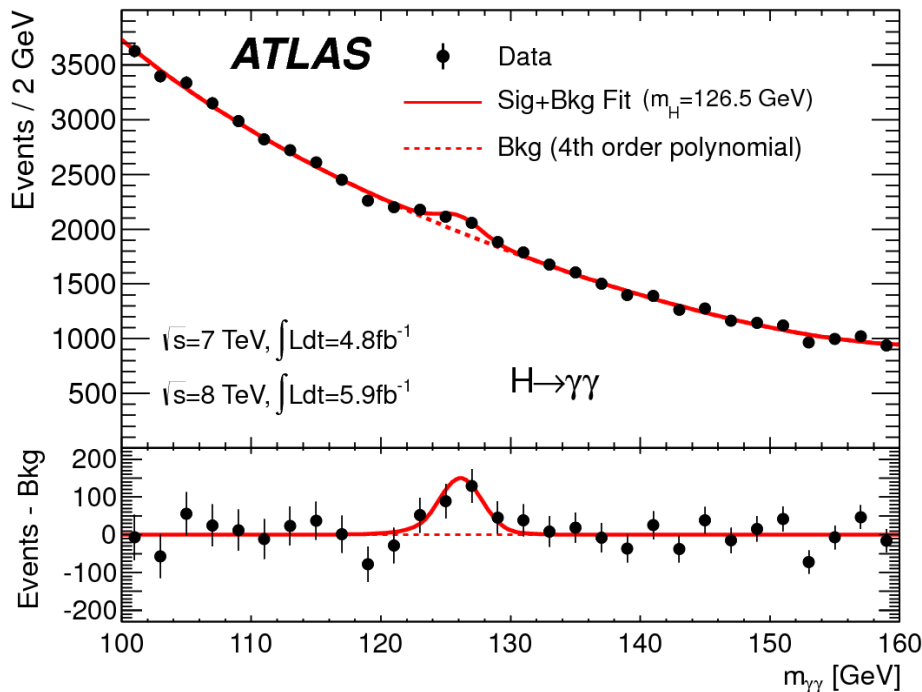
- Higgs en ZZ
 - ▶ Très peu de bruit de fond
 - ▶ Très peu d'événements



Mesure

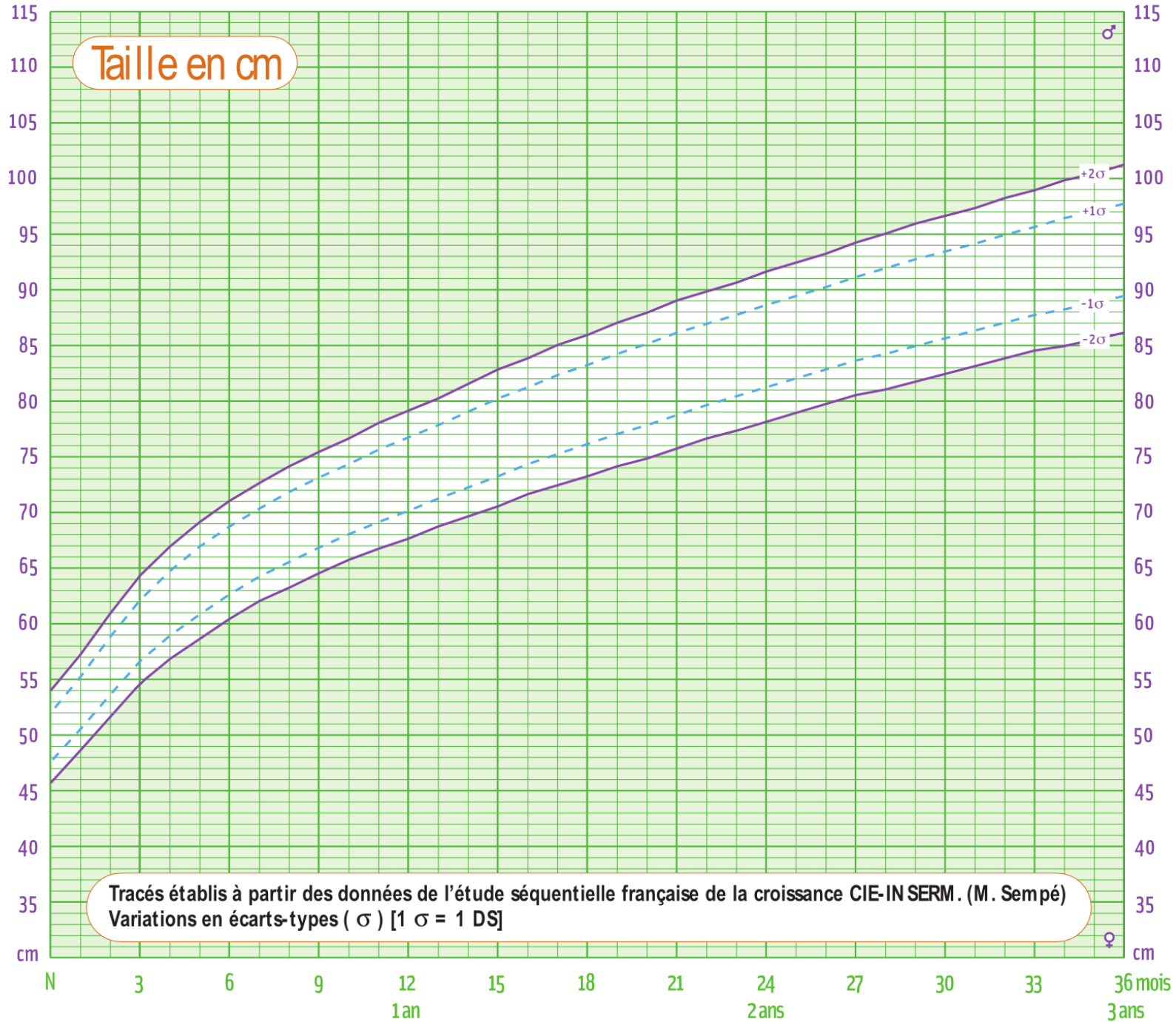
- Higgs en 2 photons
 - ▶ Bruit de fond important
 - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

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

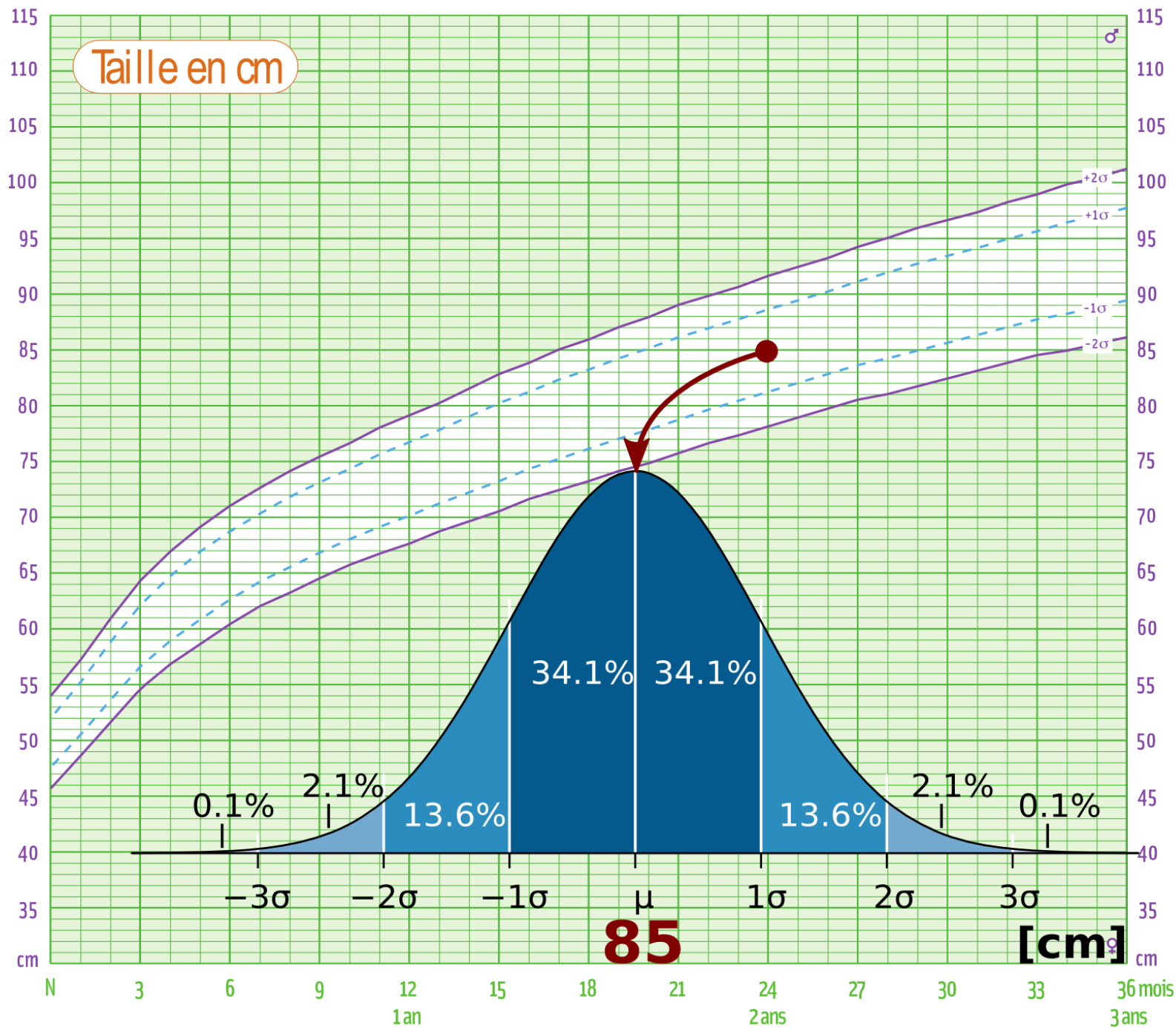


Est-ce que cela est significatif ?
Outils statistiques pour répondre

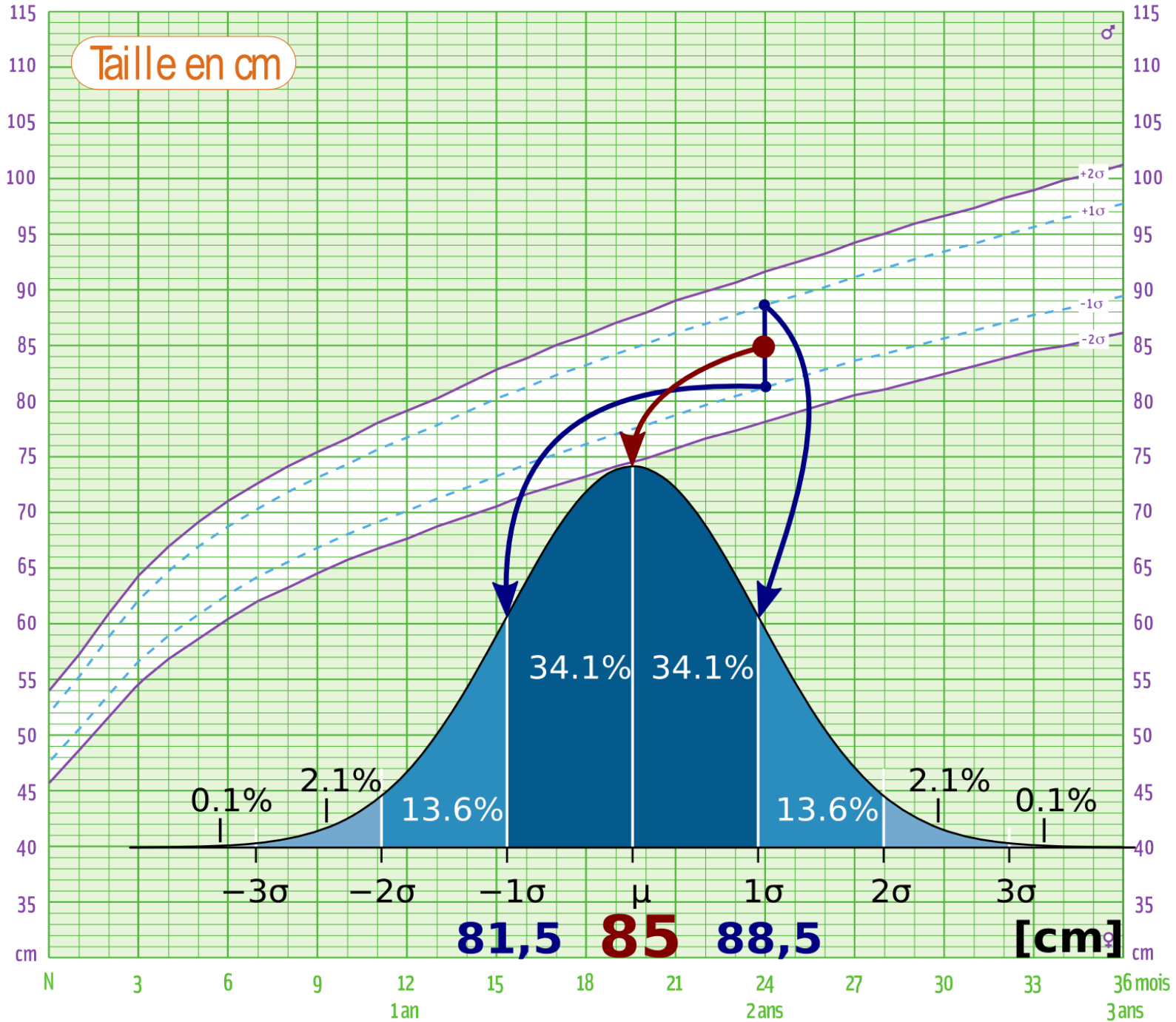
La Gaussienne



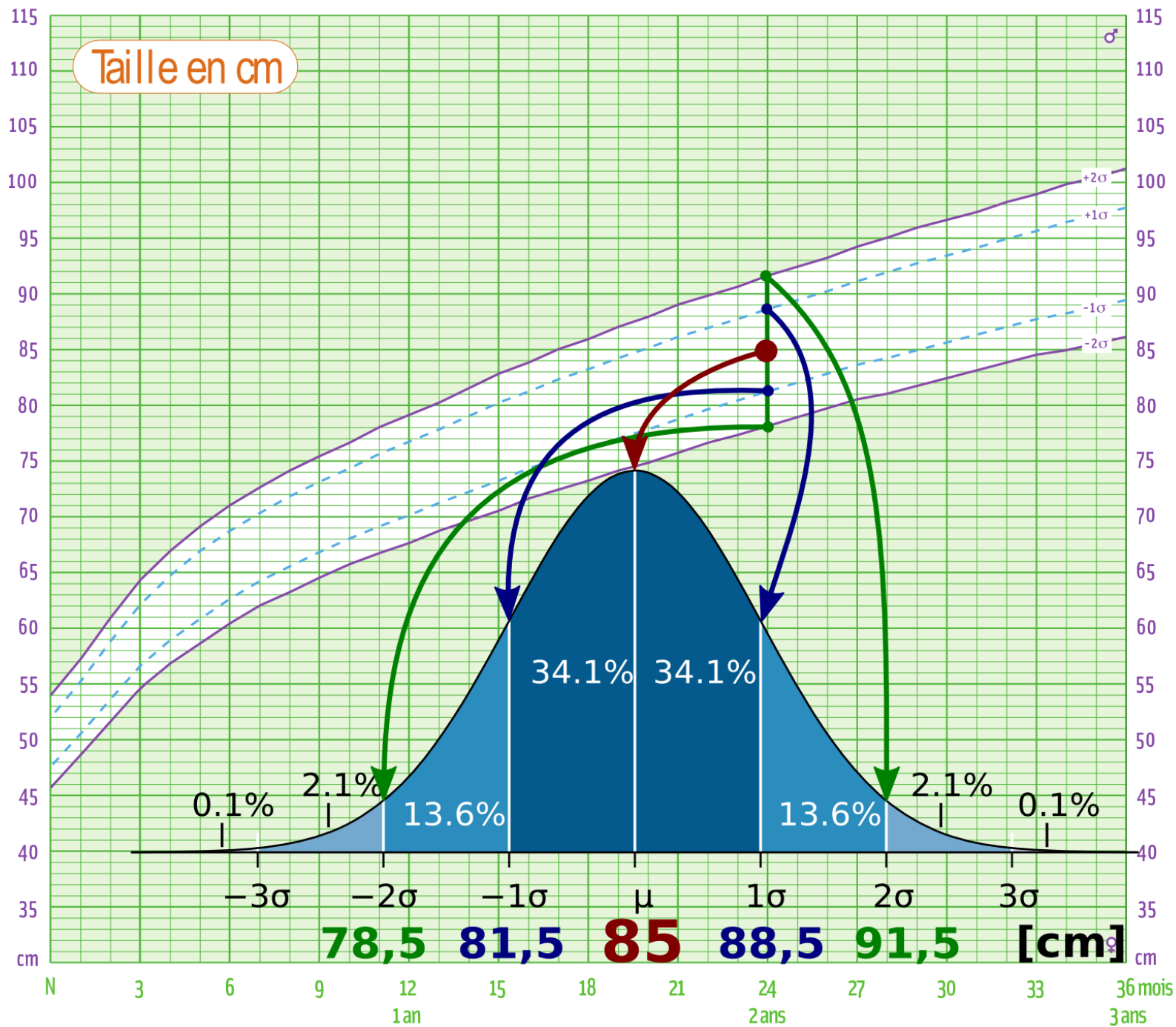
La Gaussienne



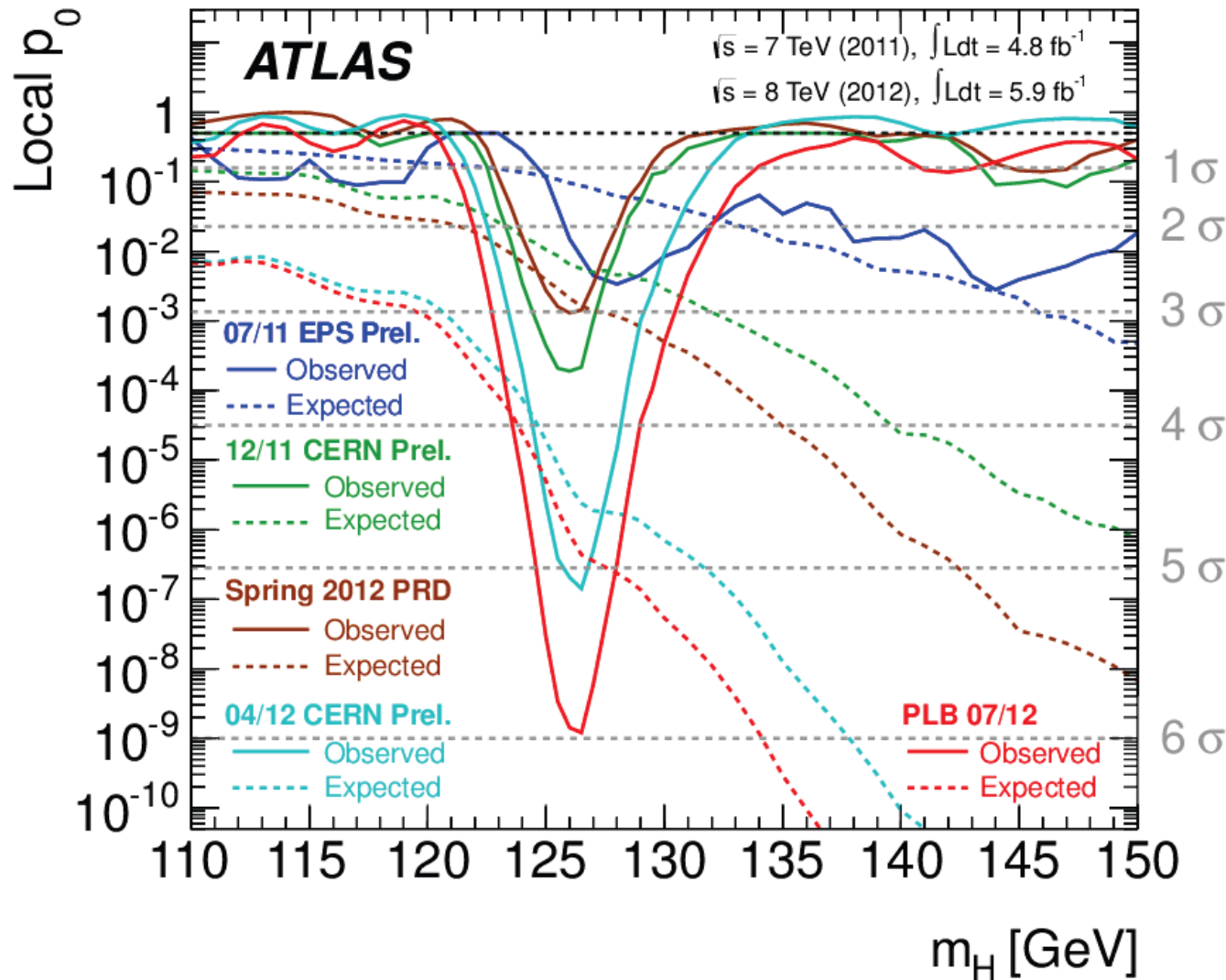
La Gaussienne



La Gaussienne

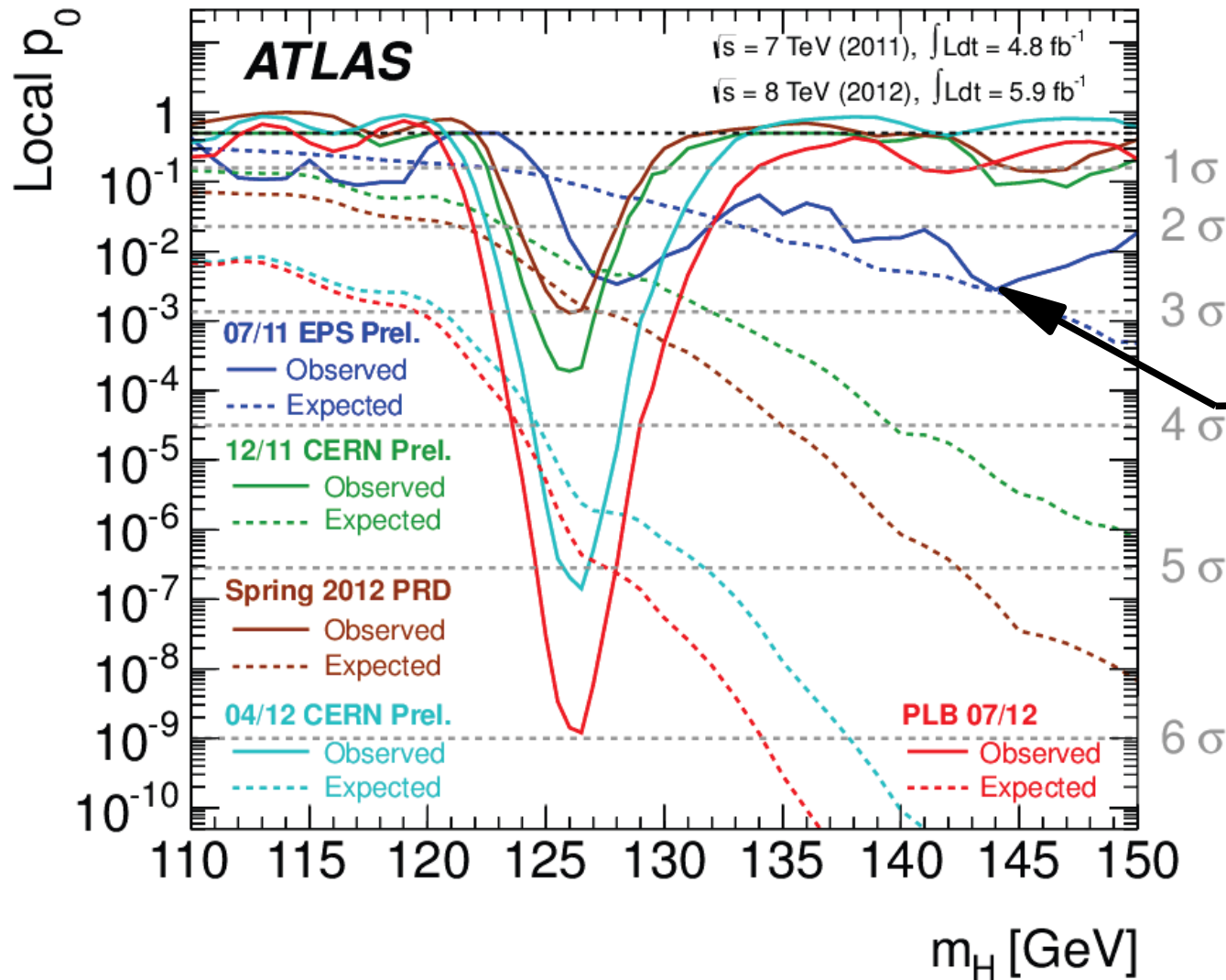


Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

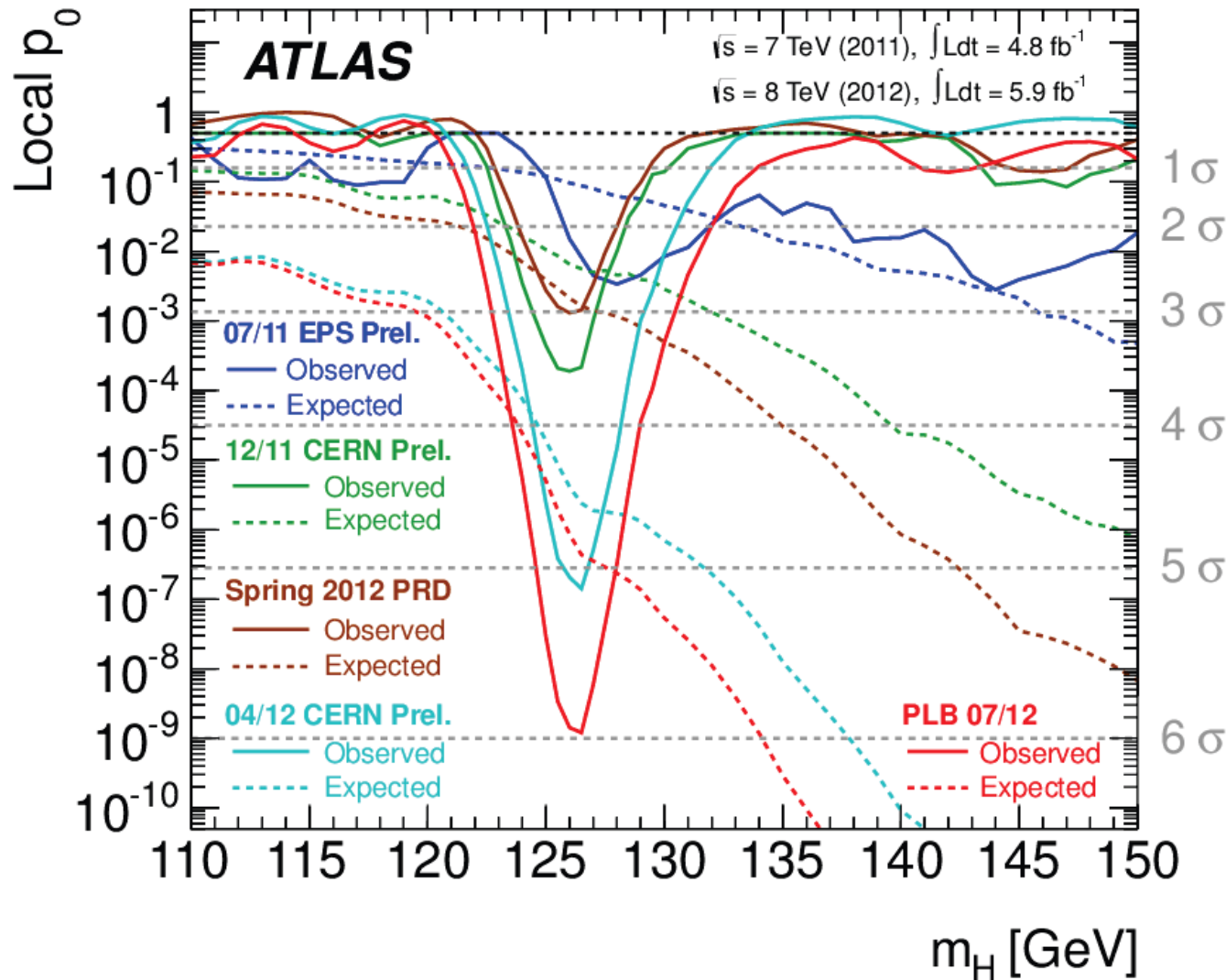
Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



Généra beaucoup d'excitation chez les théoriciens !

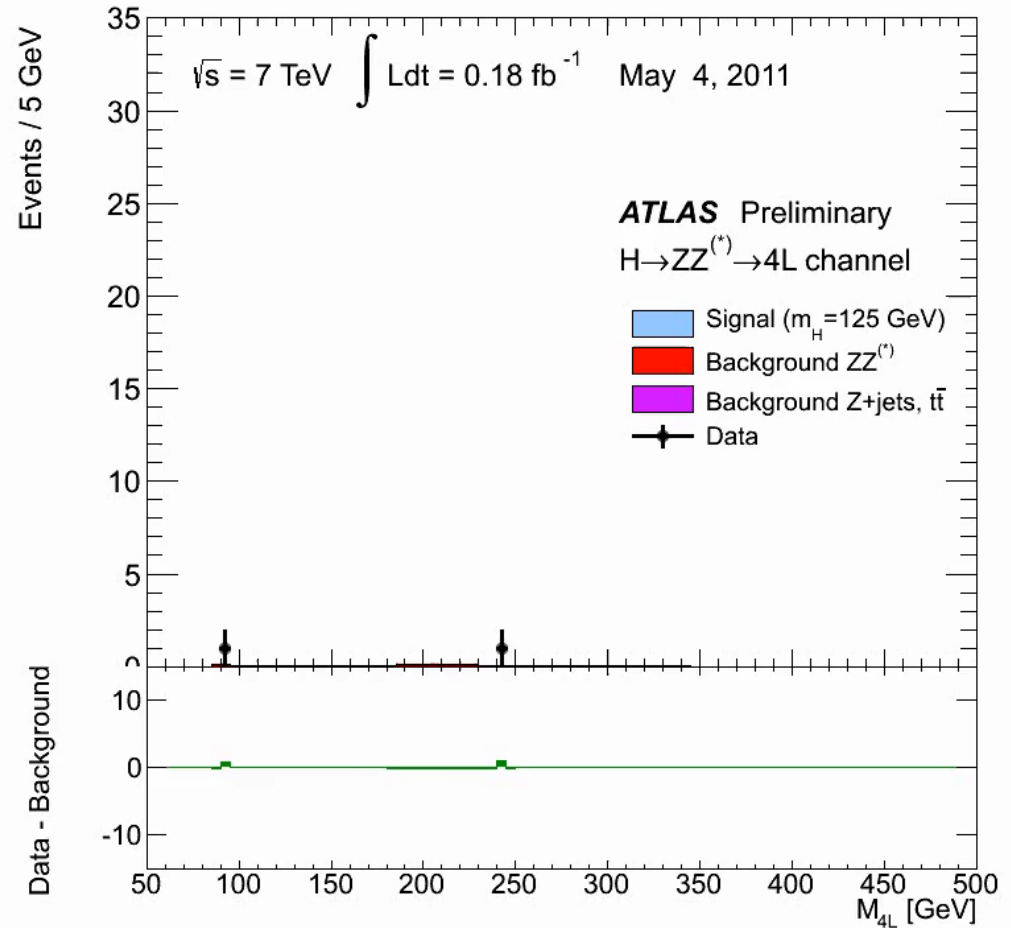
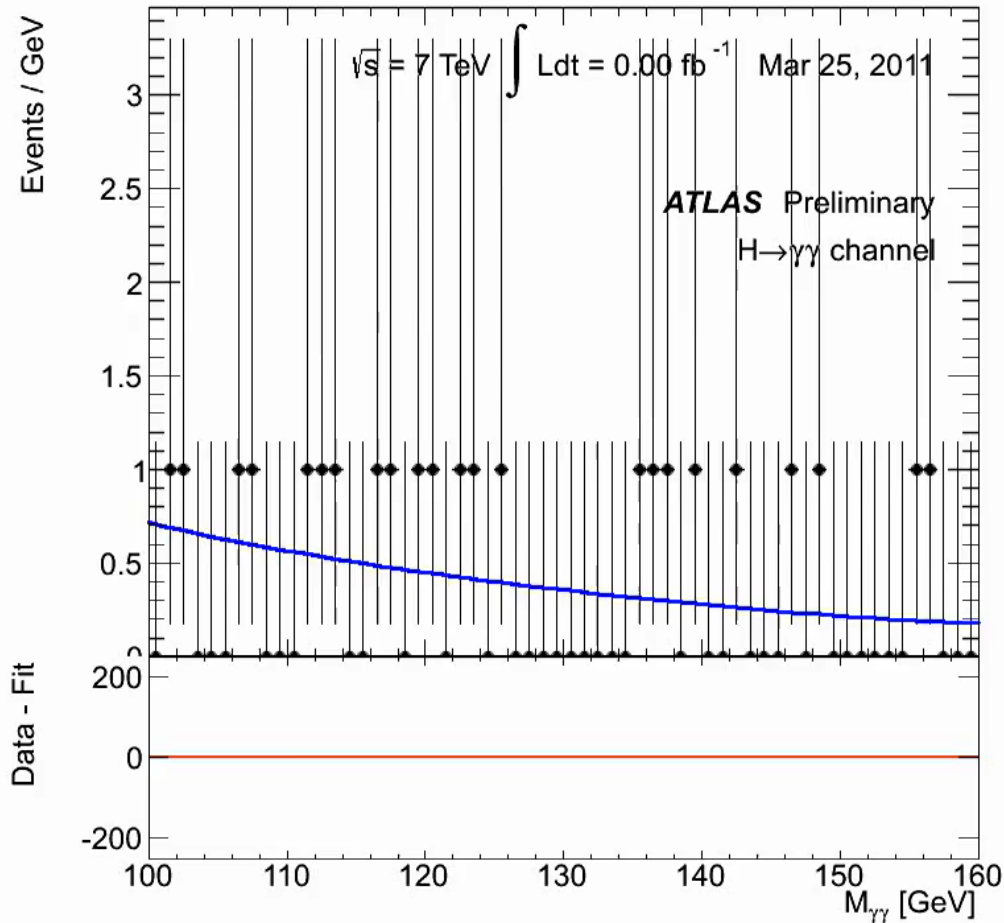
- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)

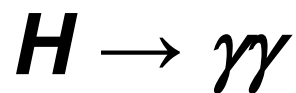


- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

Évolution dans le temps (jusqu'à fin 2012)

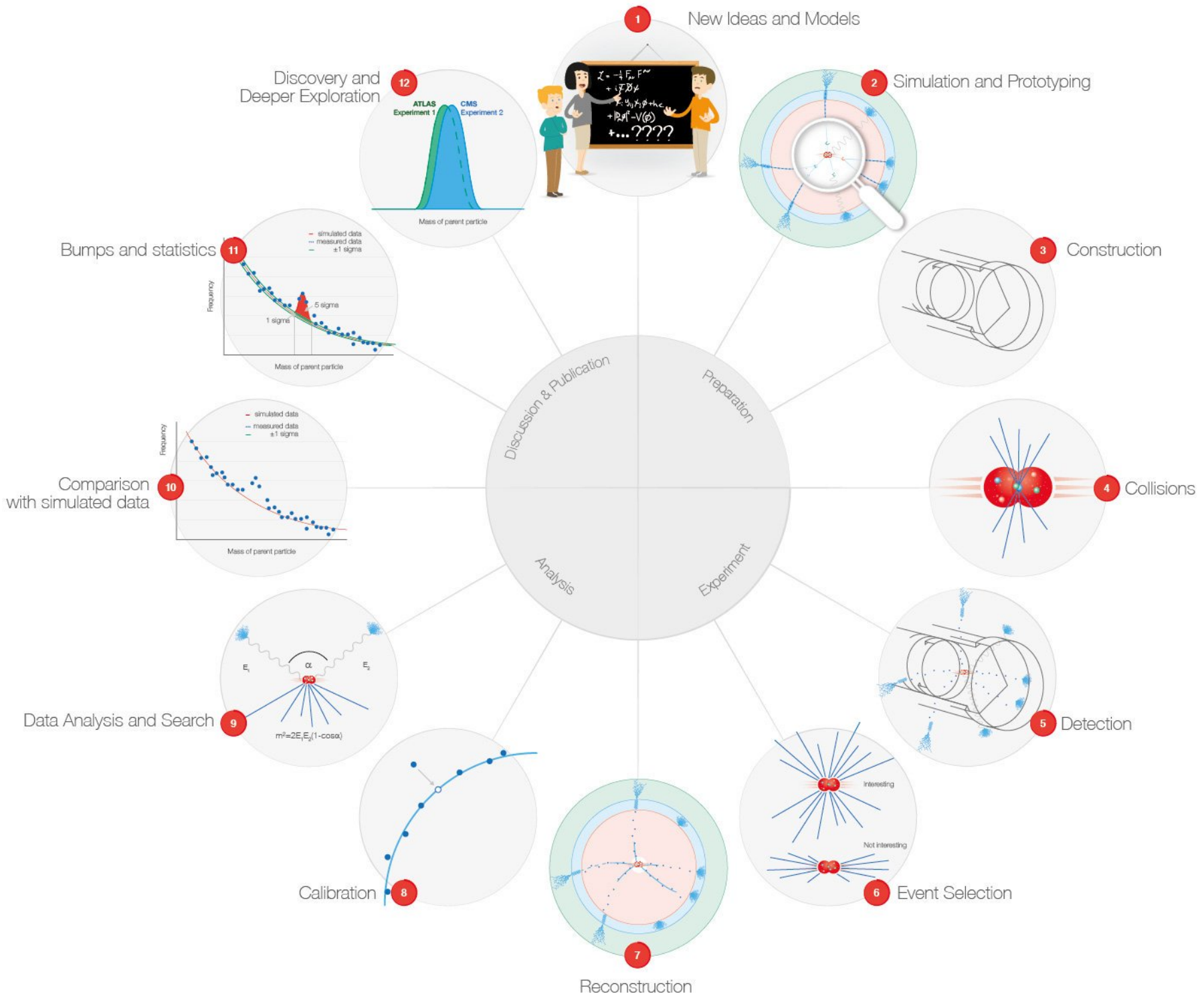


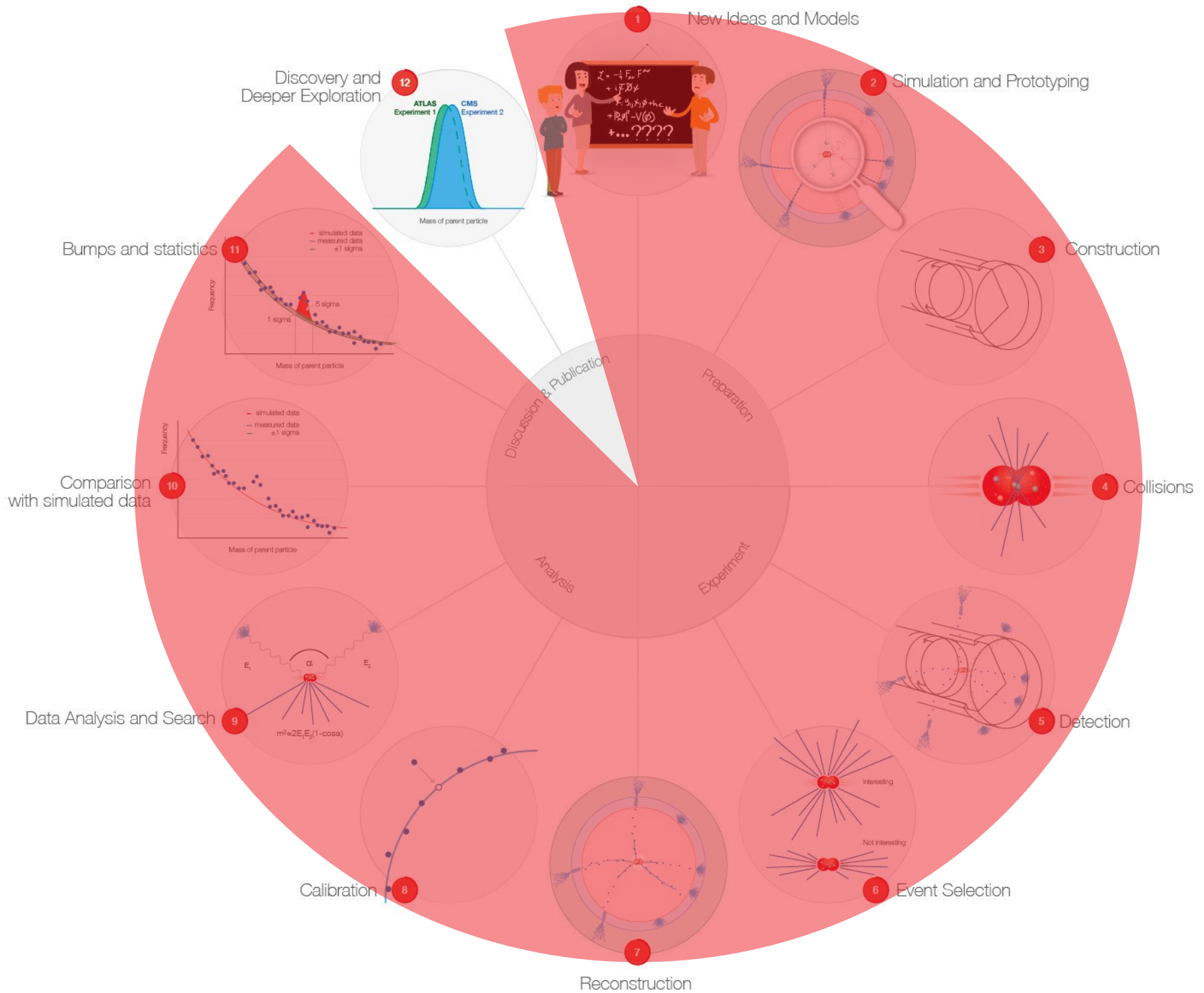
© CERN



© CERN



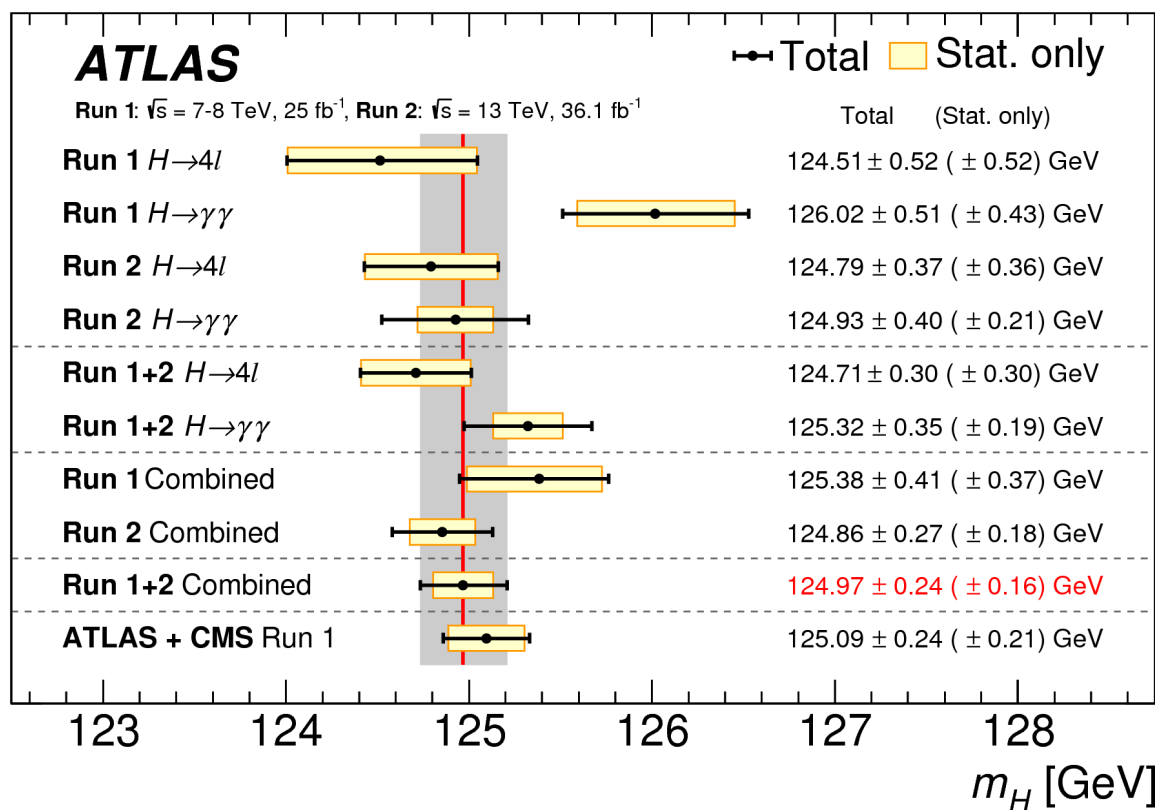




Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :

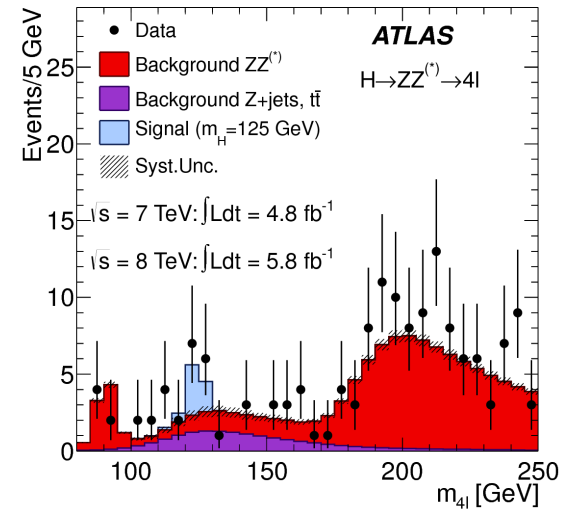
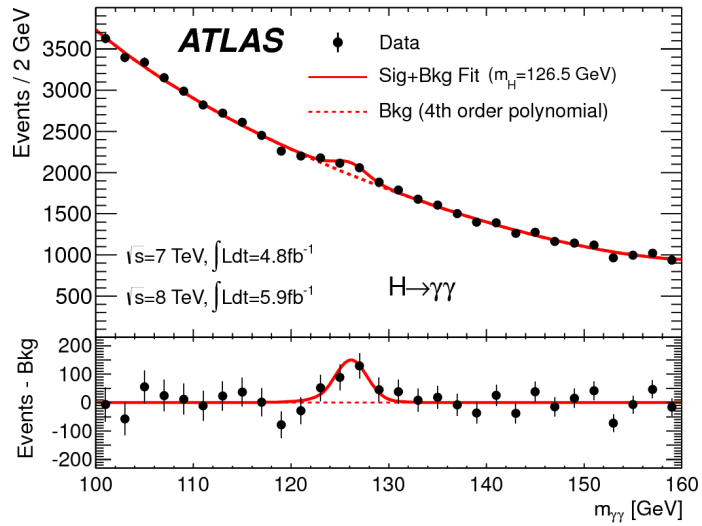
- ▶ $m_H = 125.09 \pm 0.24$ (0.21 stat. \pm 0.11 syst.) GeV
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]
(134 fois la masse du proton)



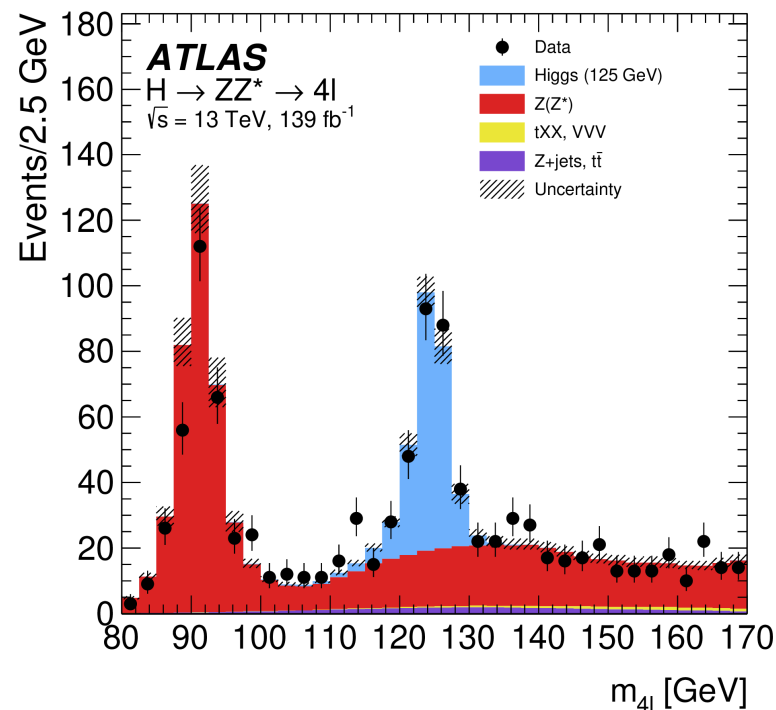
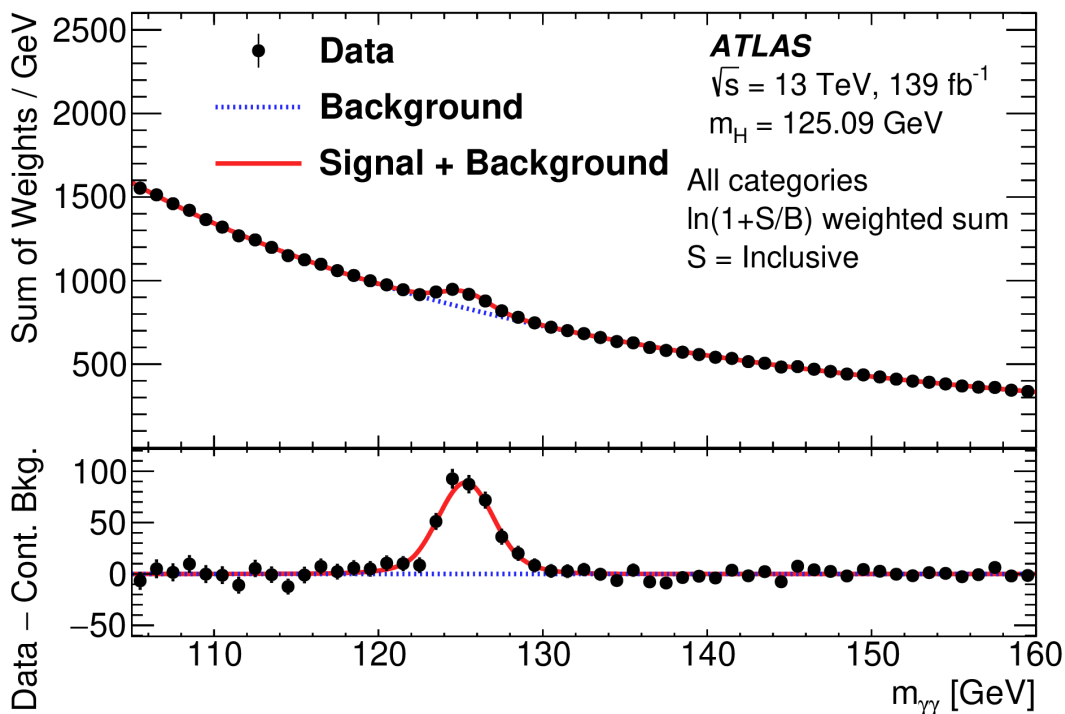
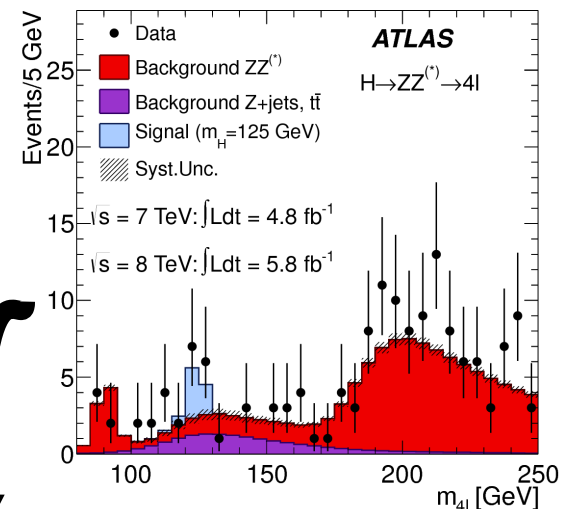
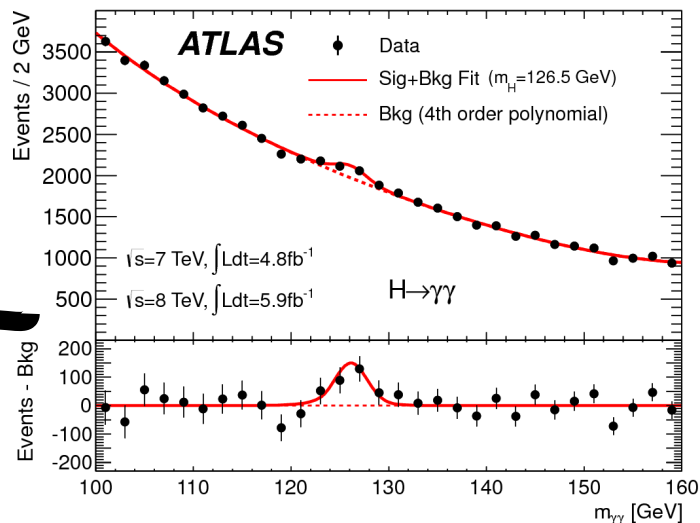
Est-ce le Higgs du modèle standard ?

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

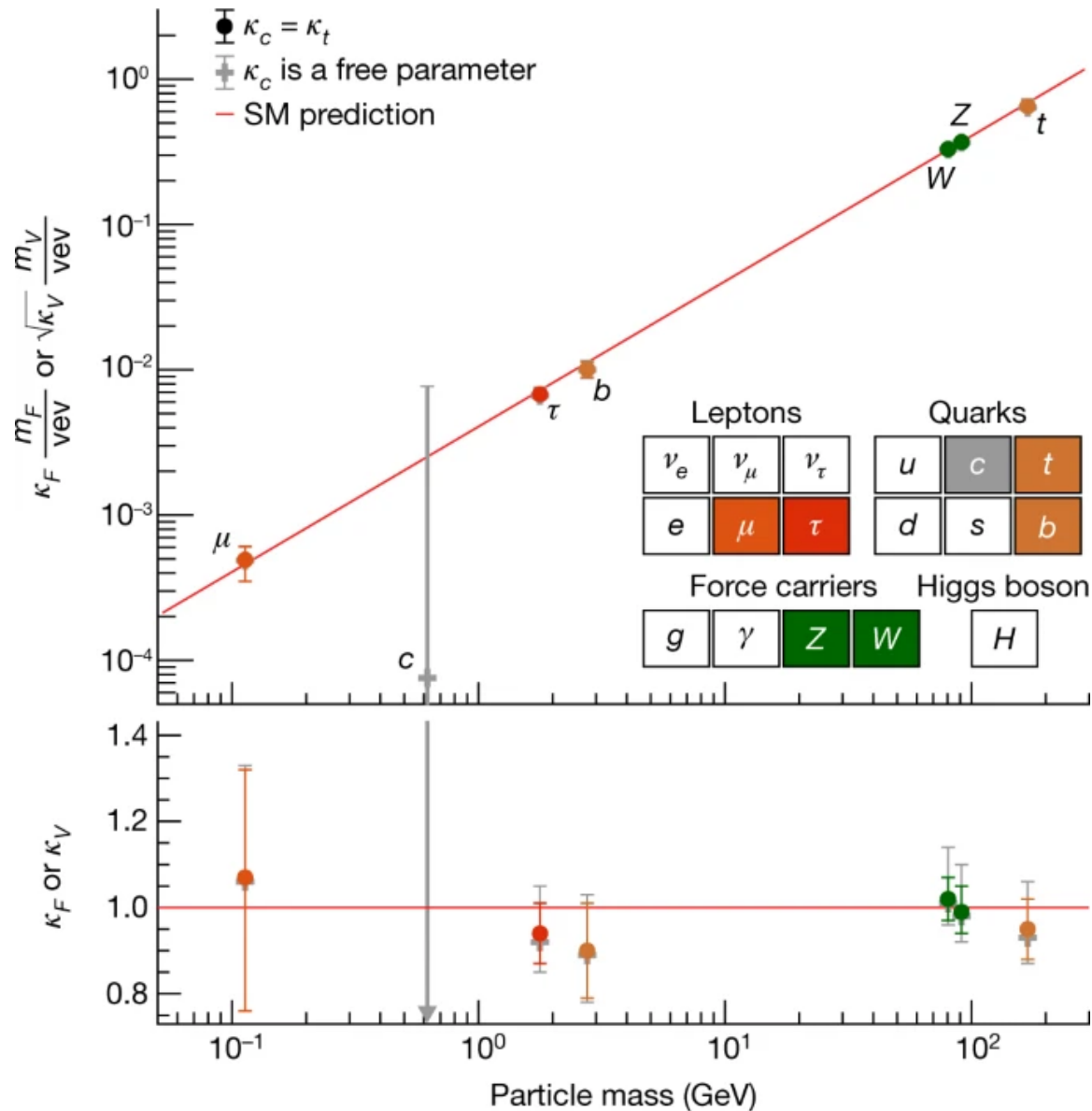
Hier...



Hier... et aujourd'hui



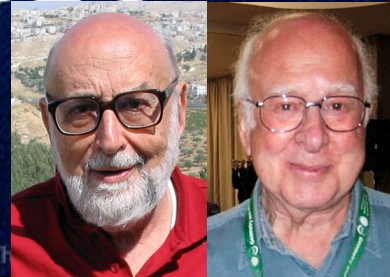
Masse des particules et couplage au boson de Higgs



Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs

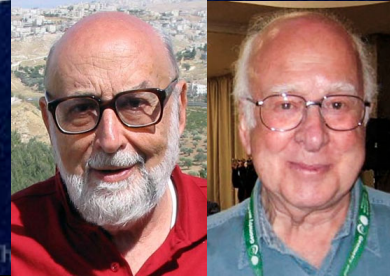


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs

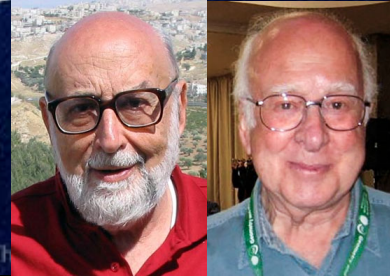


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



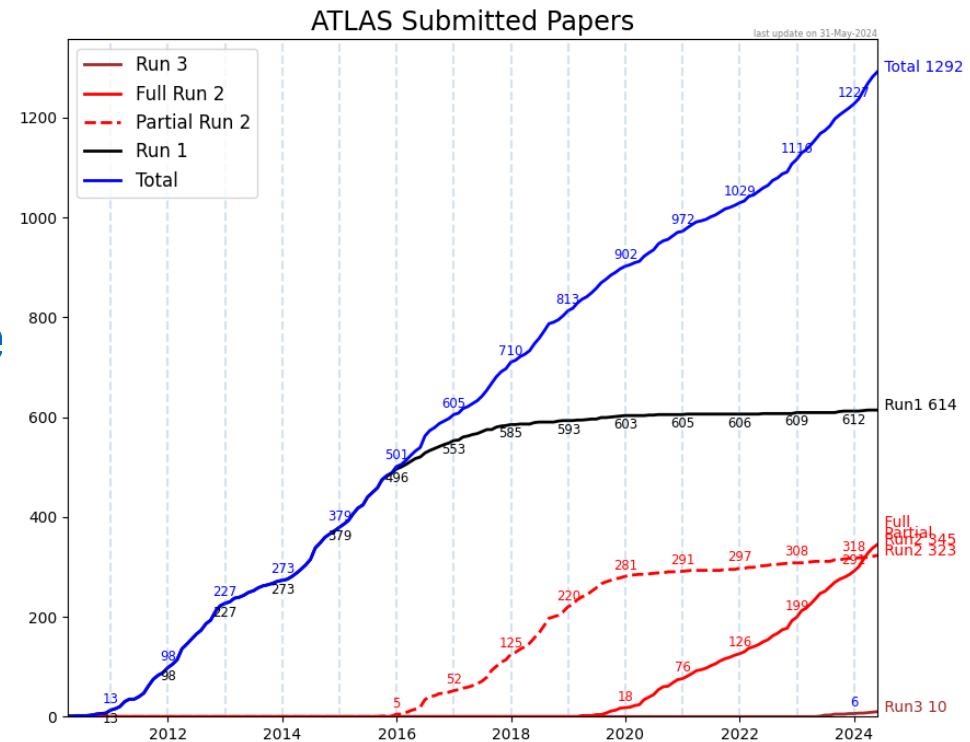
« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



Le CERN et les expériences ATLAS & CMS

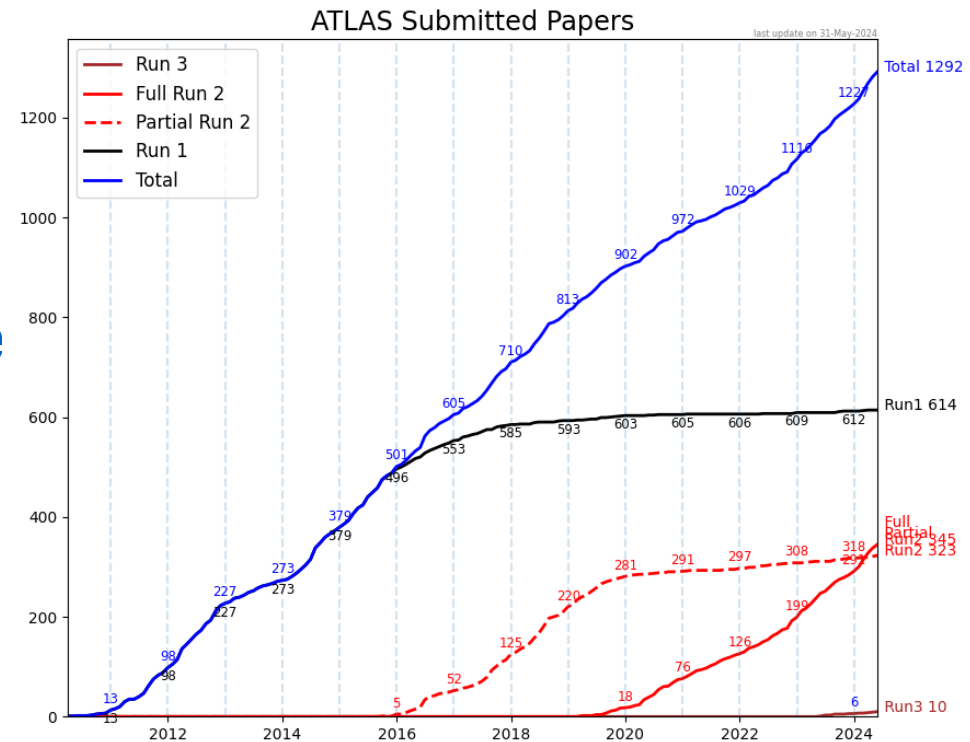
Publications

- ATLAS :
 - ▶ >1200 publications
 - ▶ >1200 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
 - ▶ > 700 publications
- ALICE :
 - ▶ > 360 publications



Publications

- ATLAS :
 - ▶ >1200 publications
 - ▶ >1200 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
 - ▶ > 700 publications
- ALICE :
 - ▶ > 360 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 blue ocean under a blue sky with light clouds. The iceberg is the central focus, with its peak and some jagged edges visible above the water. The rest of the iceberg is submerged, representing the unknown. The text 'Ce que l'on connaît (5%)' is overlaid on the visible part of the iceberg.

Ce que l'on connaît (5%)

Ce que l'on connaît (5%)

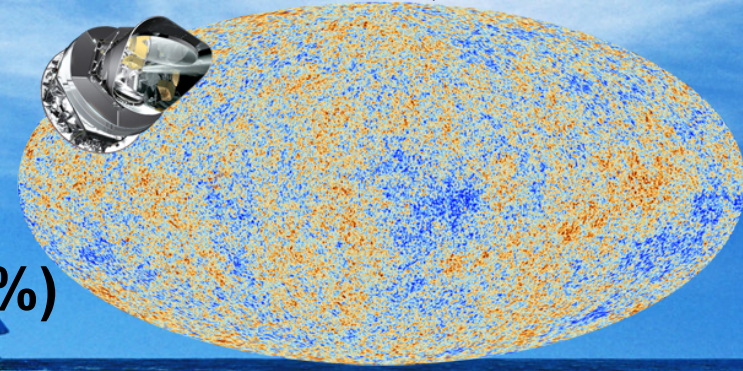
27% Matière noire

68% Énergie noire

Reste à découvrir !



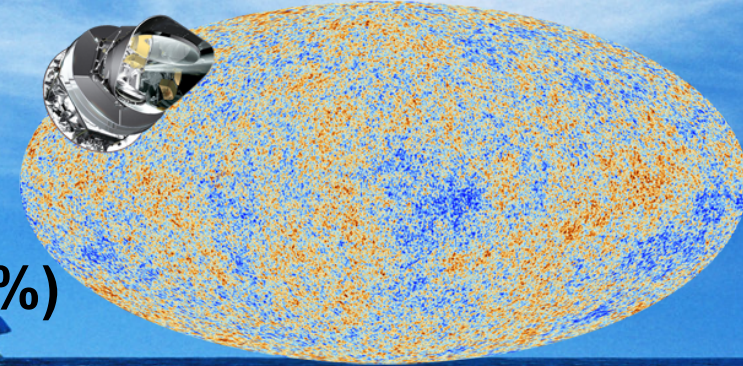
© Render by Jonathan Rey



Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

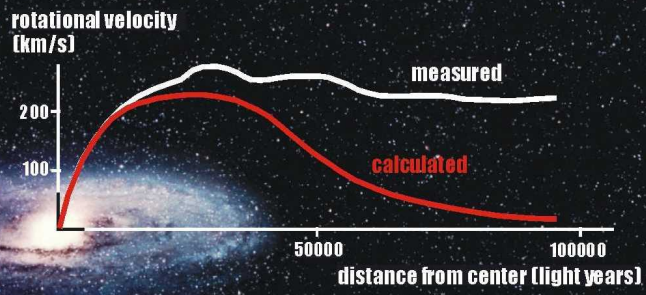
68% Énergie noire



Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

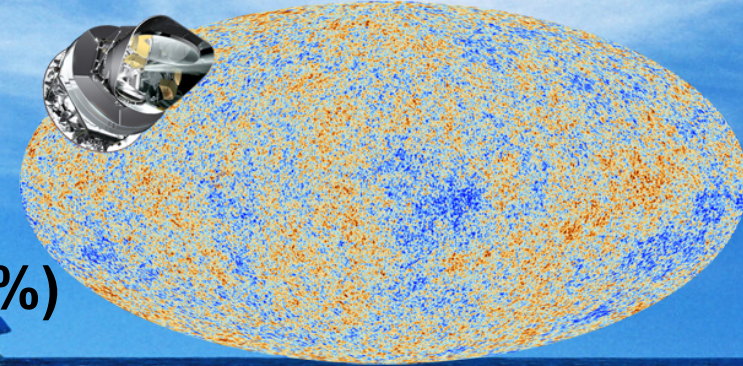
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



68% Énergie noire



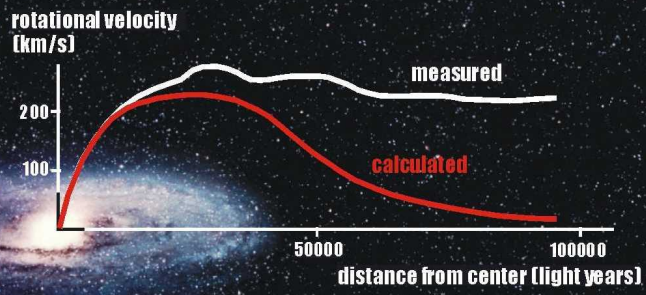
Vera Rubin



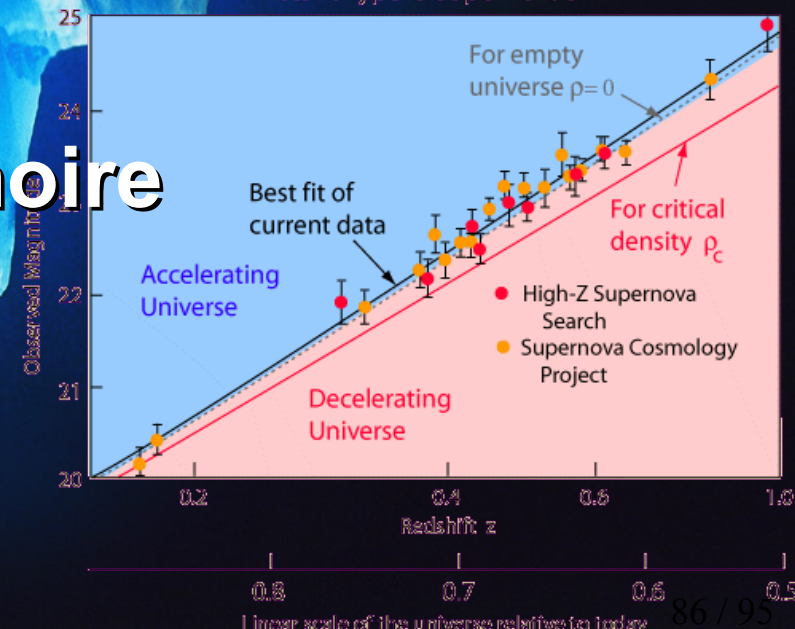
Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

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



Distant Type Ia Supernovae



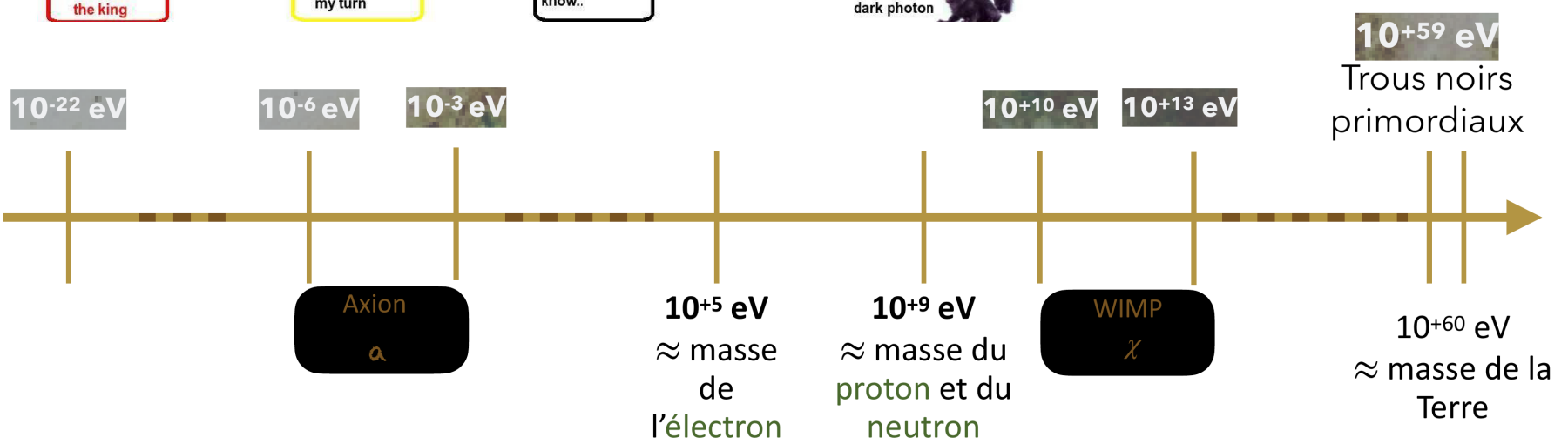
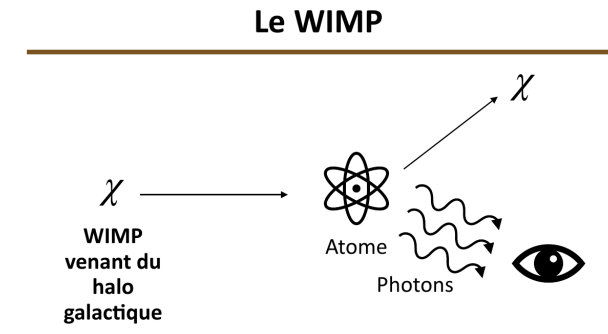
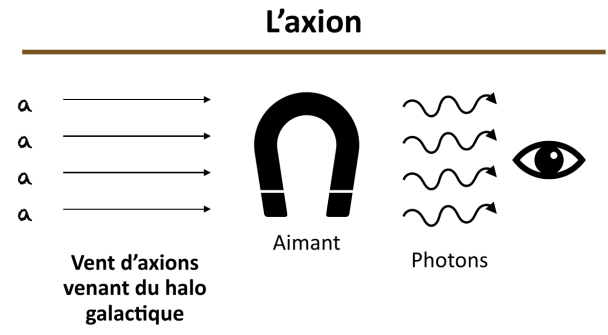
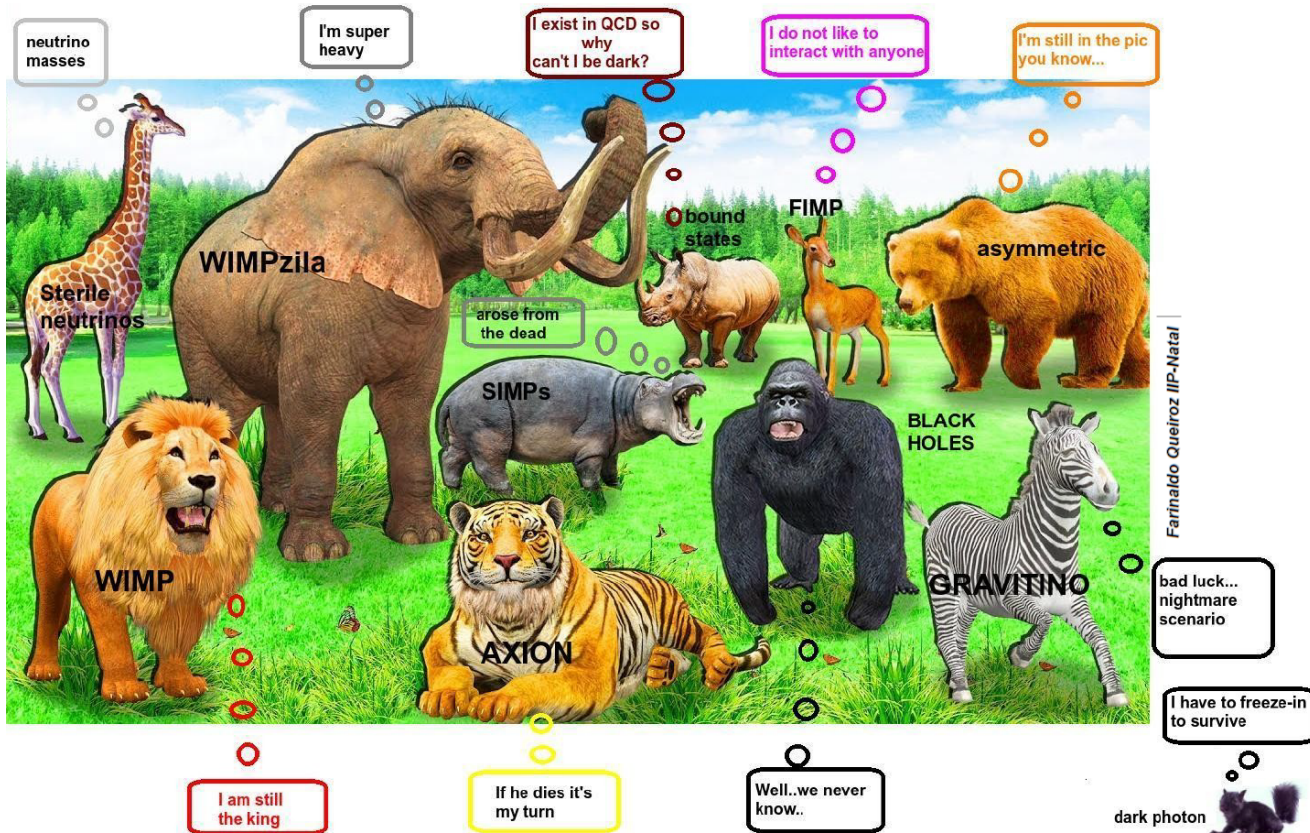
68% Énergie noire

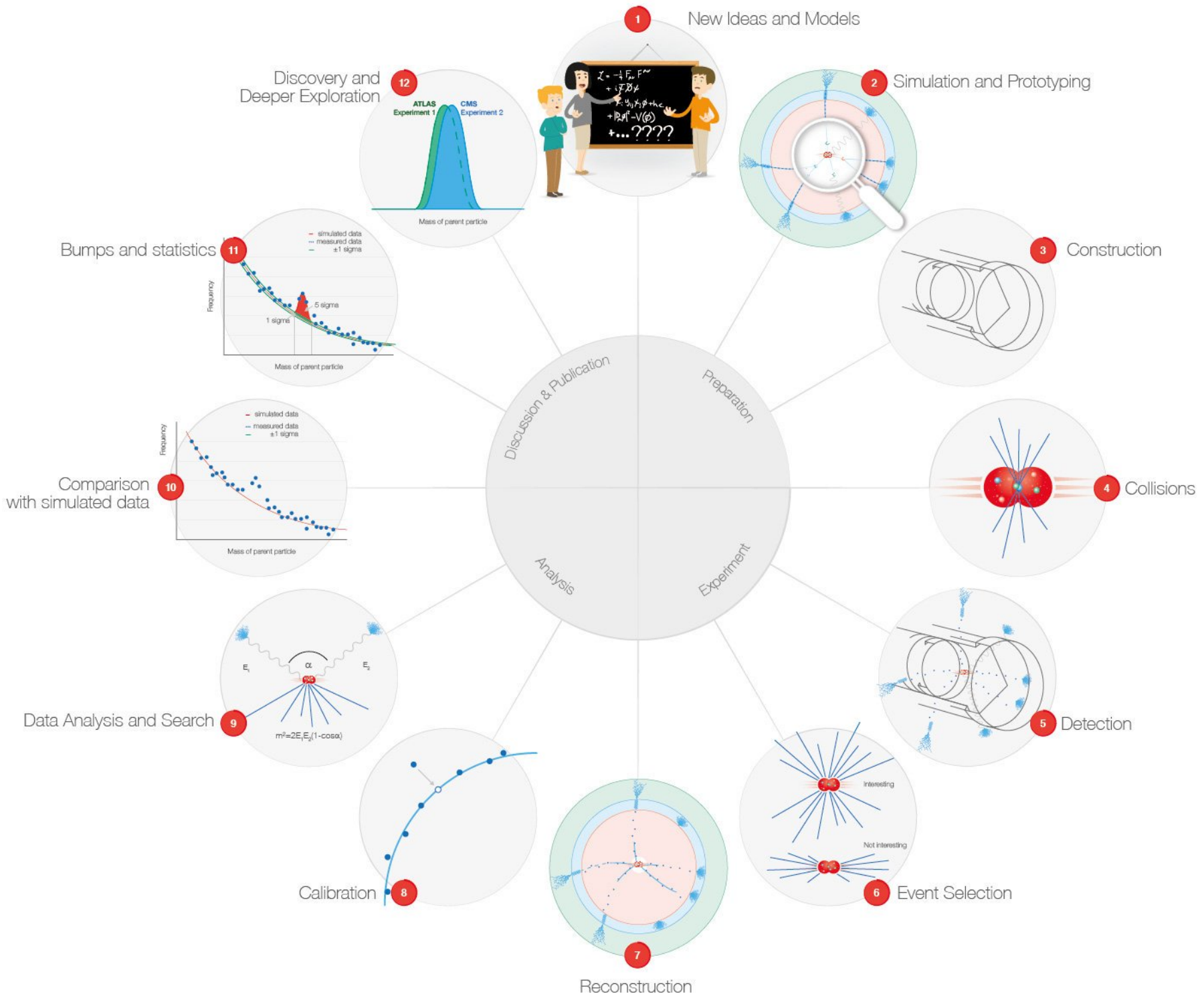


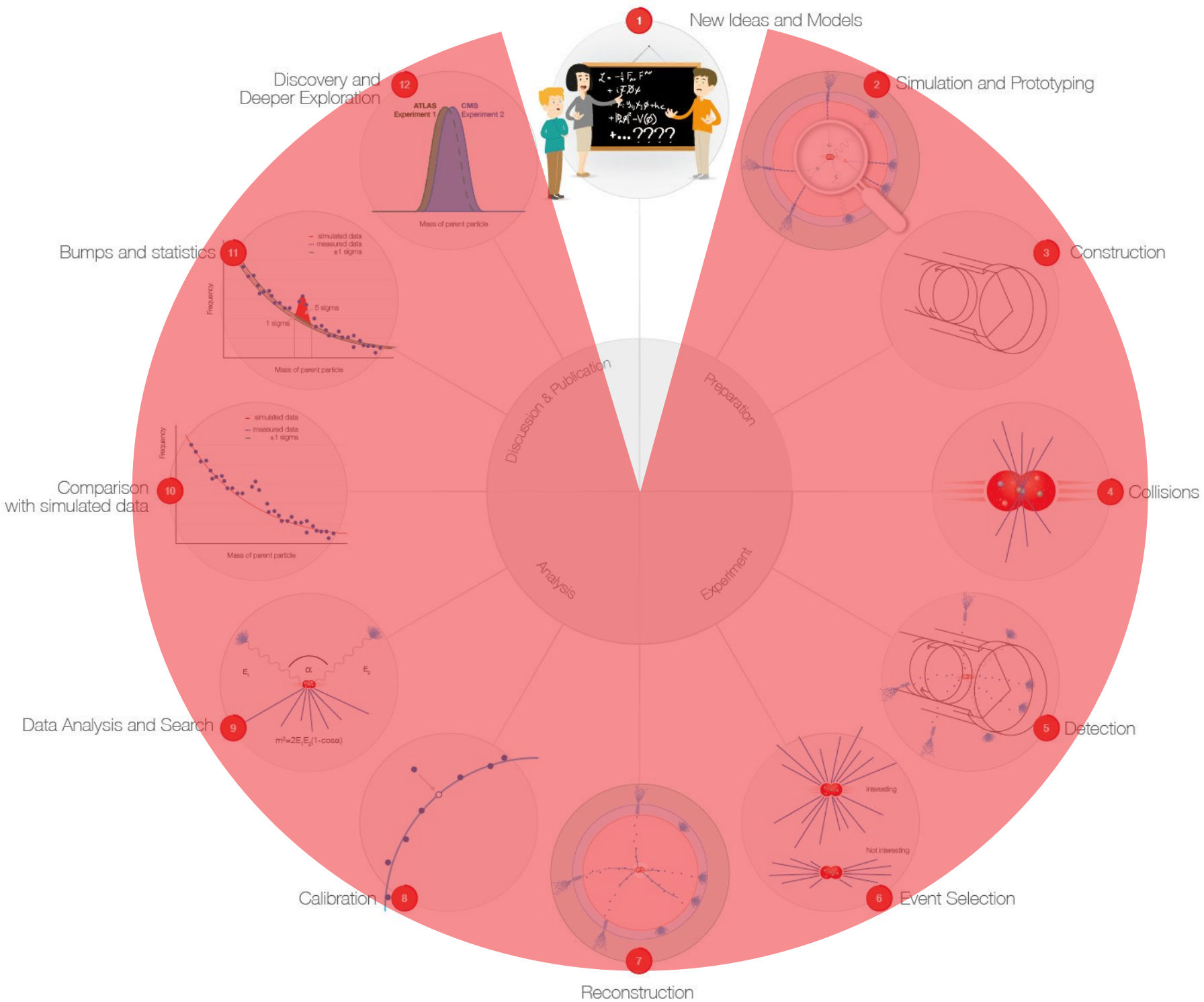
Vera Rubin

Pas la moindre idée de son origine !

Candidats matière noire

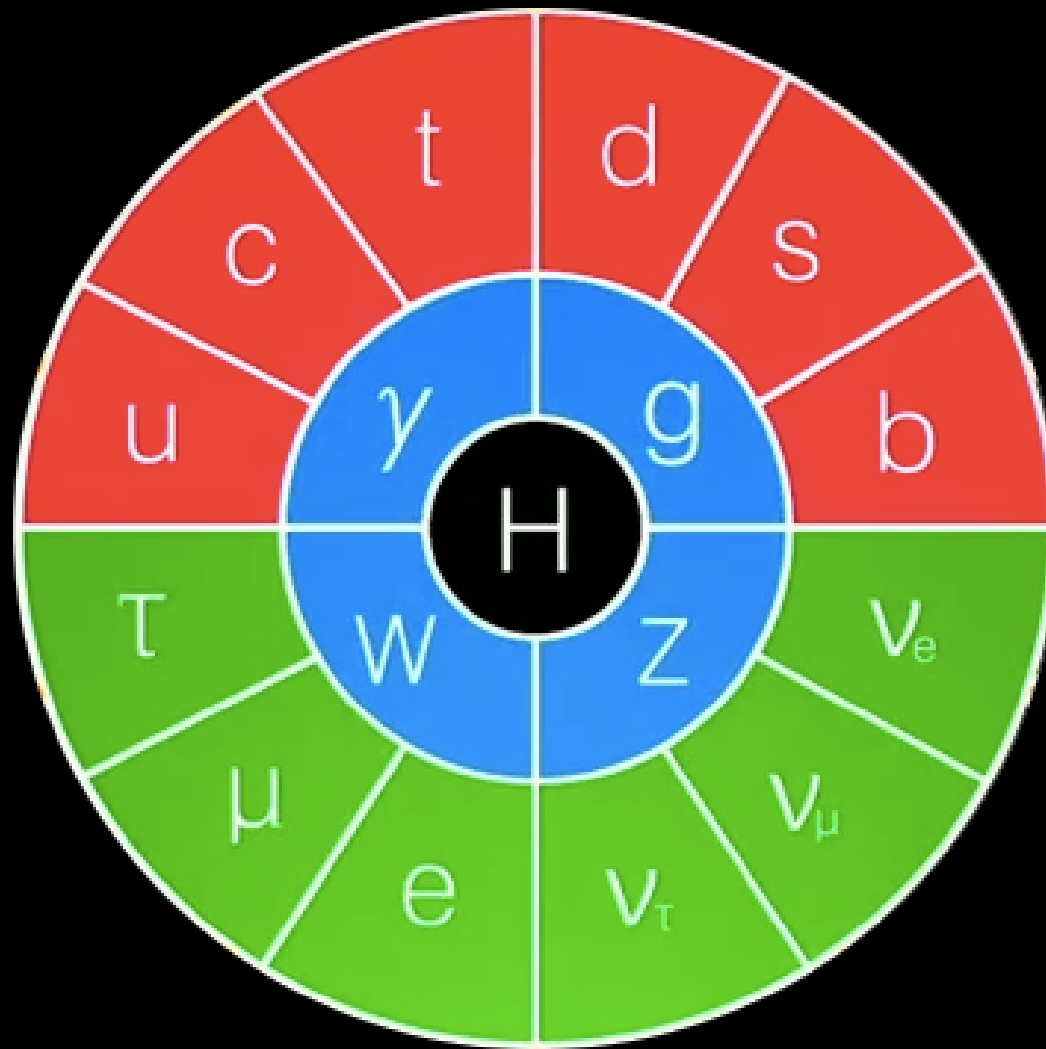


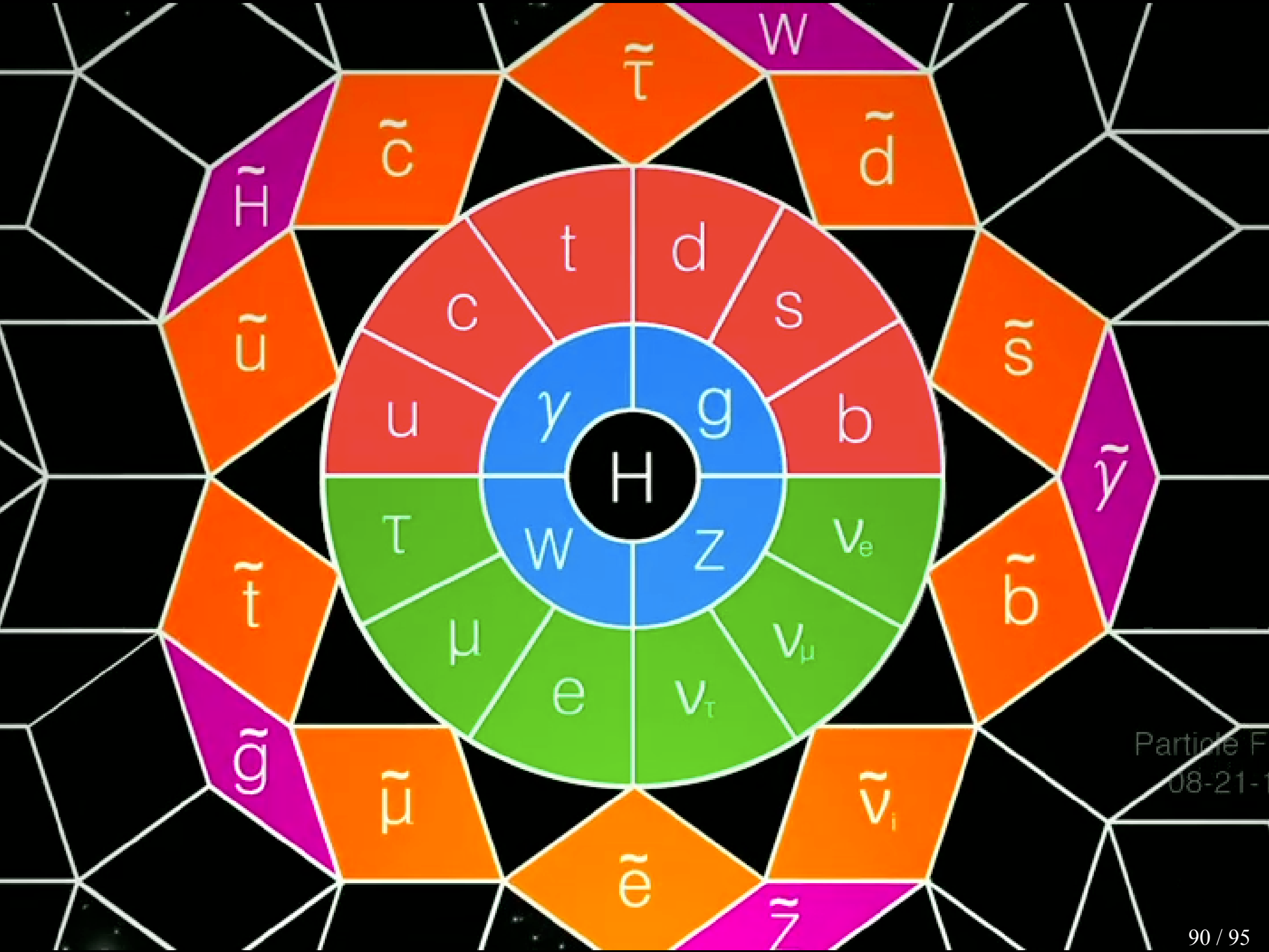




Autres théories

- 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





Particle F
08-21-1

Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

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

Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

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

LHC Saison 3 (Run 3) :

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

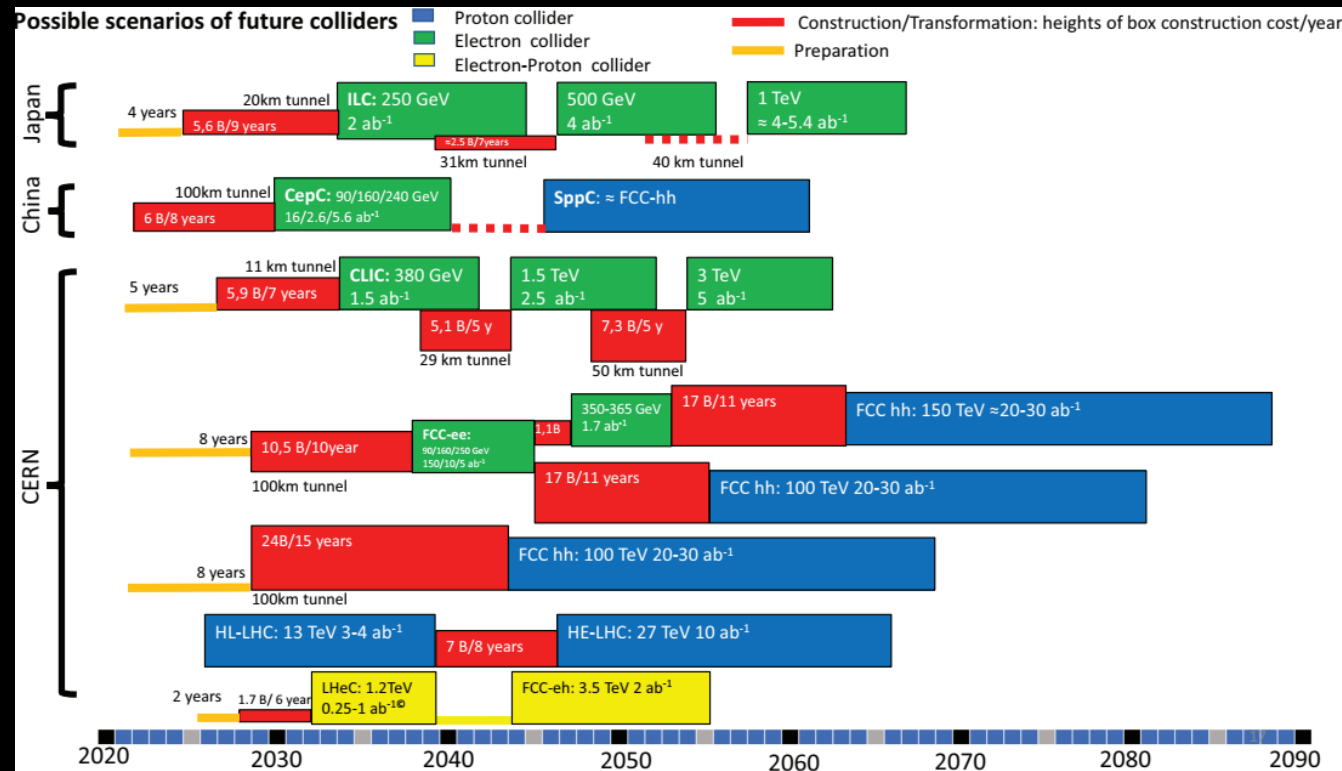
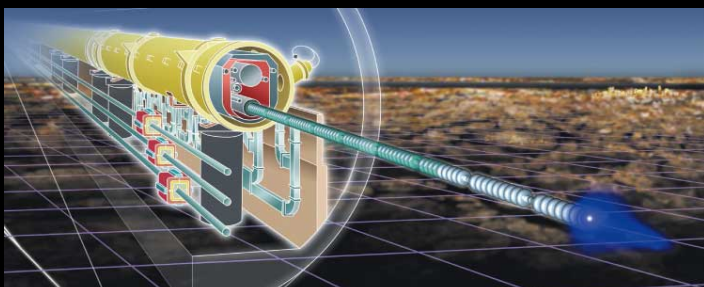
Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

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

LHC Saison 3 (Run 3) :

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

Et après ?



- **Future Circular Collider (FCC)**

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

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

- **Large Hadron Collider (LHC)**

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

Circumference: 27 km
 Energy: 14 TeV (pp) 209 GeV (e⁺e⁻)

- **Tevatron**

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

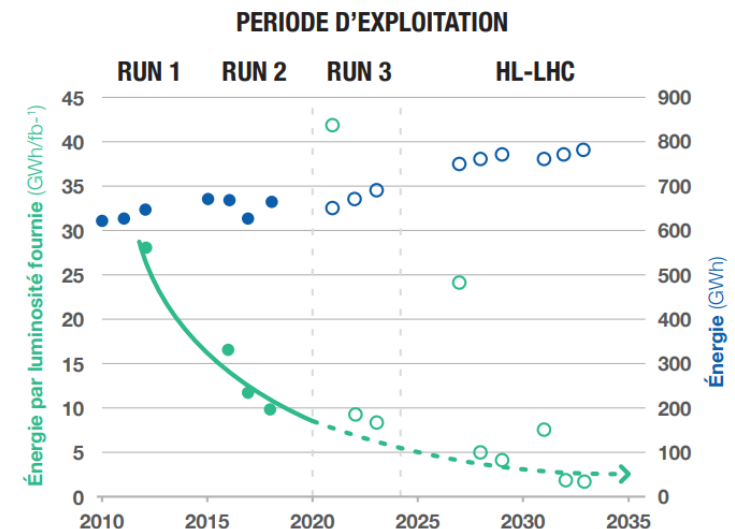
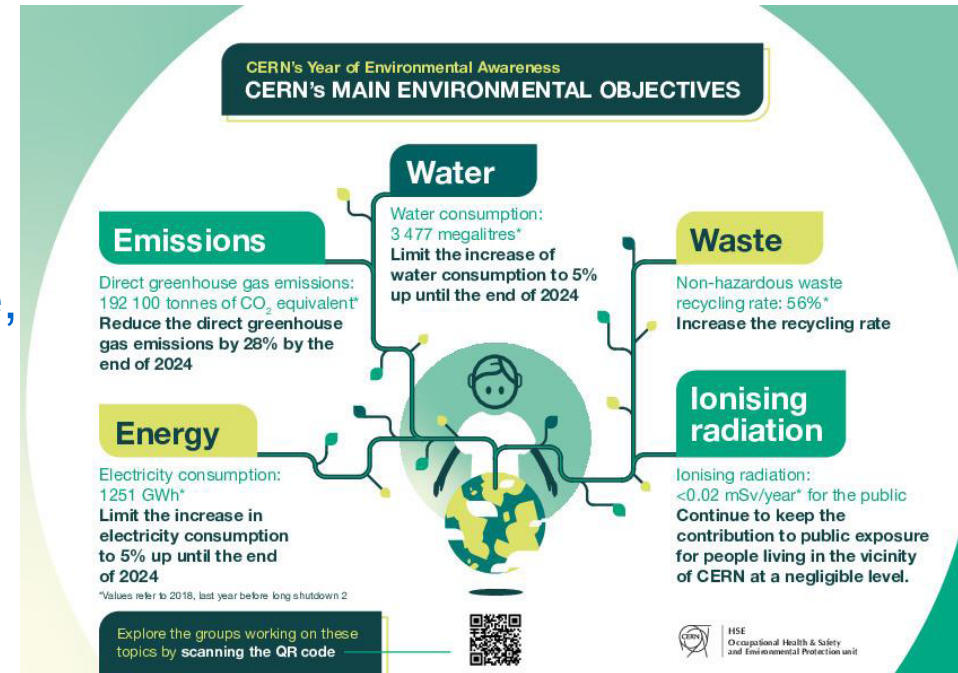
- **Compact Linear Collider (CLIC)**

CERN, 11-50 km, 380-3000 GeV (e⁺e⁻)

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

Impact environnemental

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



Liens

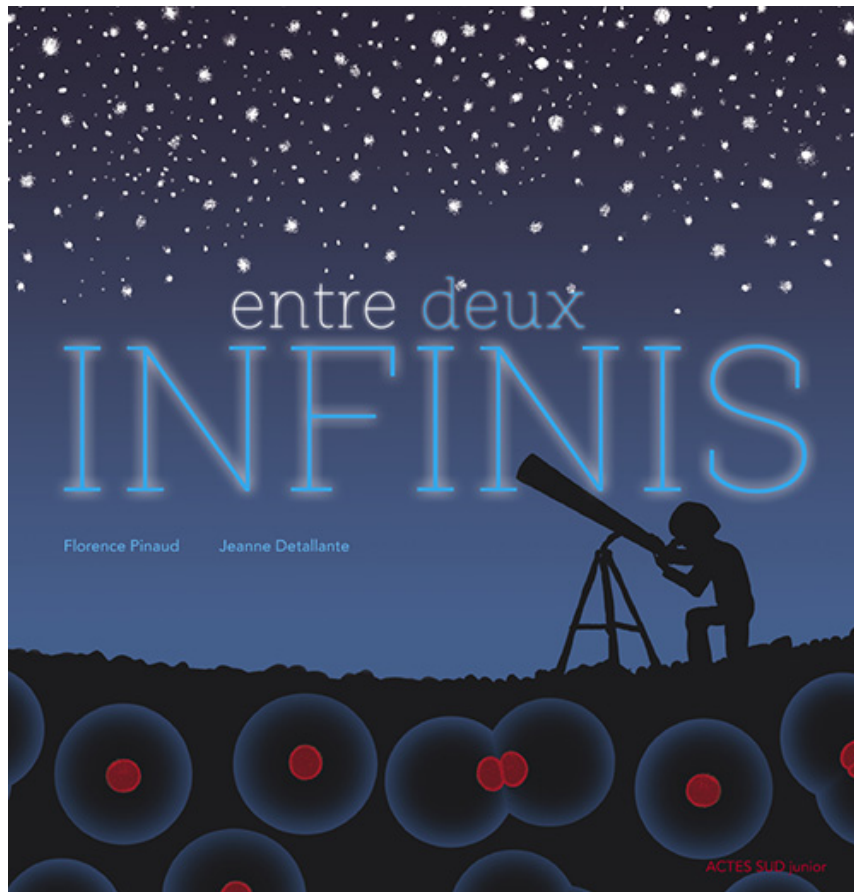
ATLAS@home		atlasathome.cern.ch
ATLAS grand public		atlas.cern
ATLAS en direct		atlas-live.cern.ch
ATLAS sur		twitter.com/ATLASexperiment
ATLAS sur		www.facebook.com/ATLASexperiment
ATLAS sur		www.instagram.com/atlasexperiment
ATLAS sur		www.youtube.com/theATLASExperiment
ATLAS sur		www.tiktok.com/@atlasexperiment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



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