

La physique des particules.

Yann Coadou

Centre de physique
des particules
de Marseille

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



ATLAS
EXPERIMENT



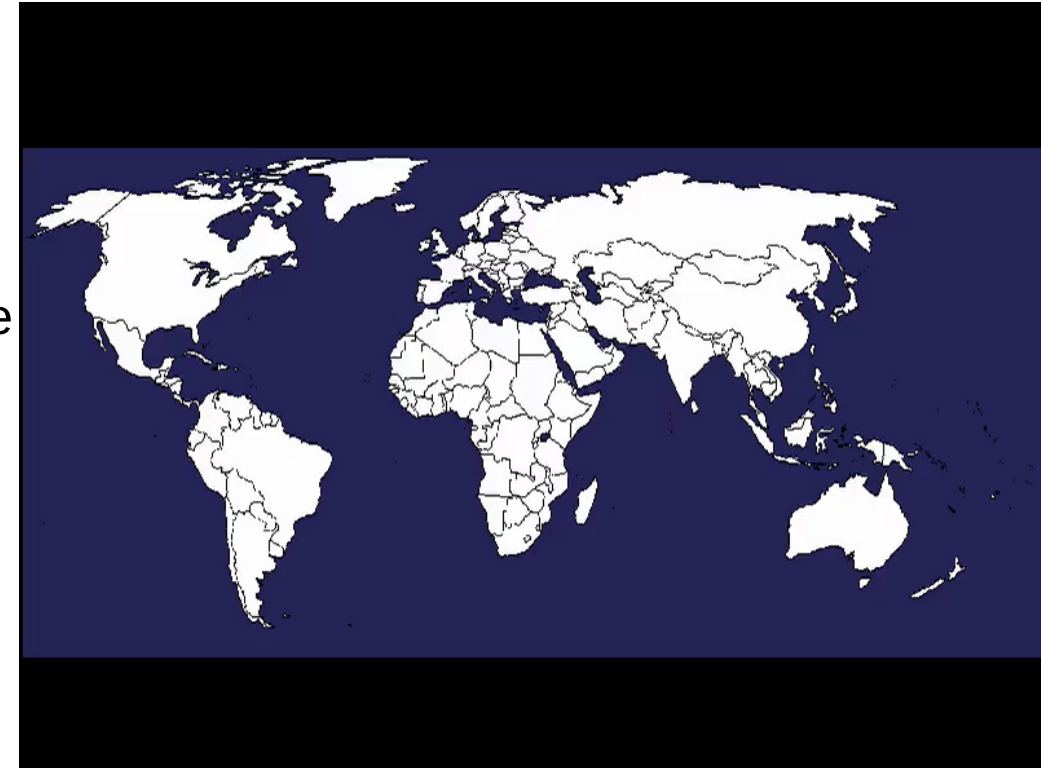
NUCLÉAIRE
& PARTICULES

amu
Aix
Marseille
Université

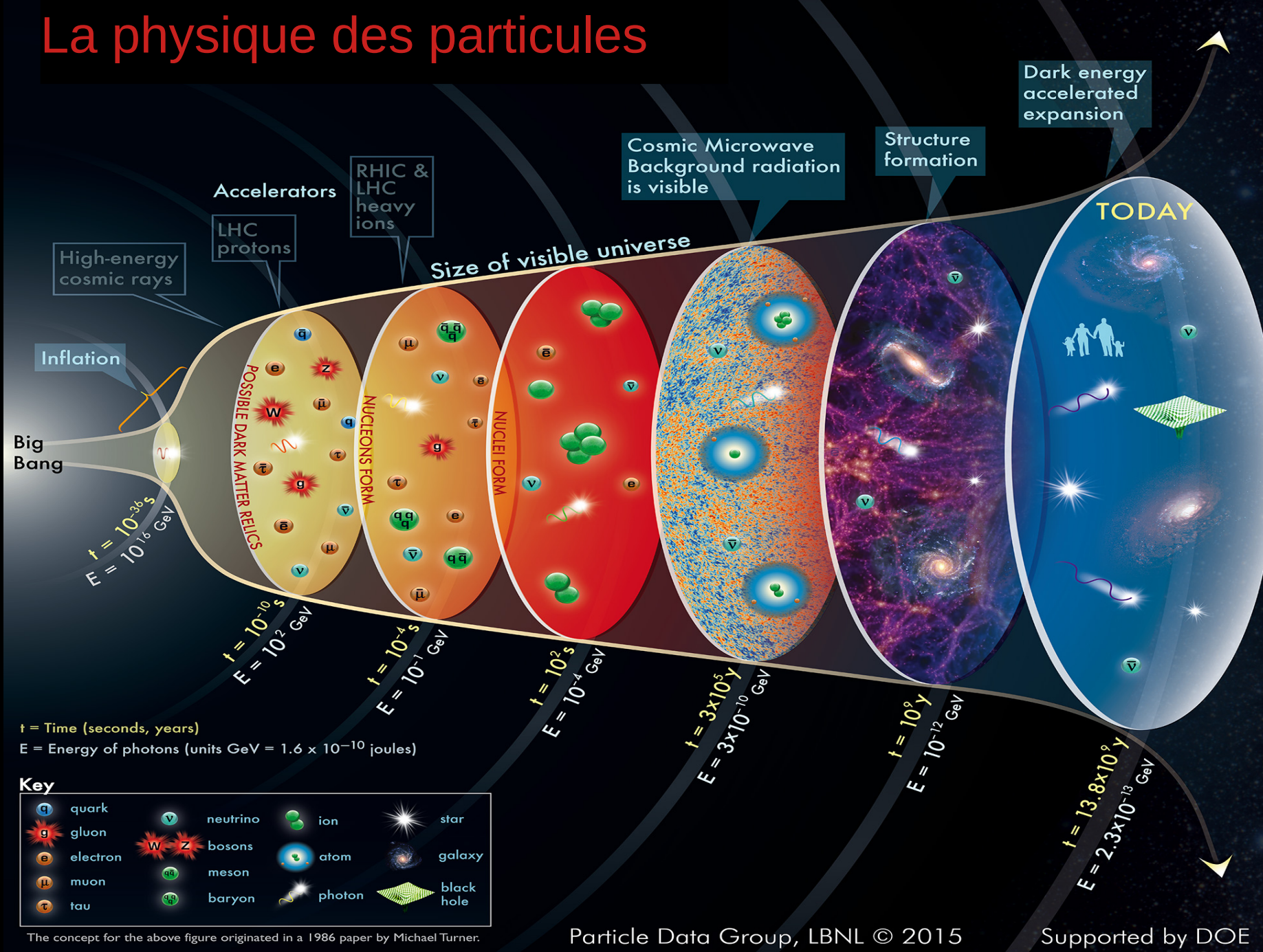




- **Chercheur au CPPM** (IN2P3/CNRS)
depuis octobre 2009 sur l'expérience ATLAS et depuis 2023 également sur DarkSide
- Avant ça :
 - ▶ **Classes préparatoires** à Orléans
 - ▶ **Double diplôme** Ecole Centrale Paris
et Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Stockholm, Suède
 - ▶ **Projet de fin d'études sur ATLAS**
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



La physique des particules



t = Time (seconds, years)

E = Energy of photons (units GeV = 1.6×10^{-10} joules)

Key

	quark		neutrino		ion		star
	gluon		bosons		atom		galaxy
	electron		meson		photon		black hole
	muon		baryon				
	tau						

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

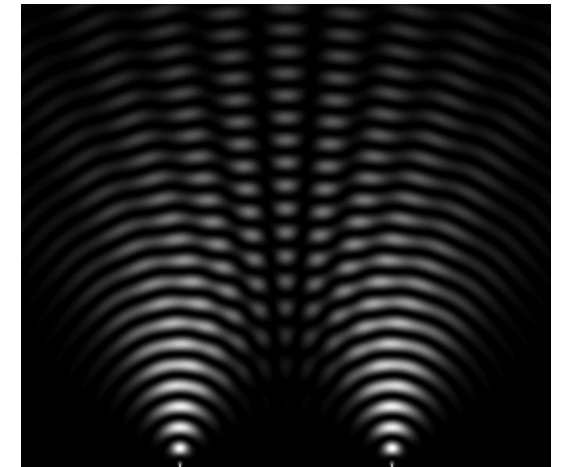
Particle Data Group, LBNL © 2015

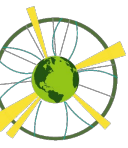
Supported by DOE



État des lieux à la fin du XIX^e siècle

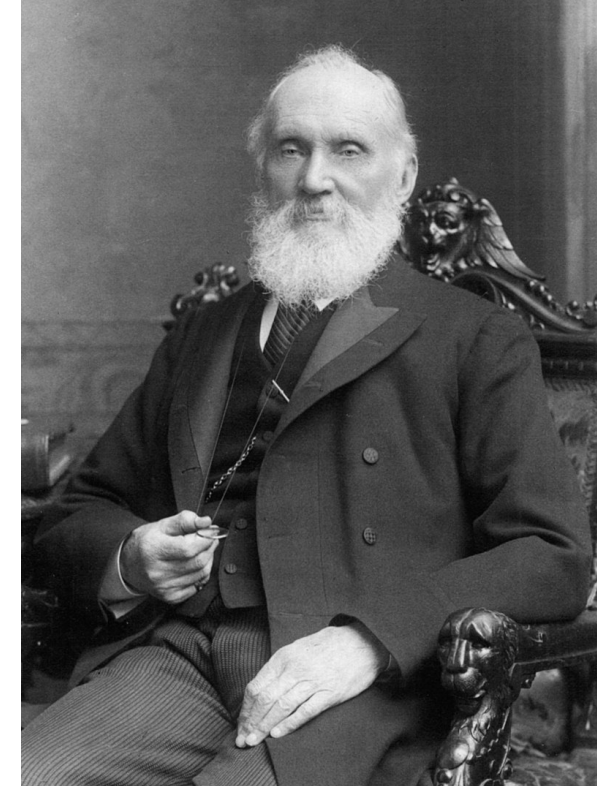
- Mécanique newtonienne [Newton (1643-1727)]
 - ▶ principe d'inertie
 - ▶ loi de la dynamique
 - ▶ gravitation universelle
- Mécanique analytique [Lagrange (1736-1813)]
 - ▶ principe de moindre action
- Optique ondulatoire [Fresnel (1788-1827) – Young (1773-1829)]
 - ▶ nature ondulatoire de la lumière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



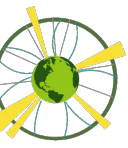


Révolutions conceptuelles

- 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'éther
 - Problèmes avec le théorème d'équipartition de l'énergie (rayonnement du corps noir)



- Deux théories fondamentales voient le jour au début du XX^e siècle
 - ▶ La relativité restreinte
 - ▶ La mécanique quantique



Relativité restreinte : masse et énergie

$$E = mc^2$$

■ Équivalence masse-énergie

▶ La masse est une forme d'énergie

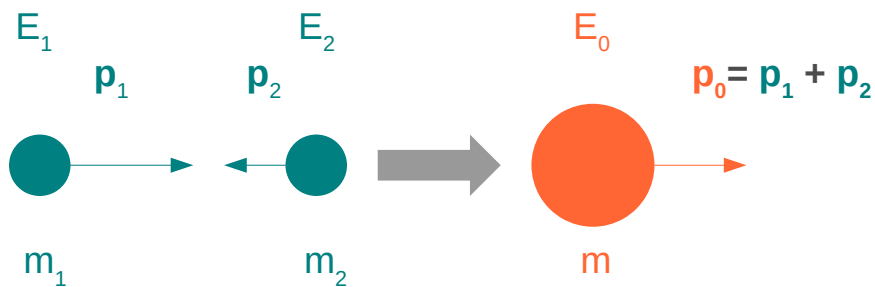
- Si un corps perd une quantité d'énergie E , sa masse diminue de $\Delta m = E/c^2$
- $E_0 = m c^2$: énergie au repos (dans le référentiel où le corps est immobile)

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

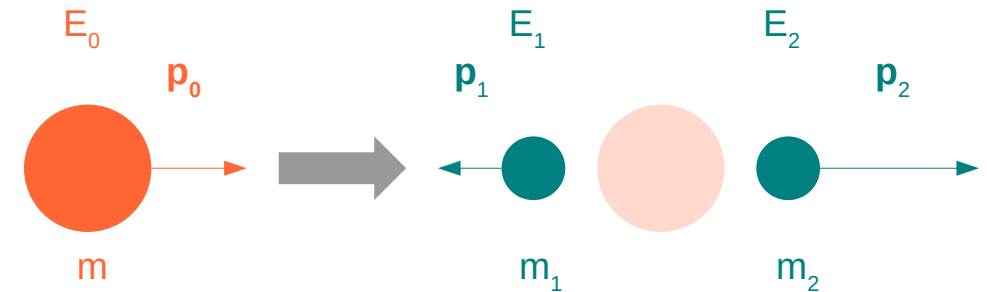
▶ Transformation de l'énergie cinétique en masse

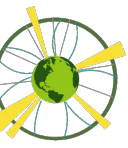
▶ Transformation de la masse en énergie cinétique

Collision



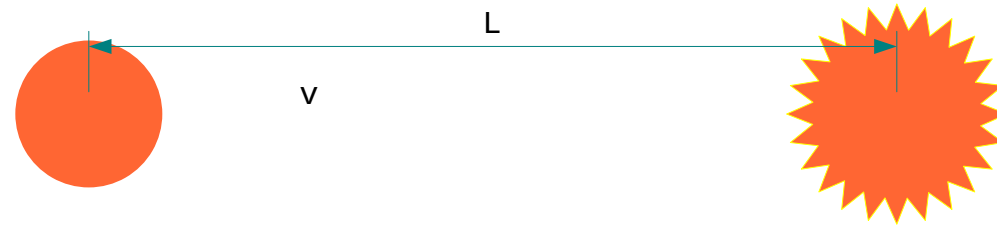
Désintégration





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)



Mécanique quantique : dualité onde-corpuscule

- Aux échelles microscopiques, nature à la fois *corpusculaire* et *ondulatoire*

$$E = h\nu$$

$$p = h/\lambda$$

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

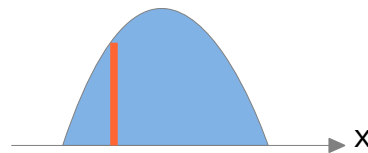
- ▶ pas d'équivalent dans le monde macroscopique → non intuitif !

- Deux descriptions antagonistes !

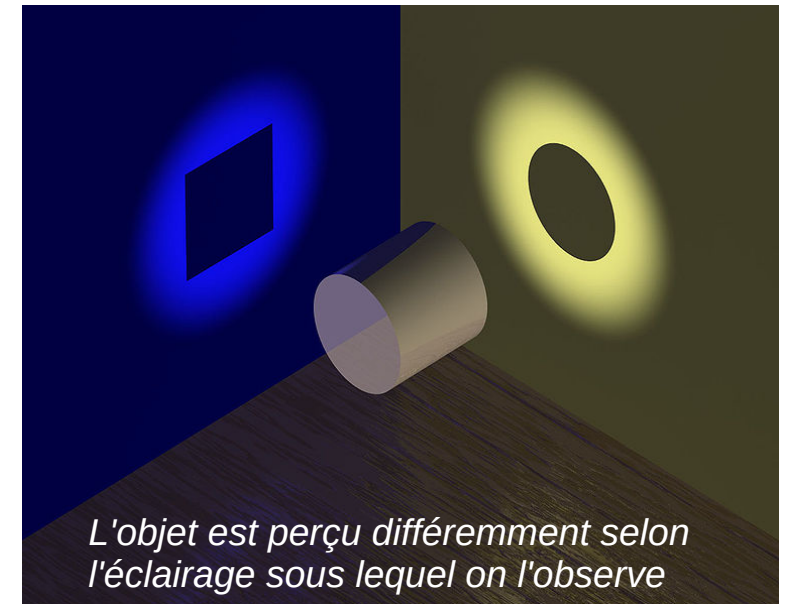
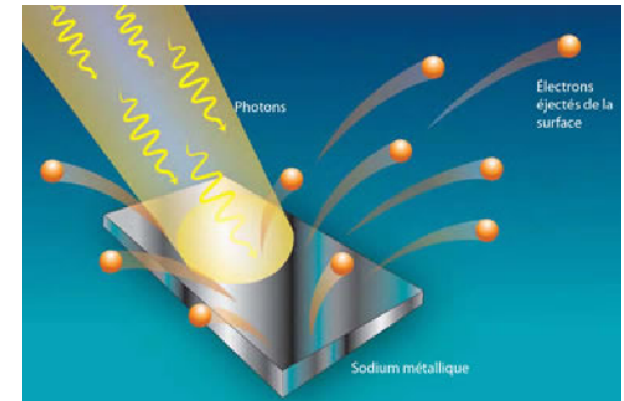
- **corpuscule** : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies
- **onde** : objet étendu pouvant interférer

- ▶ **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

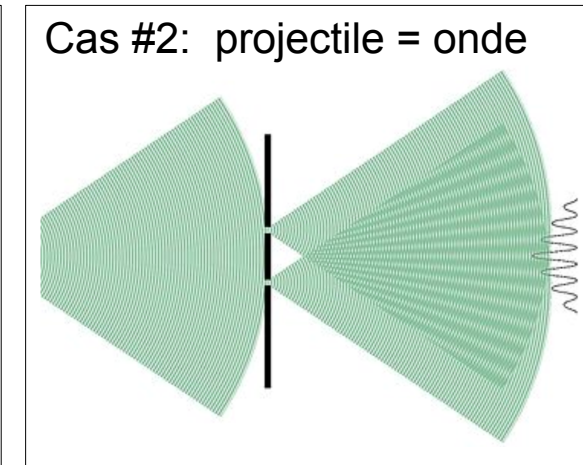
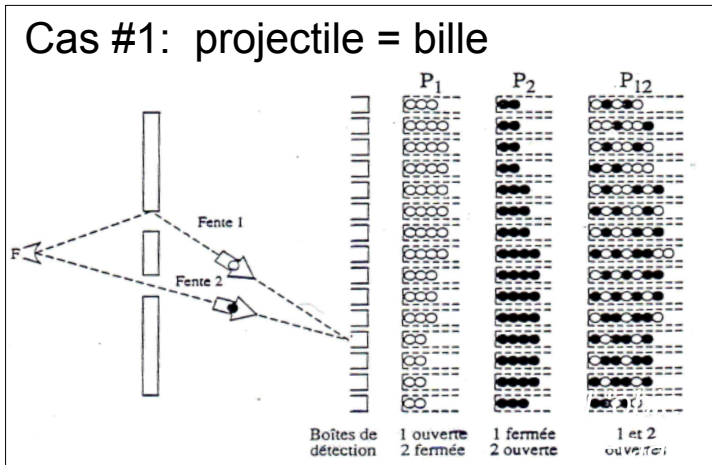
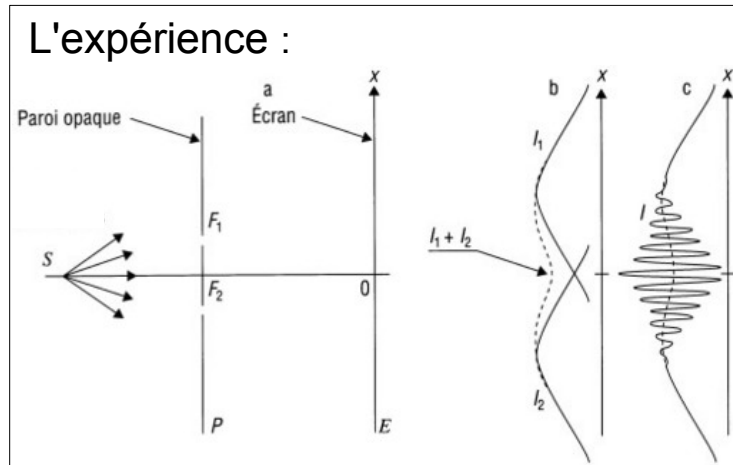


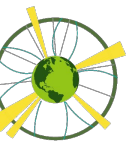
L'objet est perçu différemment selon l'éclairage sous lequel on l'observe



Mécanique quantique : illustration

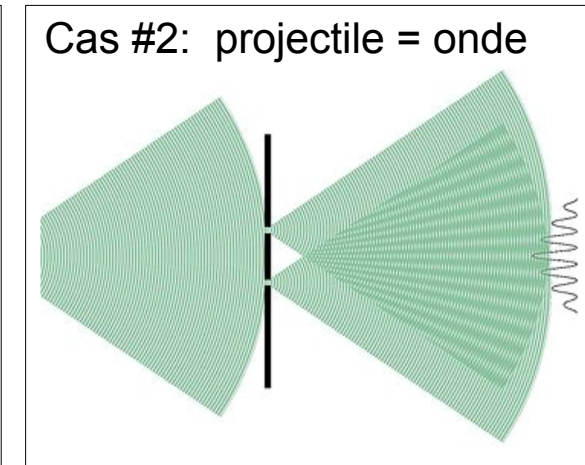
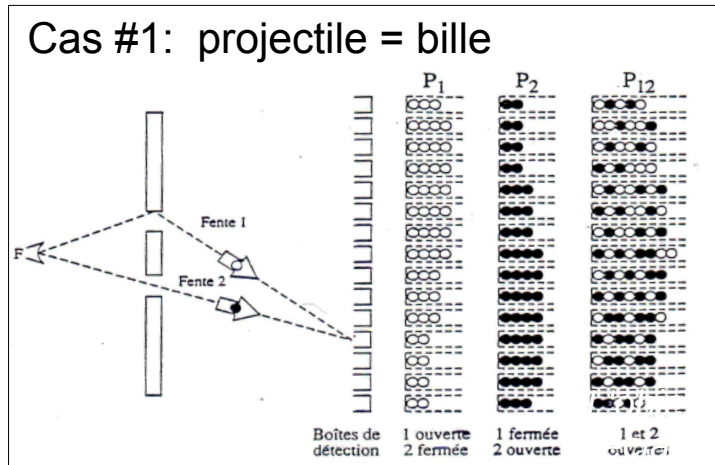
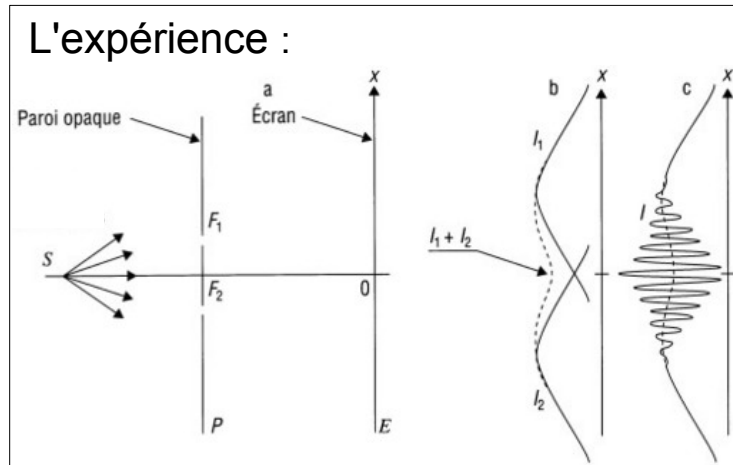
L'expérience des fentes d'Young





Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young

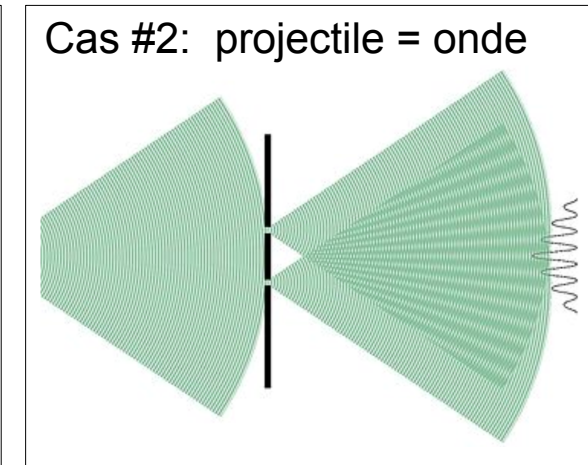
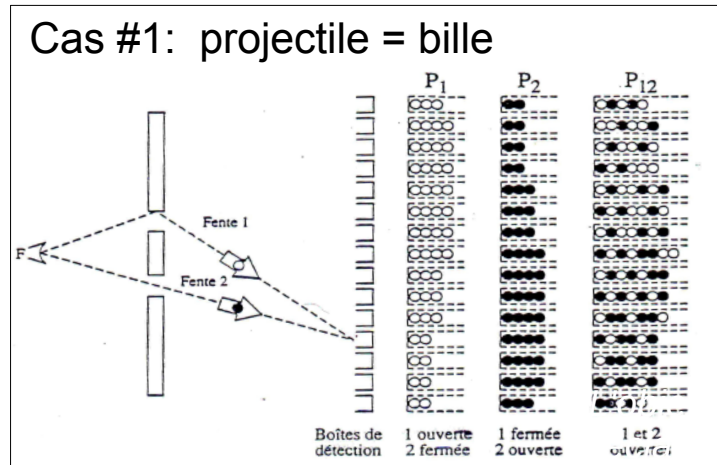
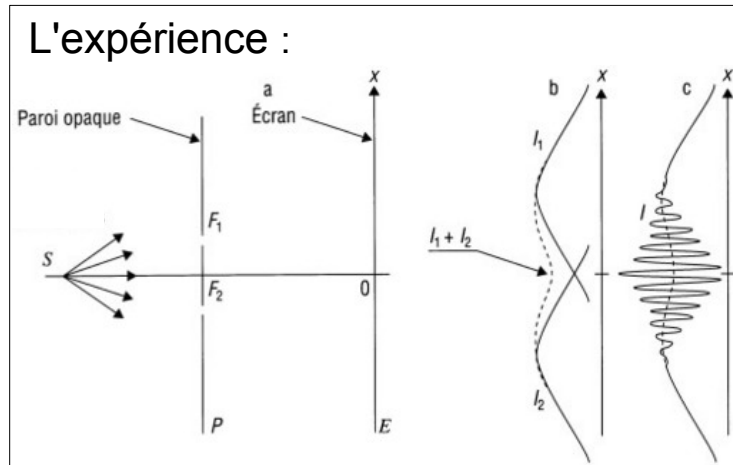


Cas #3:
projectile = objet quantique
(par ex électron, photon)



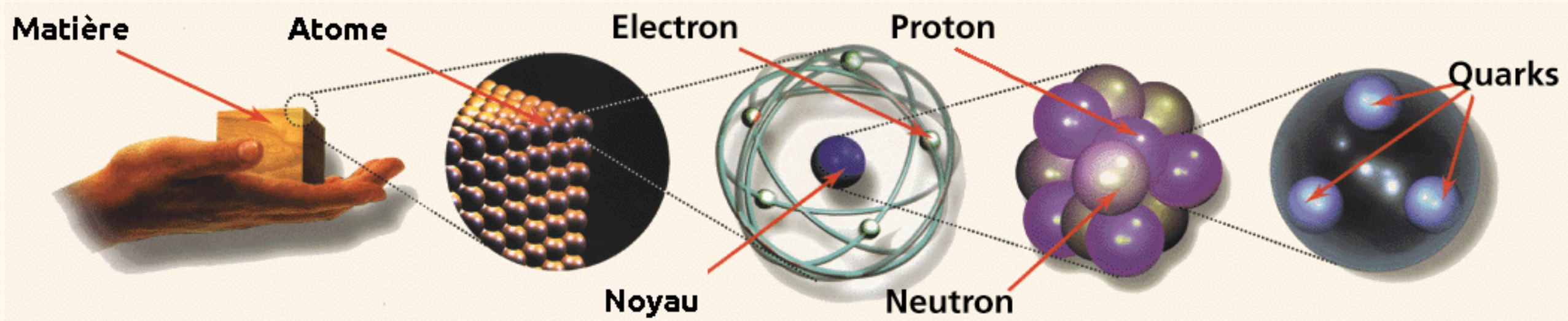
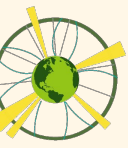
Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young

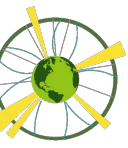


-2660 nm

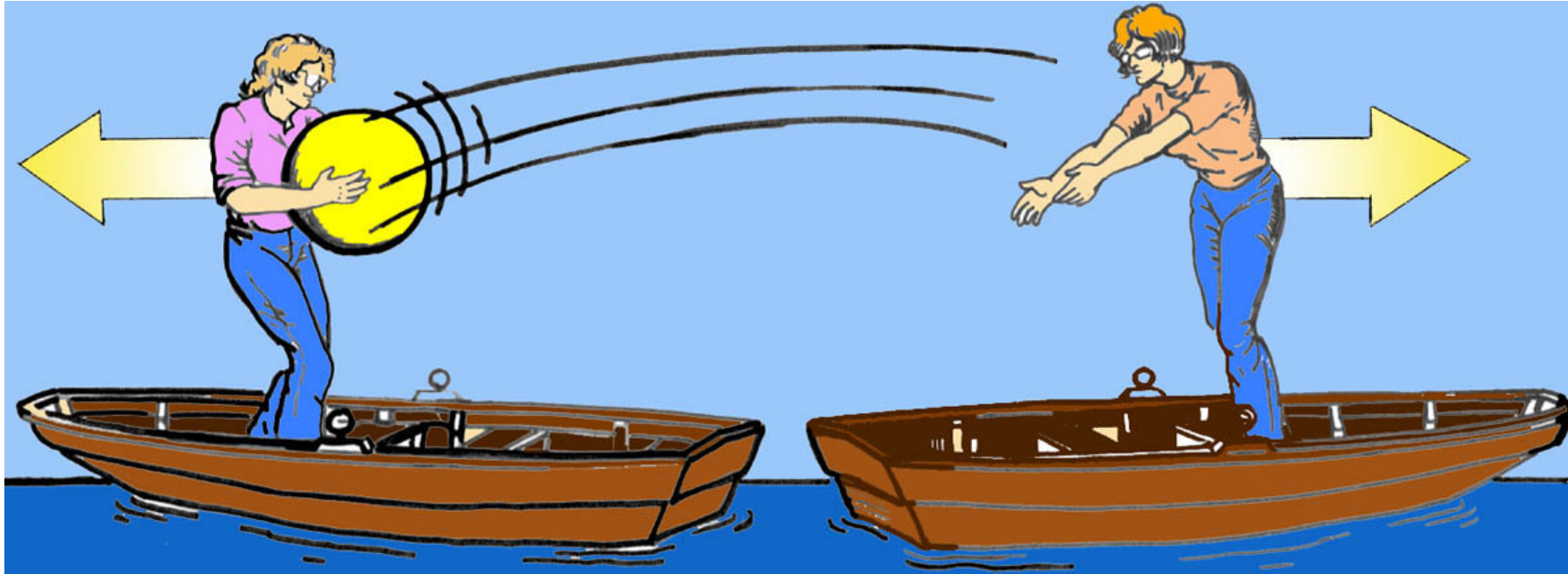
*De l'infiniment grand
à l'infiniment petit...*



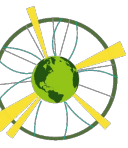
Interaction fondamentale



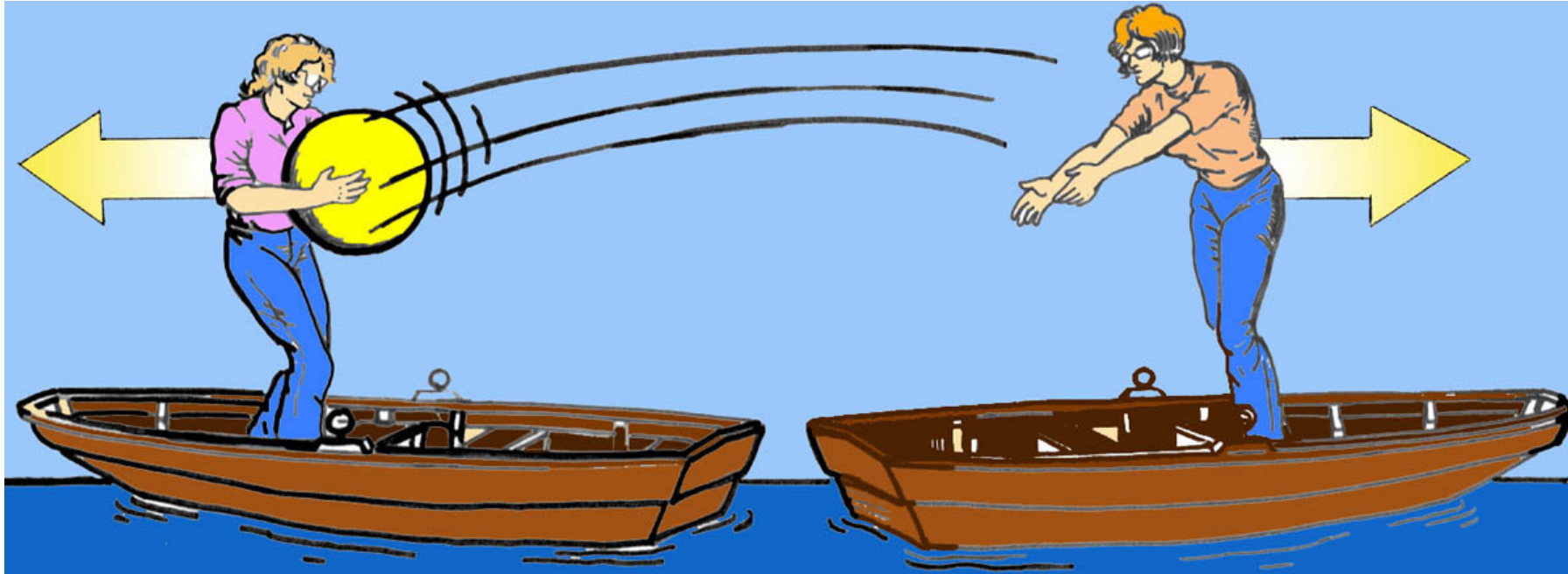
- Échange de particules (**bosons**) entre particules de matière (**fermions**, comme les quarks ou les électrons)



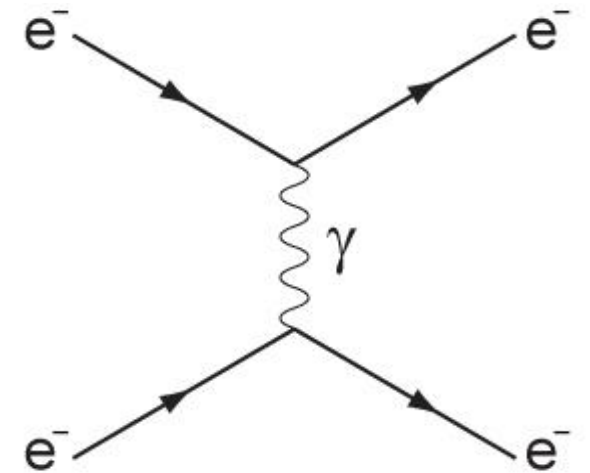
Interaction fondamentale



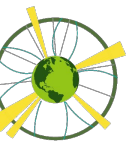
- Échange de particules (**bosons**) entre particules de matière (**fermions**, comme les quarks ou les électrons)



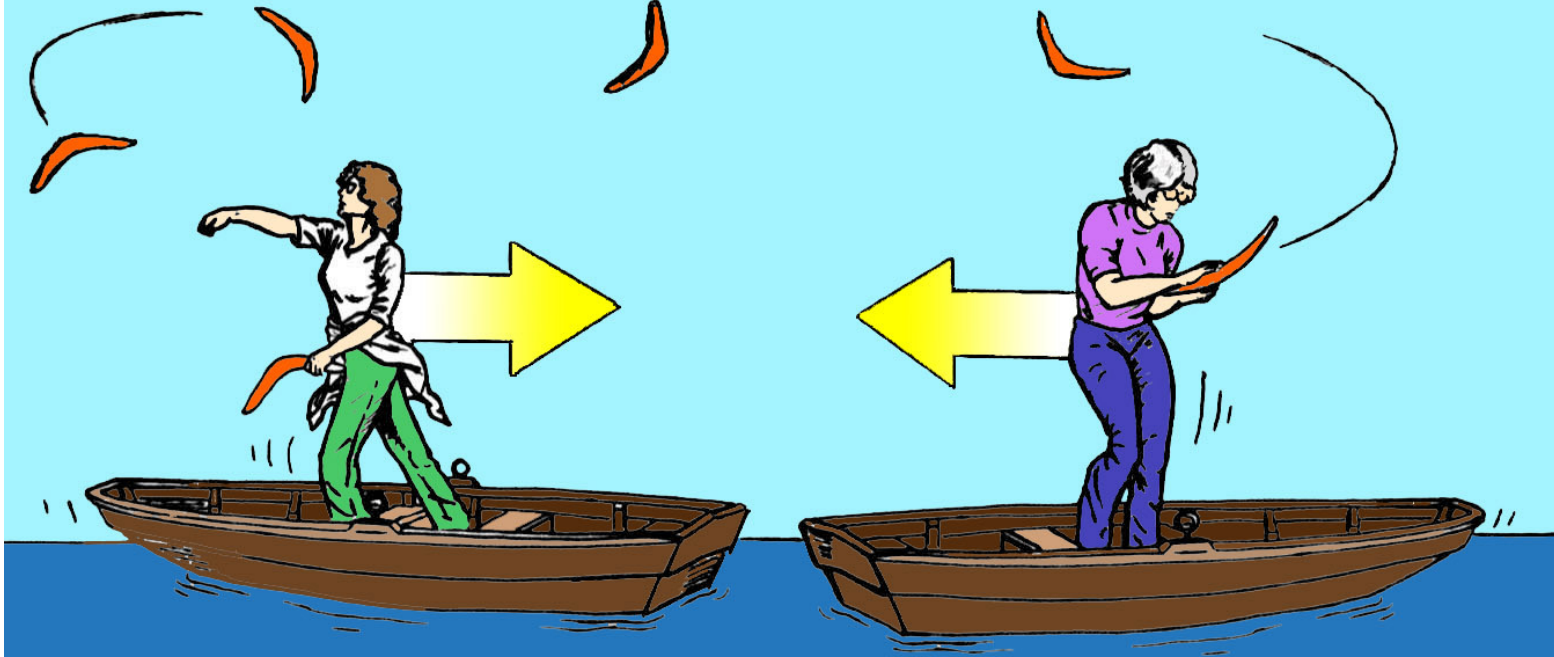
- En physique des particules :



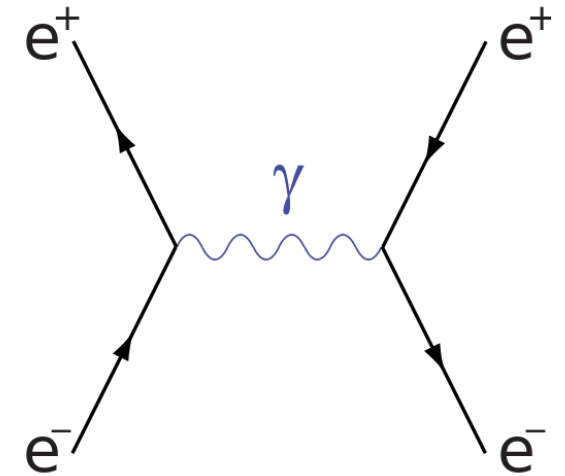
Interaction fondamentale



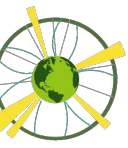
- Échange de particules (**bosons**) entre particules de matière (**fermions**, comme les quarks ou les électrons)

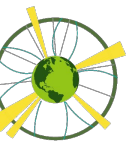


- En physique des particules :

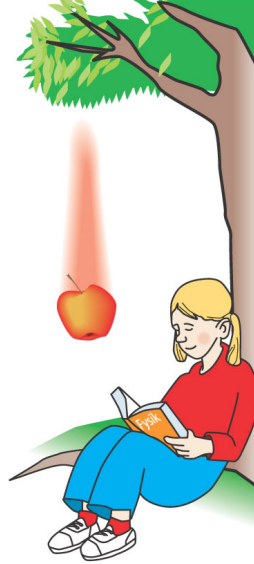
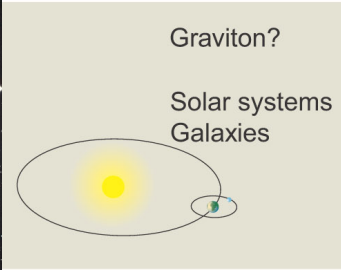
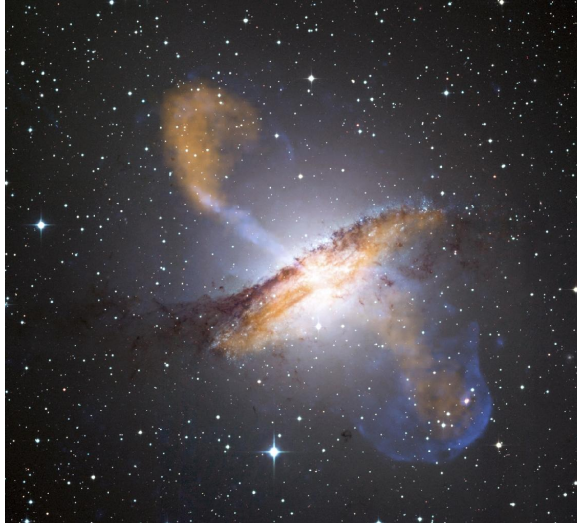


Les forces



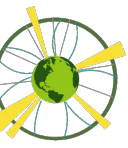


Les forces

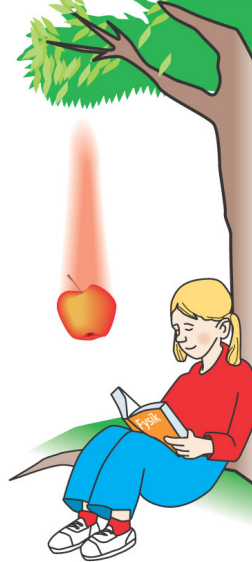
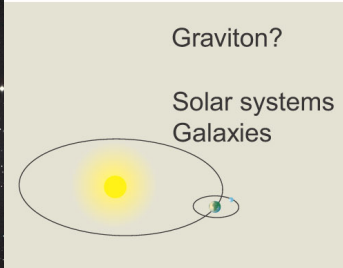
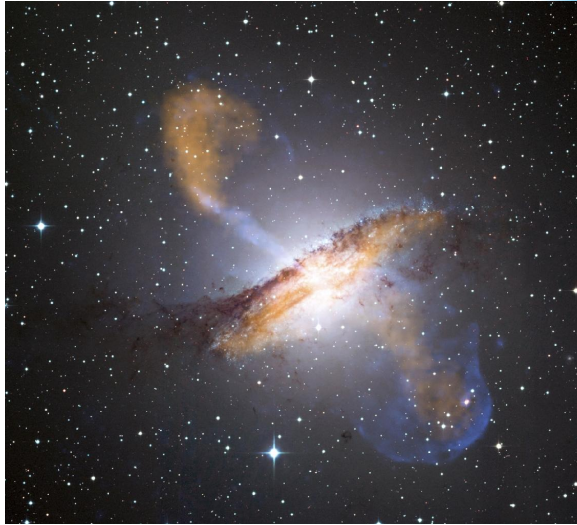


Force gravitationnelle

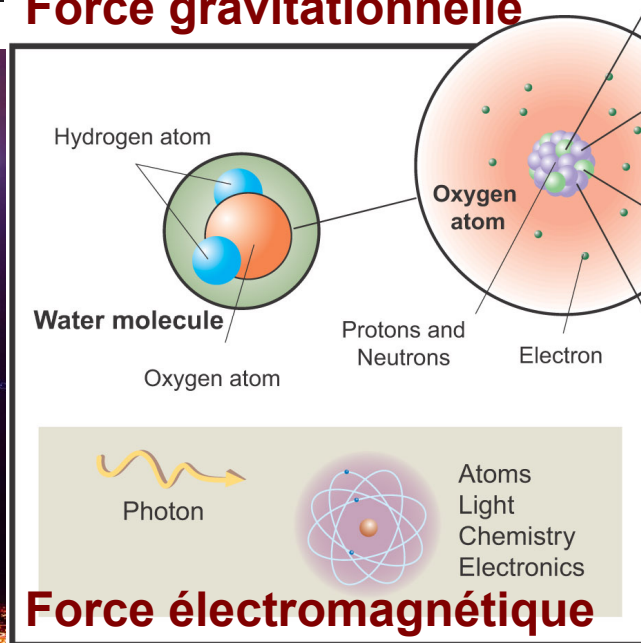




Les forces



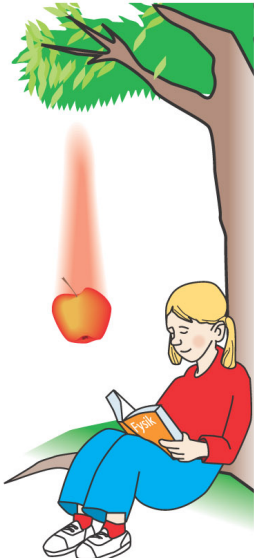
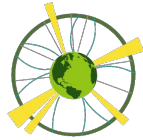
Force gravitationnelle



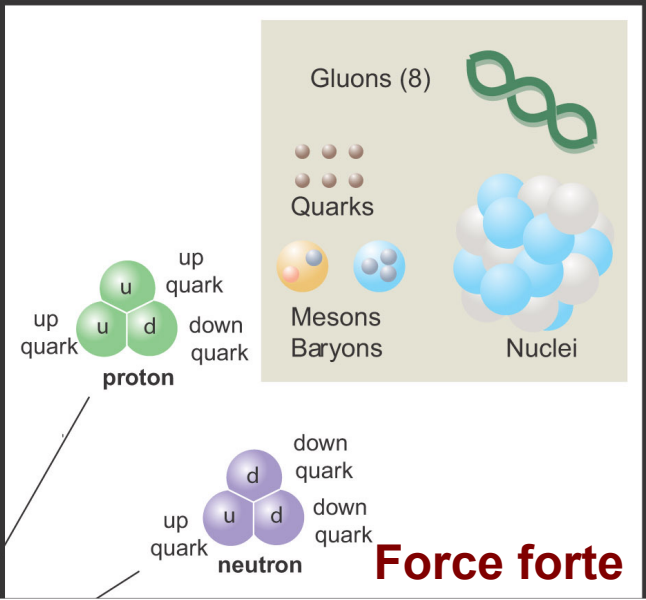
Force électromagnétique

Les forces

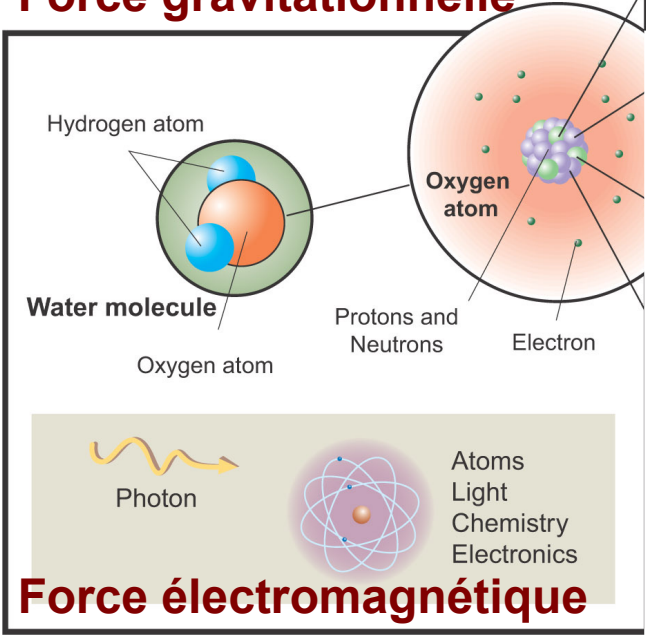
Illustration: Typoform



Force gravitationnelle



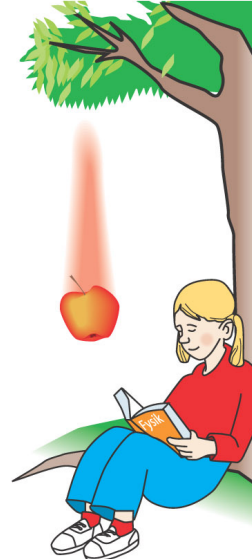
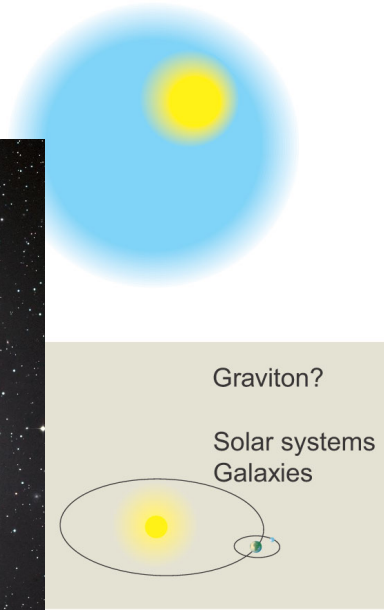
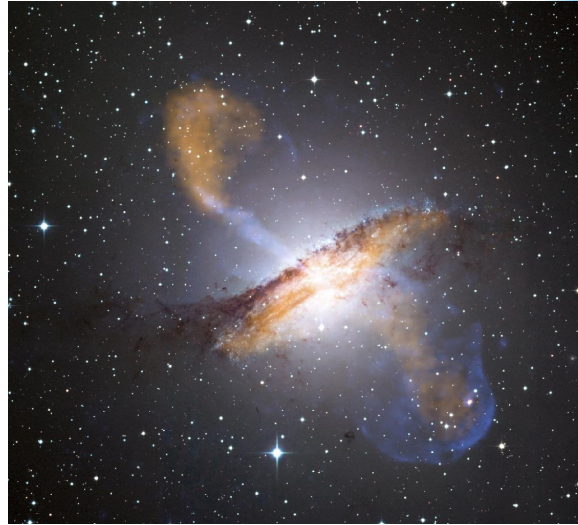
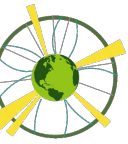
Force forte



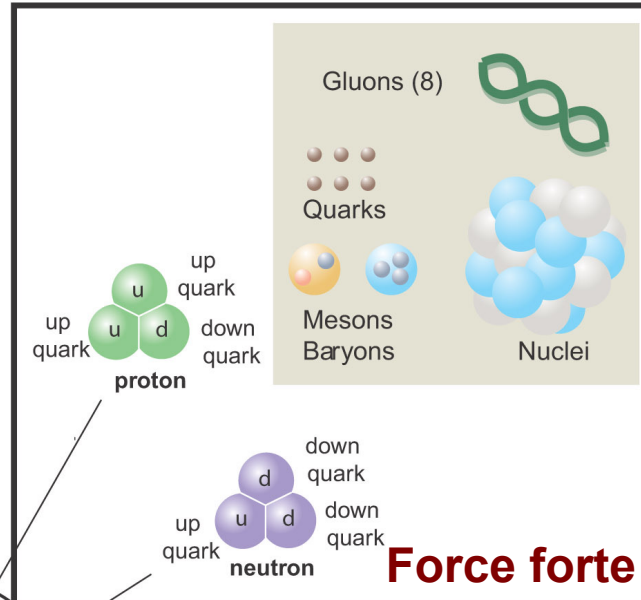
Force électromagnétique

Les forces

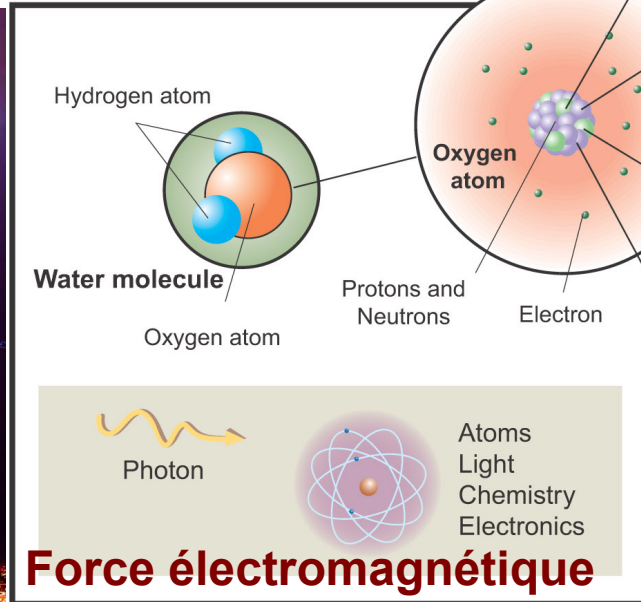
Illustration: Typoform



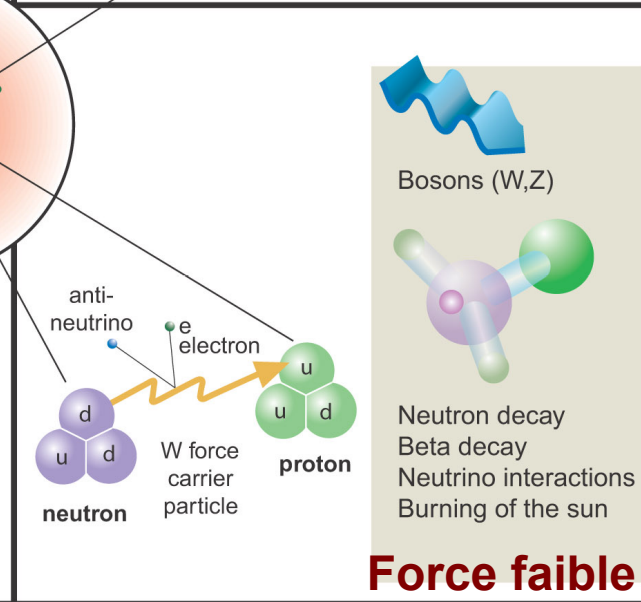
Force gravitationnelle



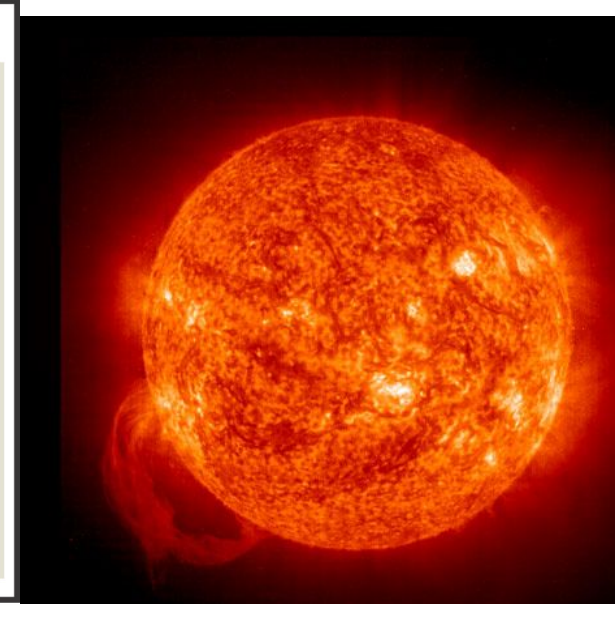
Force forte



Force électromagnétique

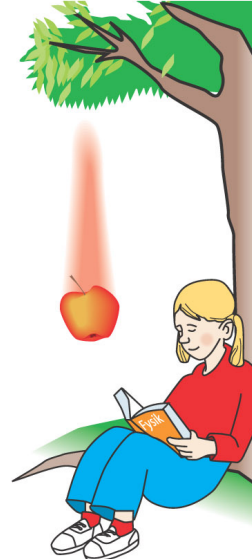
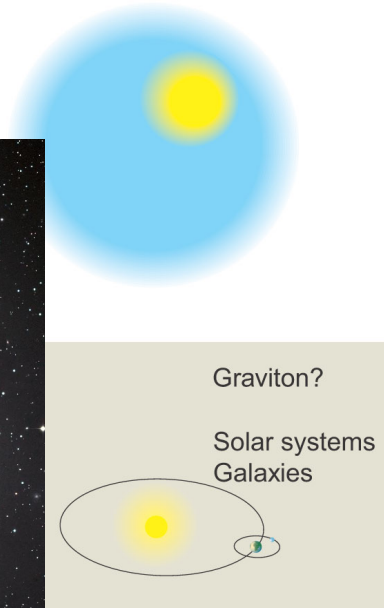
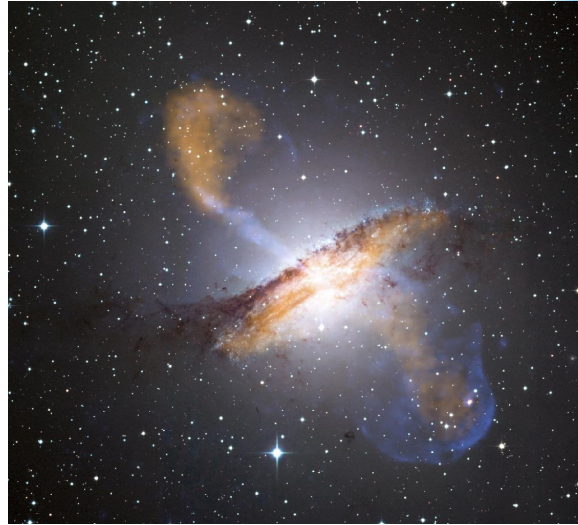


Force faible

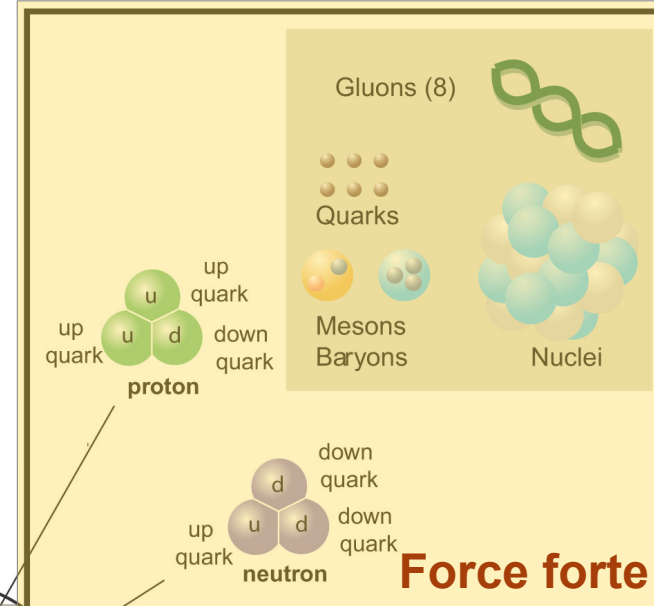


Les forces

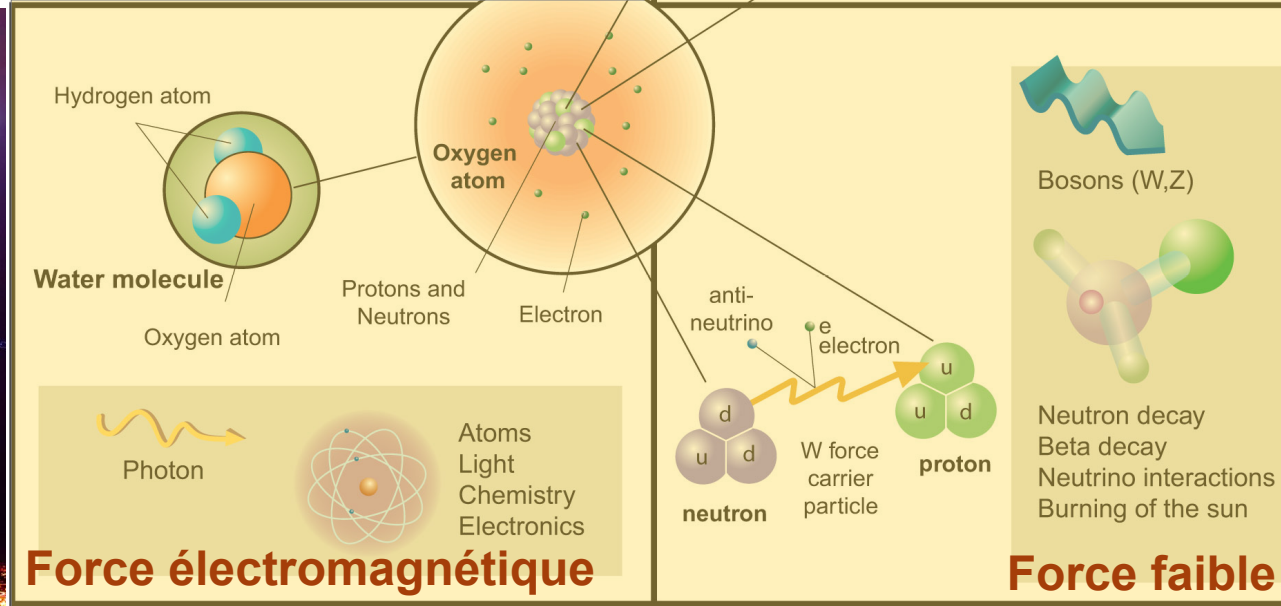
Illustration: Typoform



Force gravitationnelle

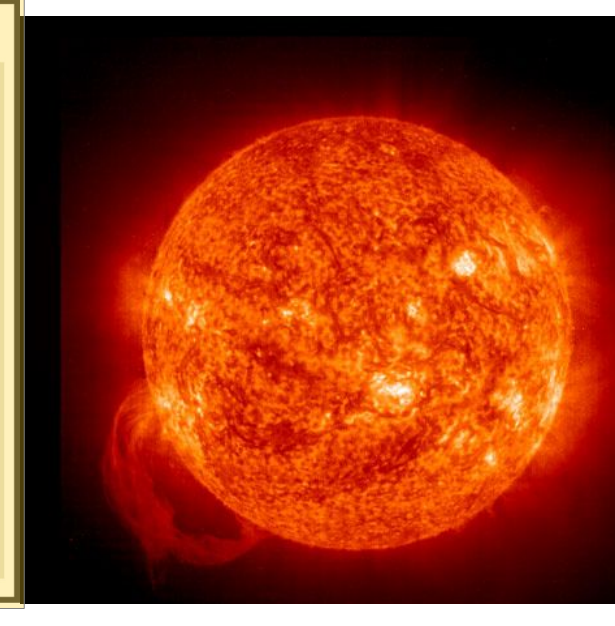


Force forte



Force électromagnétique

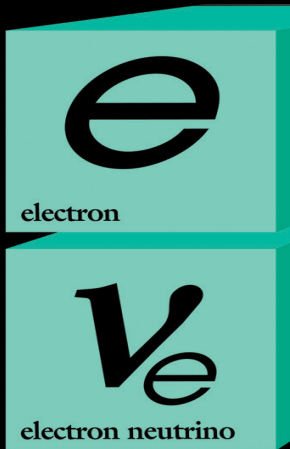
Force faible



Quarks



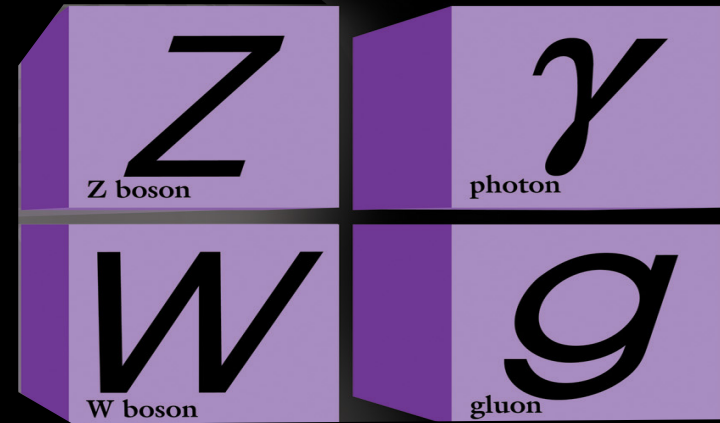
+ anti-matière



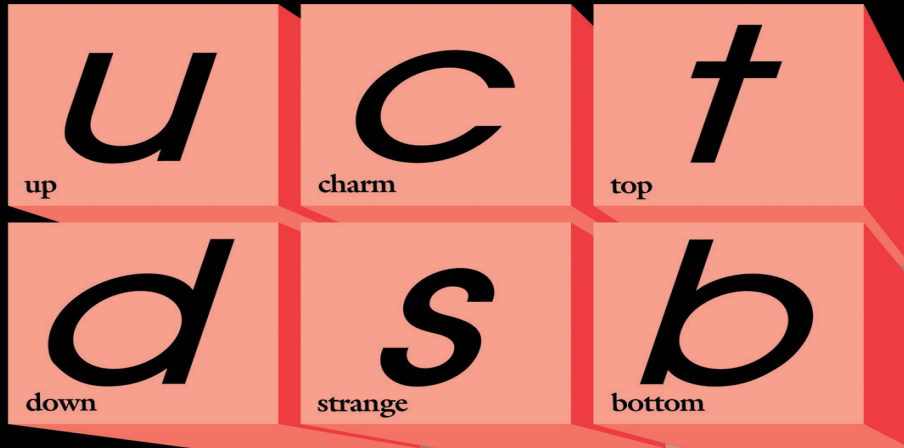
Leptons

Le modèle standard
de la physique des particules

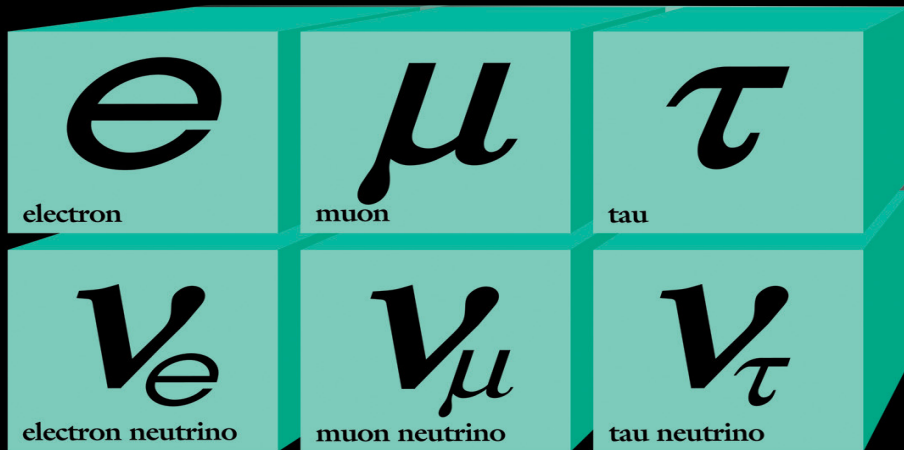
Forces



Quarks



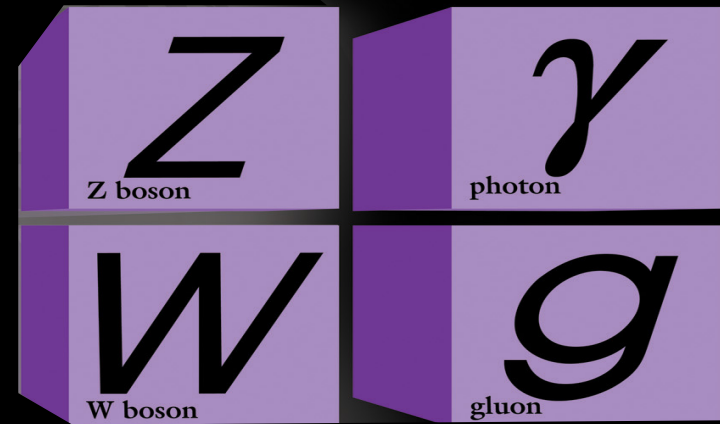
+ anti-matière



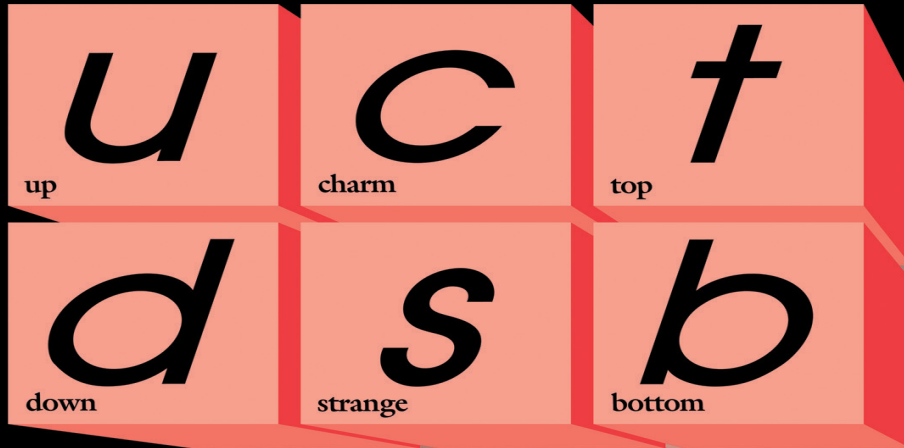
Leptons

Le modèle standard
de la physique des particules

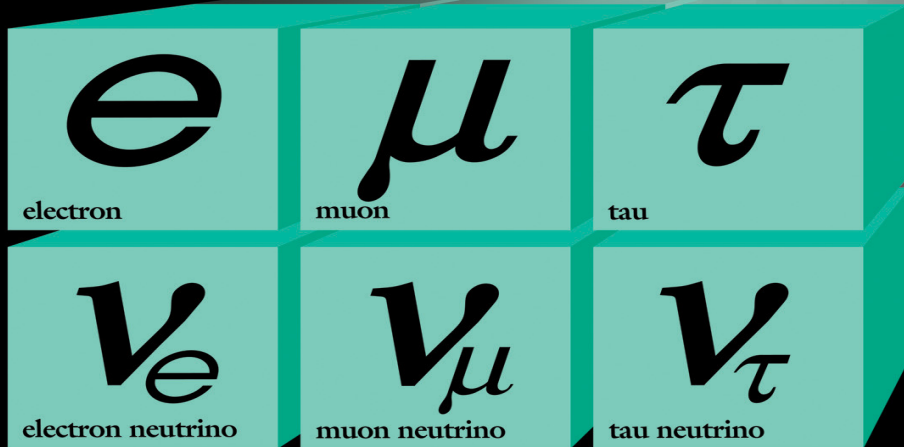
Forces



Quarks



+ anti-matière

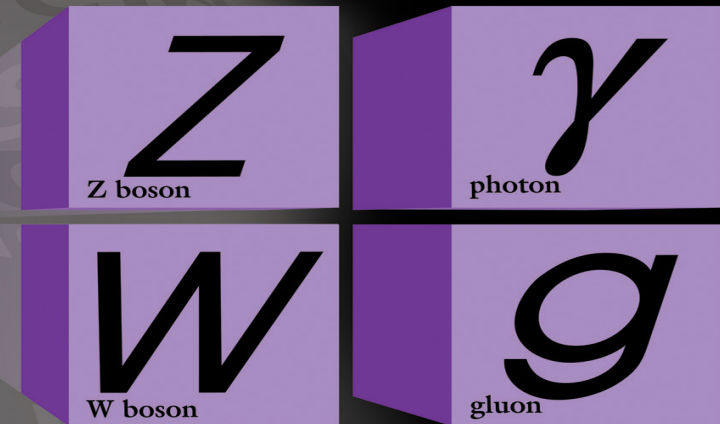


Leptons

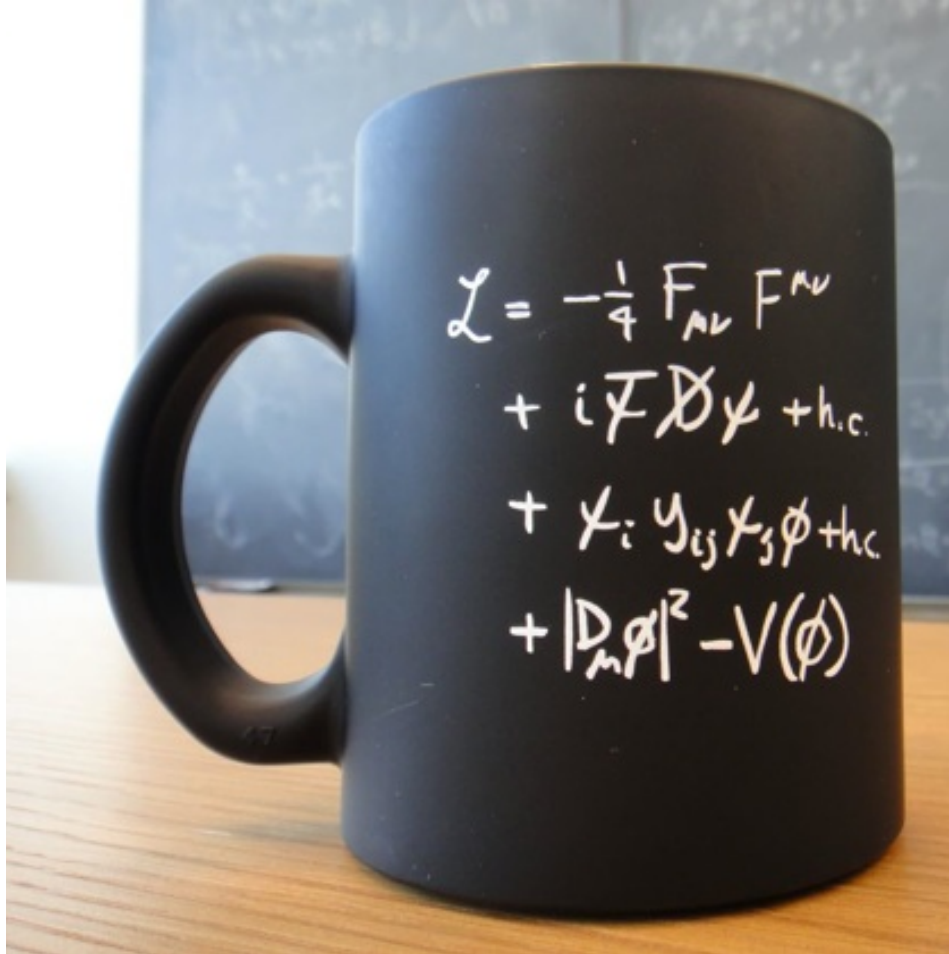
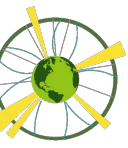
Le modèle standard
de la physique des particules



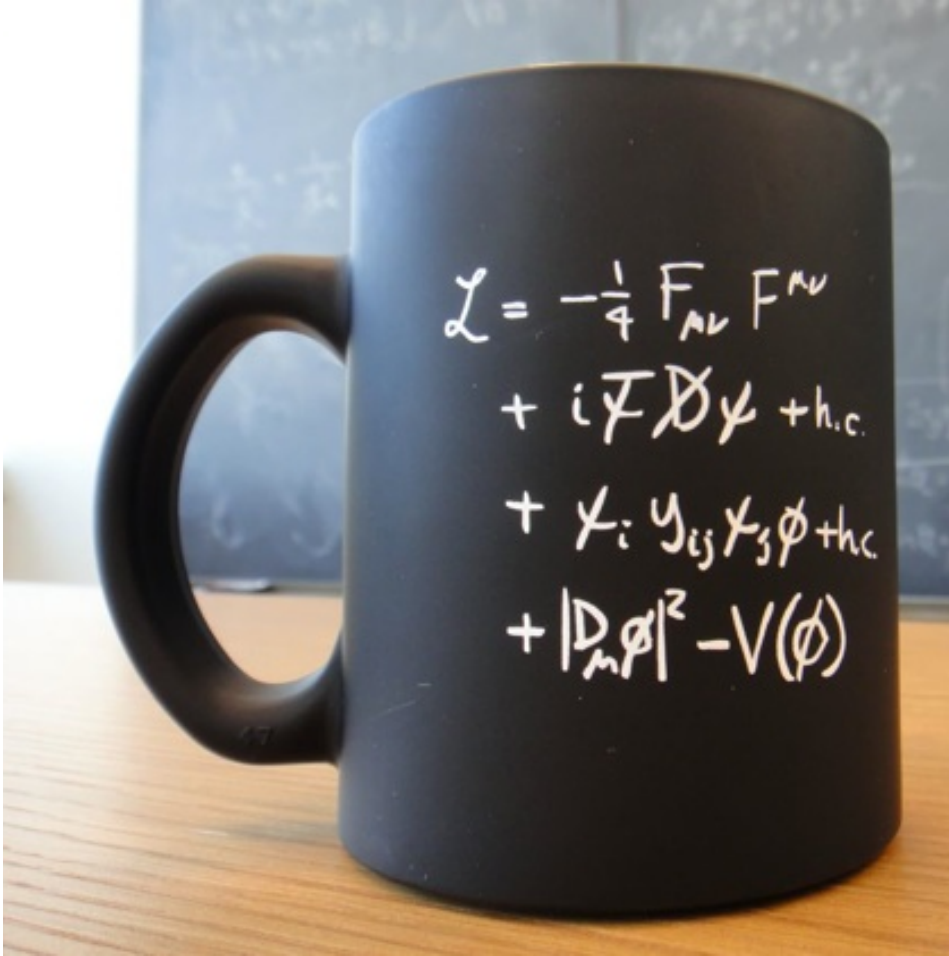
Forces



Le modèle standard



Le modèle standard



$$\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}ig_s^2 (q_i^\mu \gamma^\mu q_j^\mu) g_\mu^a + 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 - \\
 & ig_{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^+)] - 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_\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_\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^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \mathbf{H} - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \mathbf{H}) - W_\mu^- (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \mathbf{H})] + \\
 & \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu \mathbf{H}) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_{s_w} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig_{s_w} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu \partial_\mu + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu \partial_\mu \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial_\mu + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu \partial_\mu + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_{s_w} A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{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{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_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa 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_u^\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^\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{ig}{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_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 + ig_{c_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) + ig_{c_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^+) + ig_{c_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^2} \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}$$

© T.D Gutierrez

Sources de particules

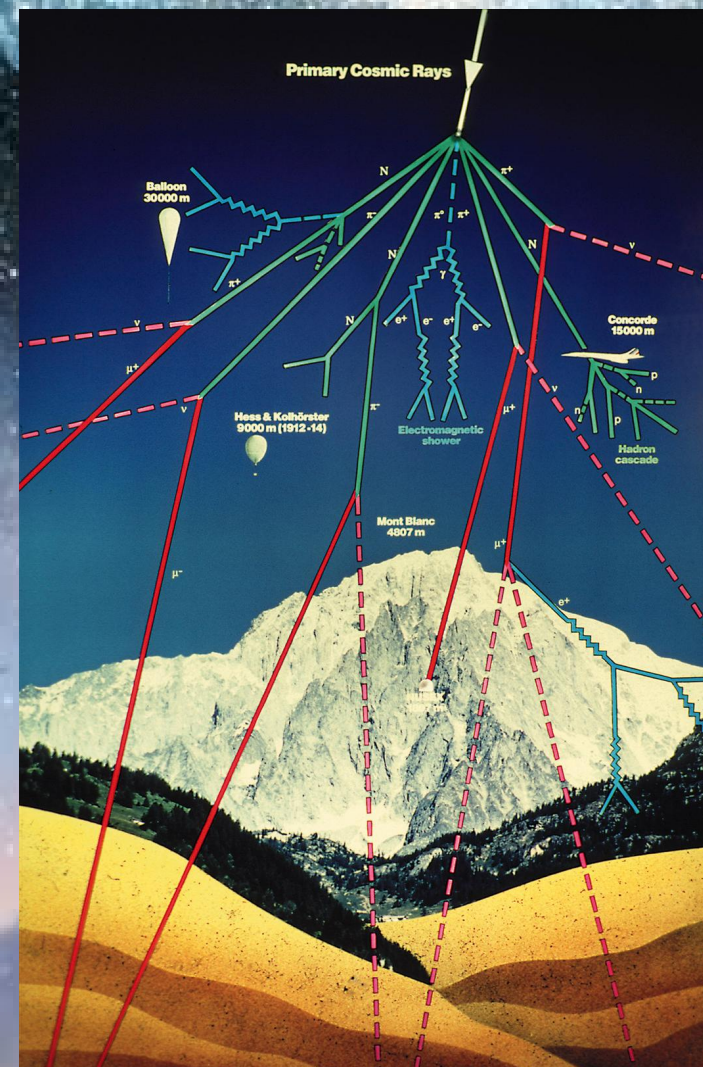




Sources de particules

L'Univers et les rayons cosmiques

(protons, photons,
neutrinos, muons)



Sources de particules

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





Sources de particules

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

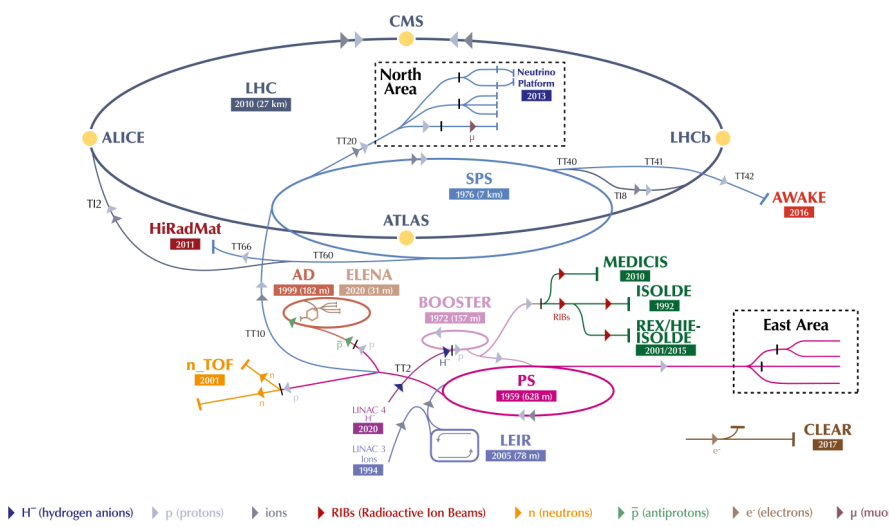
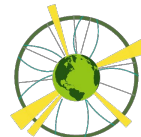
**Les accélérateurs
de particules**
(protons, photons,
électrons, muons,
pions, kaons, etc)



YEARS / ANS CERN
1954-2024



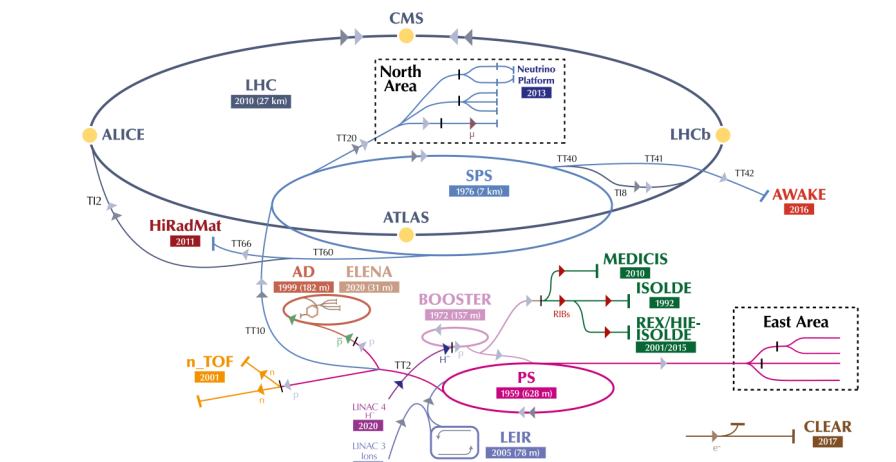
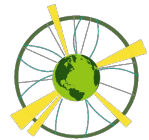
Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



► H^- (hydrogen anions) ► p (protons) ► ions ► RIBs (Radioactive Ion Beams) ► n (neutrons) ► \bar{p} (antiprotons) ► e^- (electrons) ► μ^- (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - Linear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

Le LHC (grand collisionneur de hadrons)

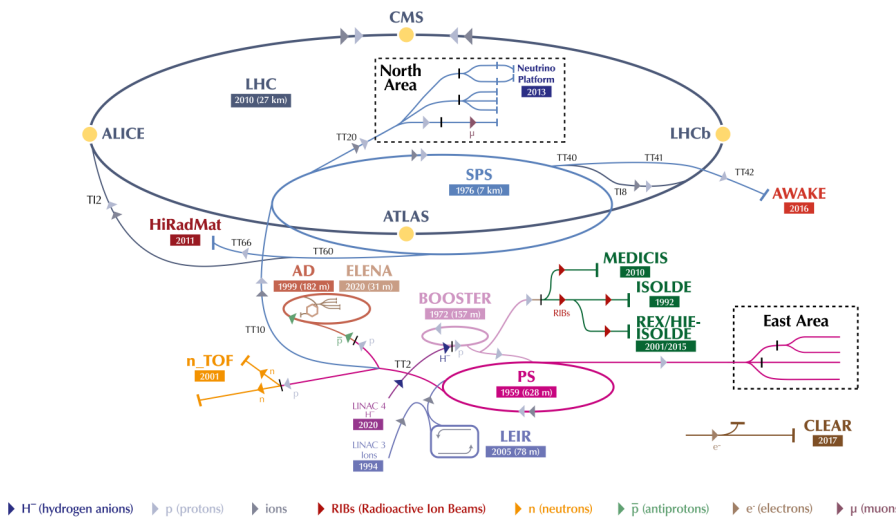
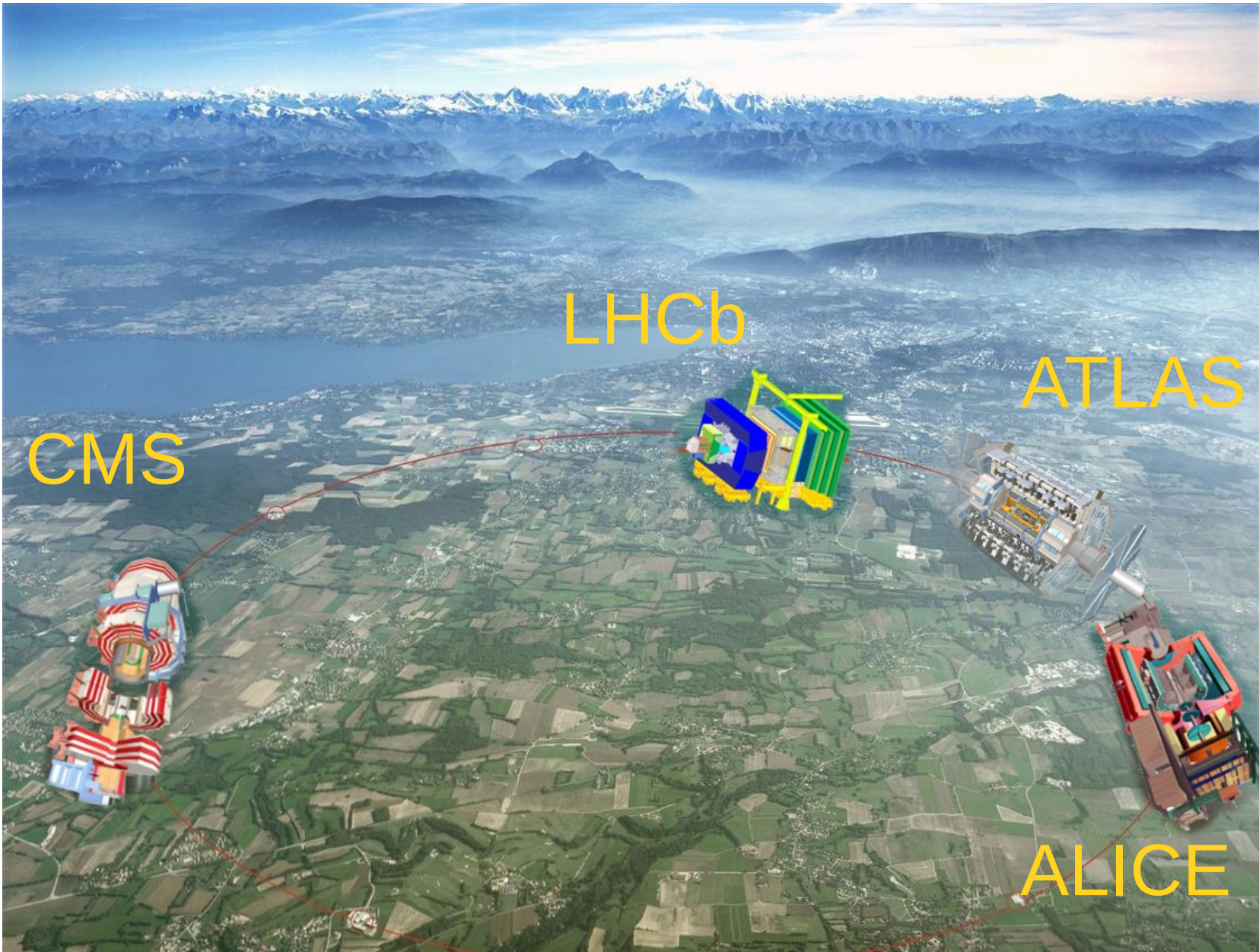
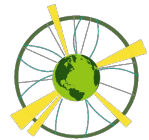


► H^- (hydrogen anions) ► p (protons) ► ions ► RIBs (Radioactive Ion Beams) ► n (neutrons) ► \bar{p} (antiprotons) ► e^- (electrons) ► μ^- (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - Linear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform



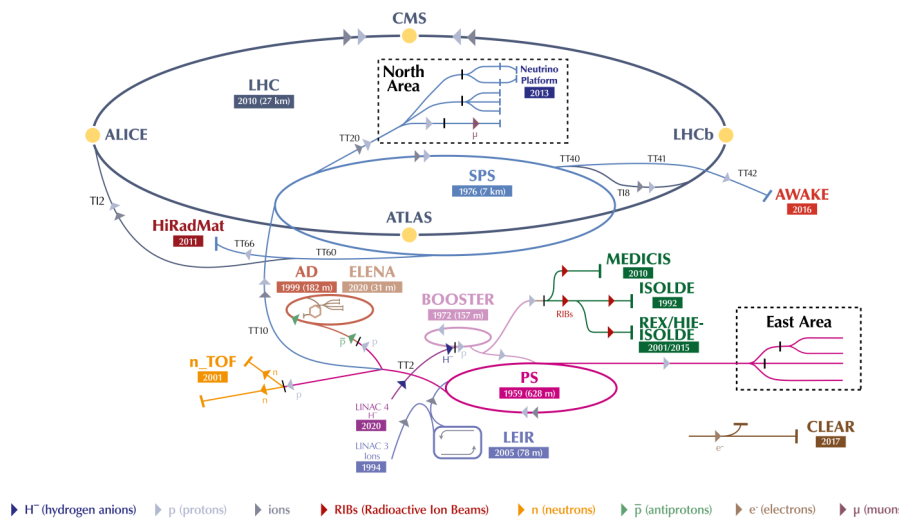
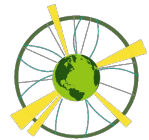
Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - Linear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform



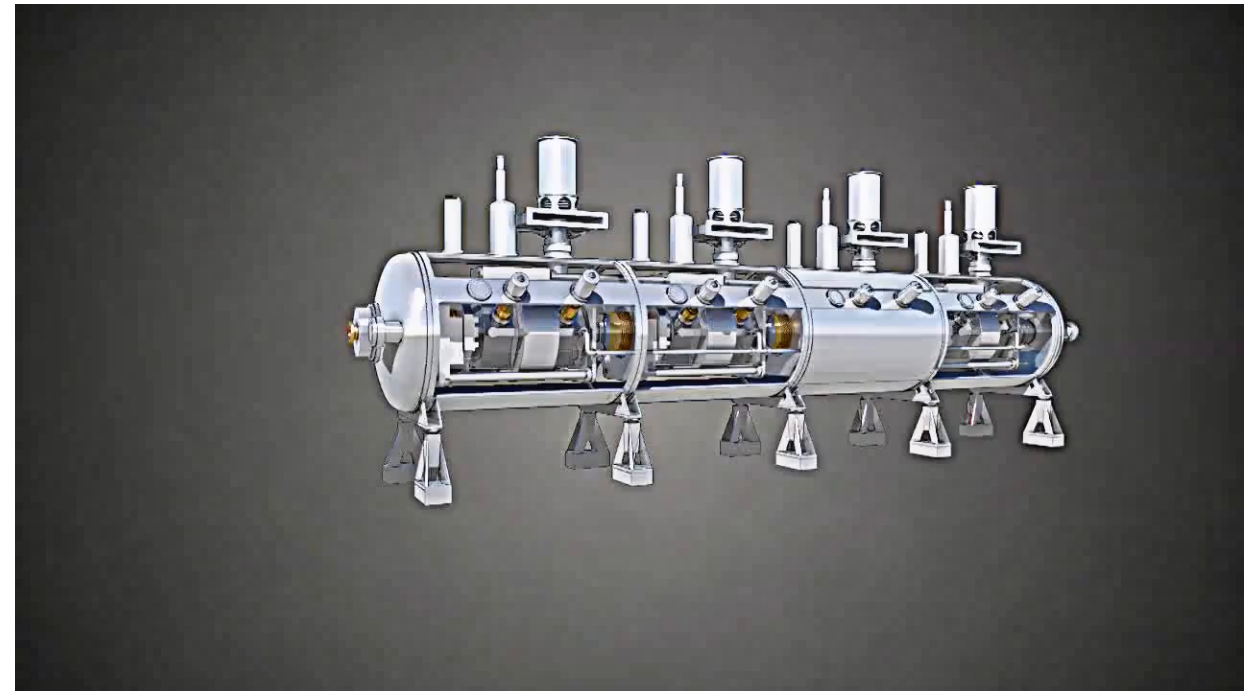
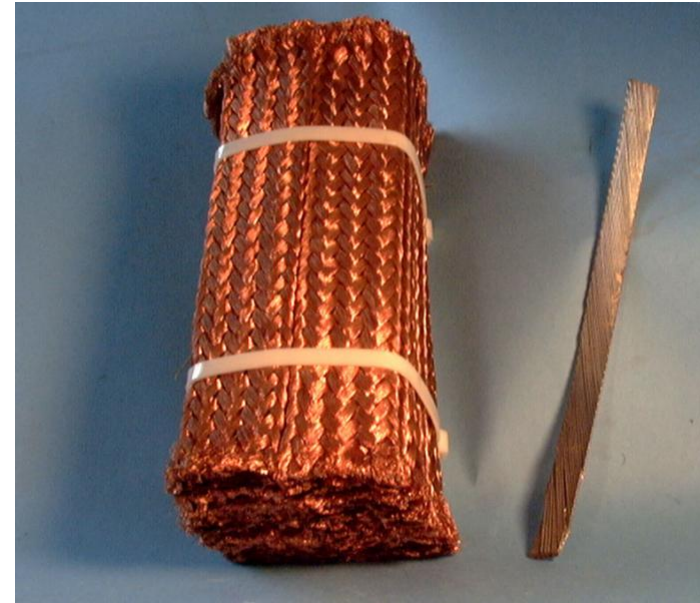
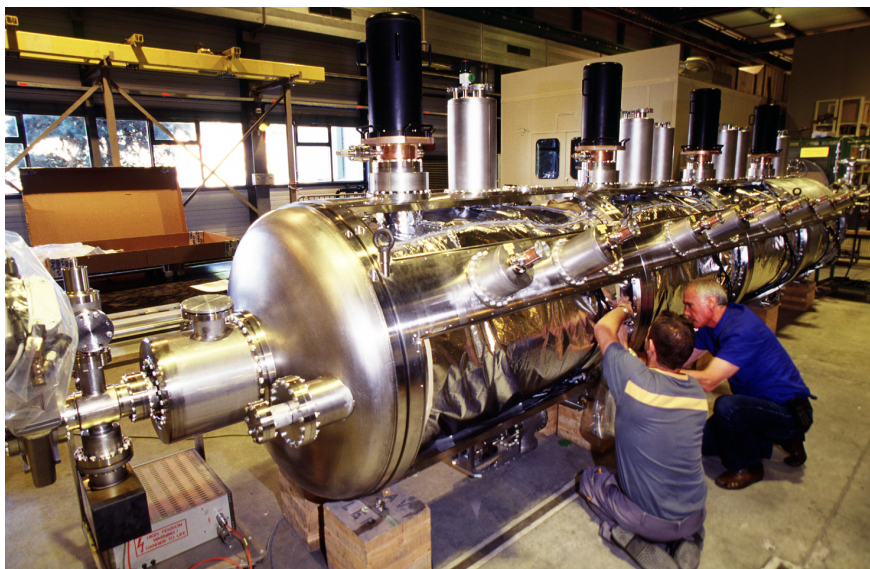
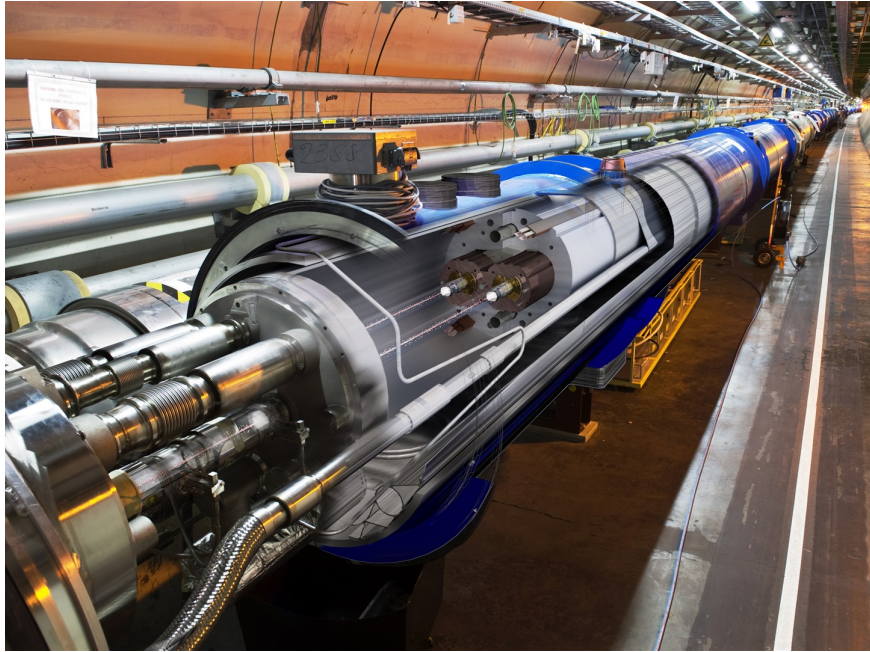
Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - Linear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

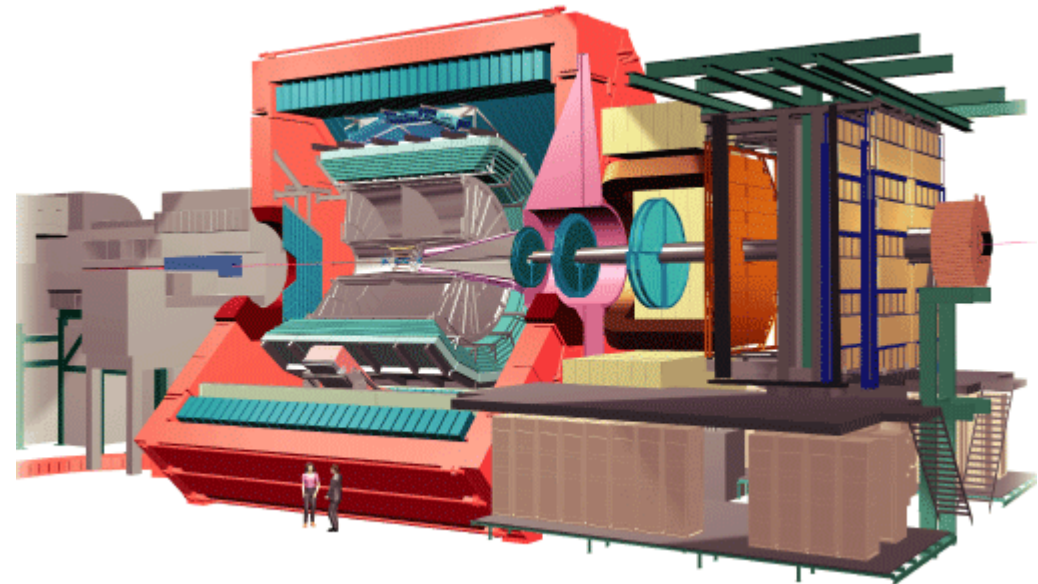
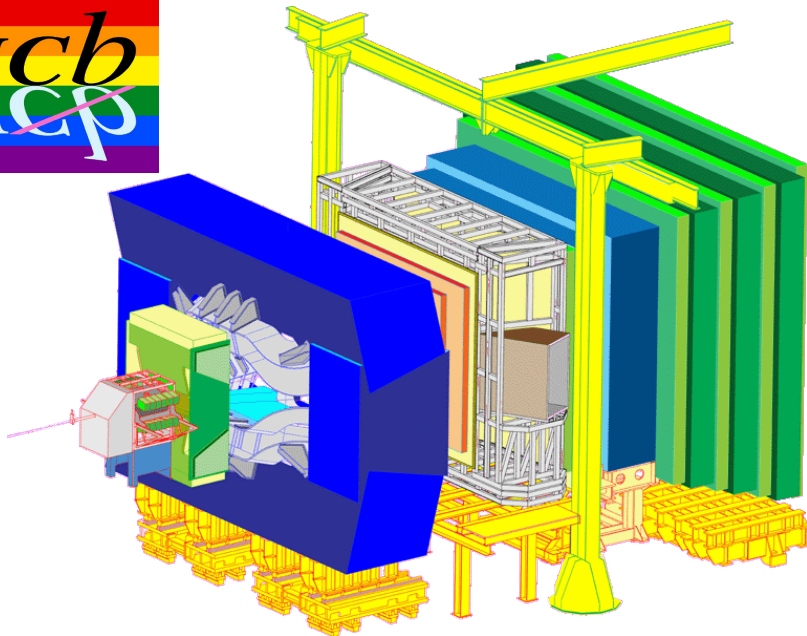
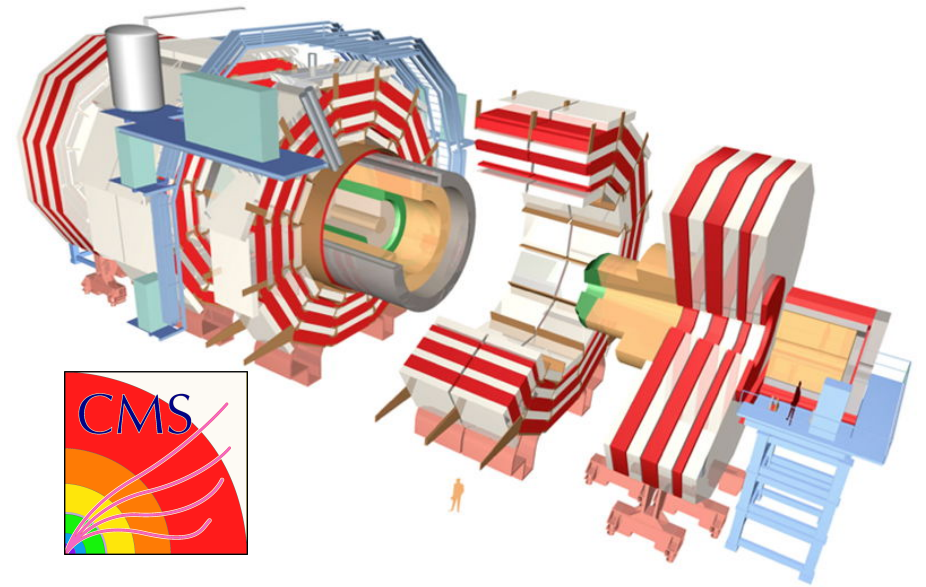
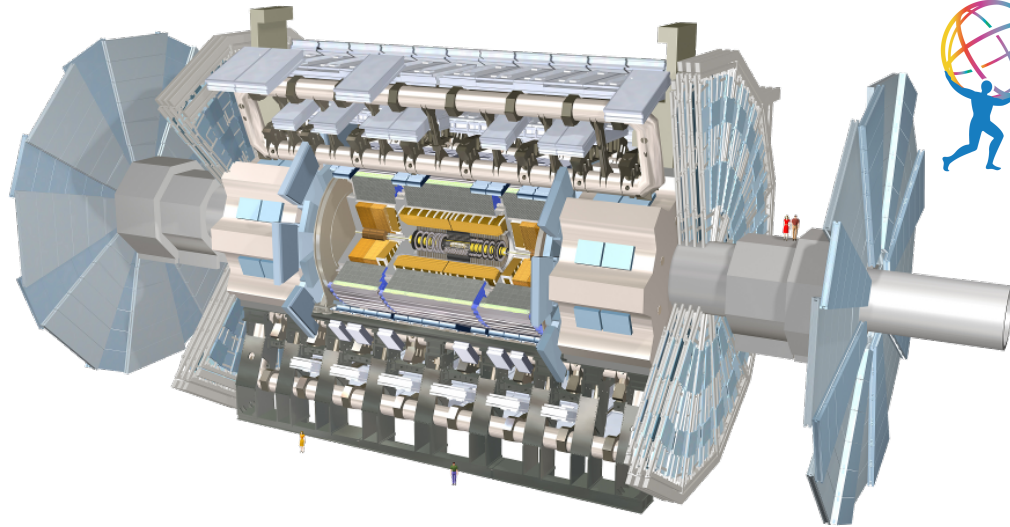


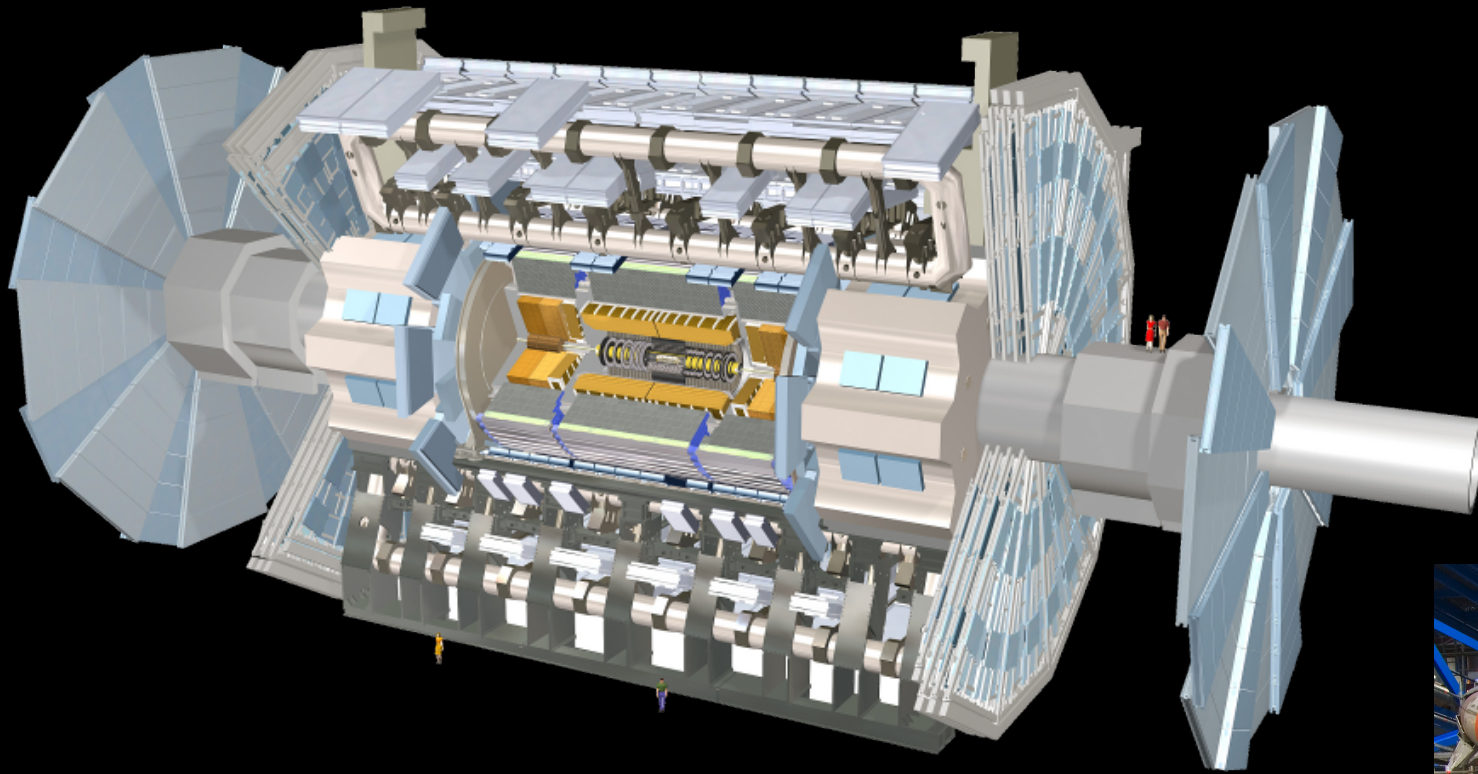
Aimants et cavités accélératrices



© CERN

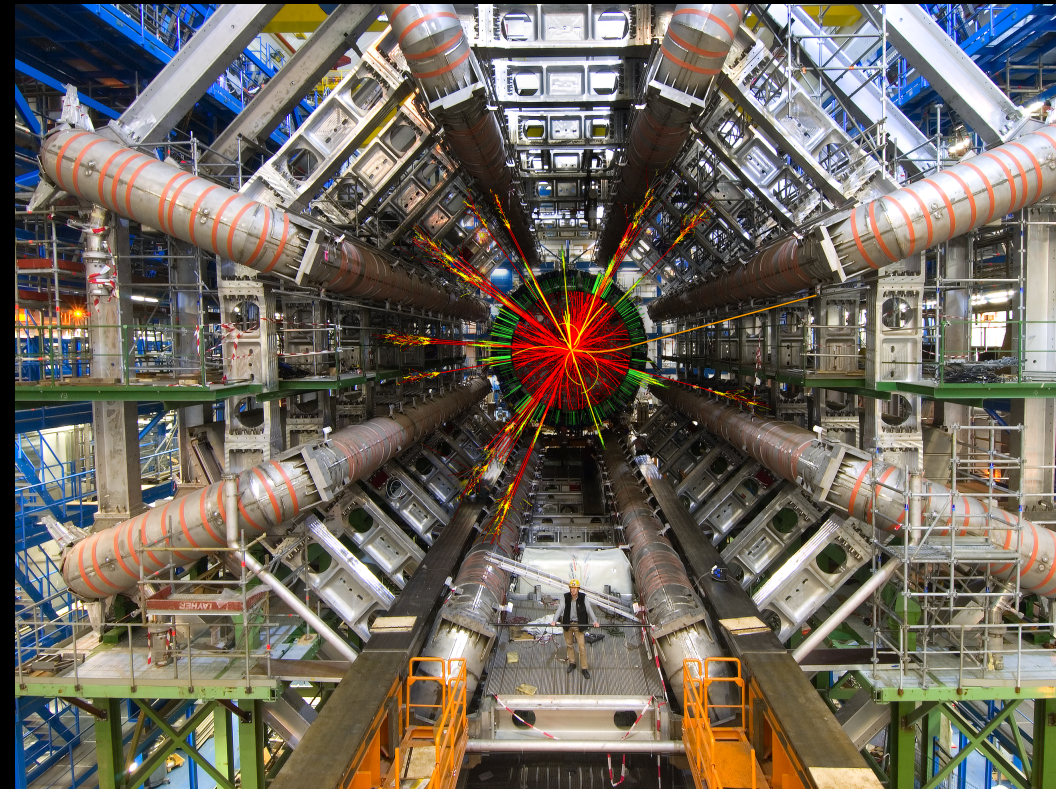
Les détecteurs géants du LHC





ATLAS

EXPERIMENT



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



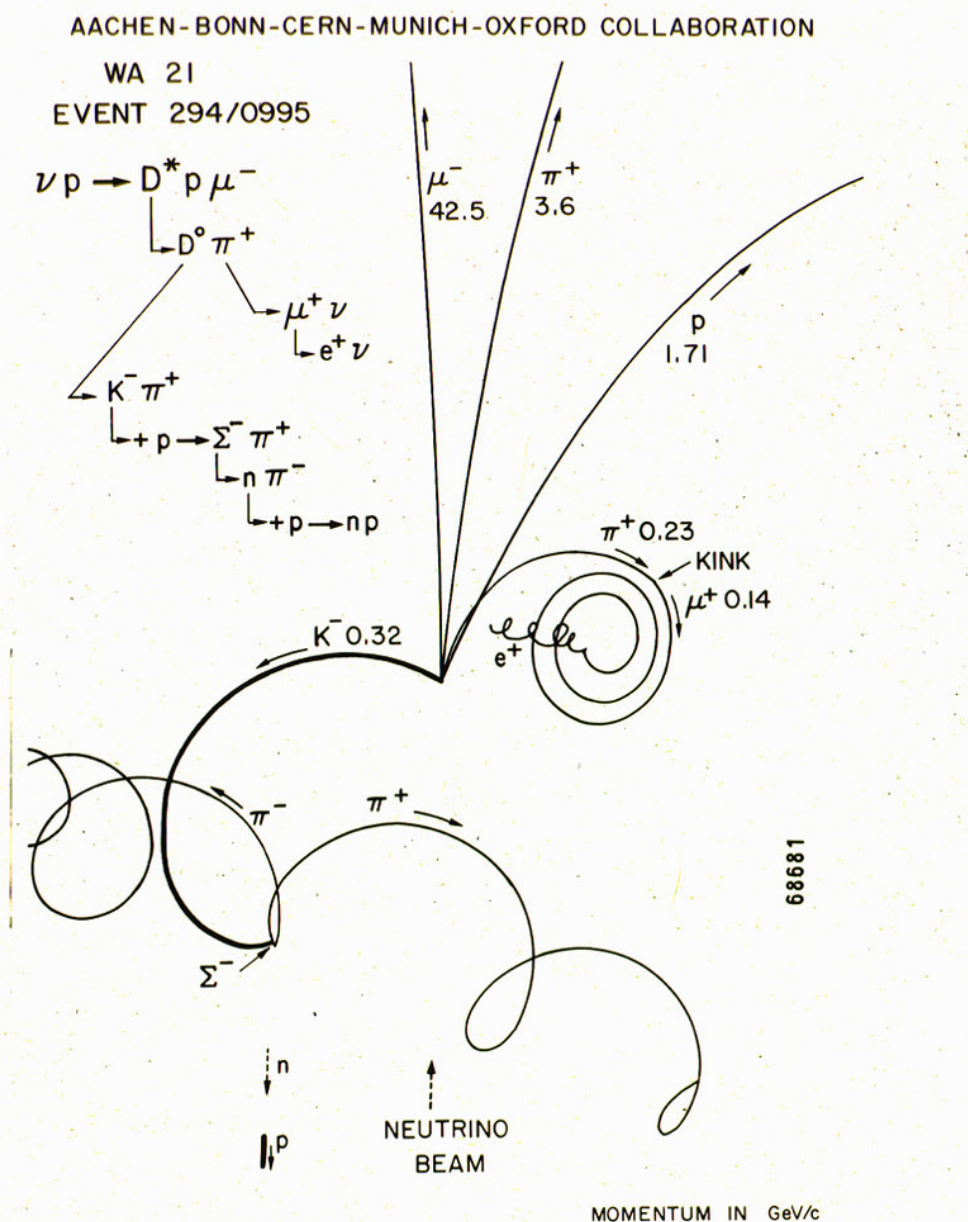
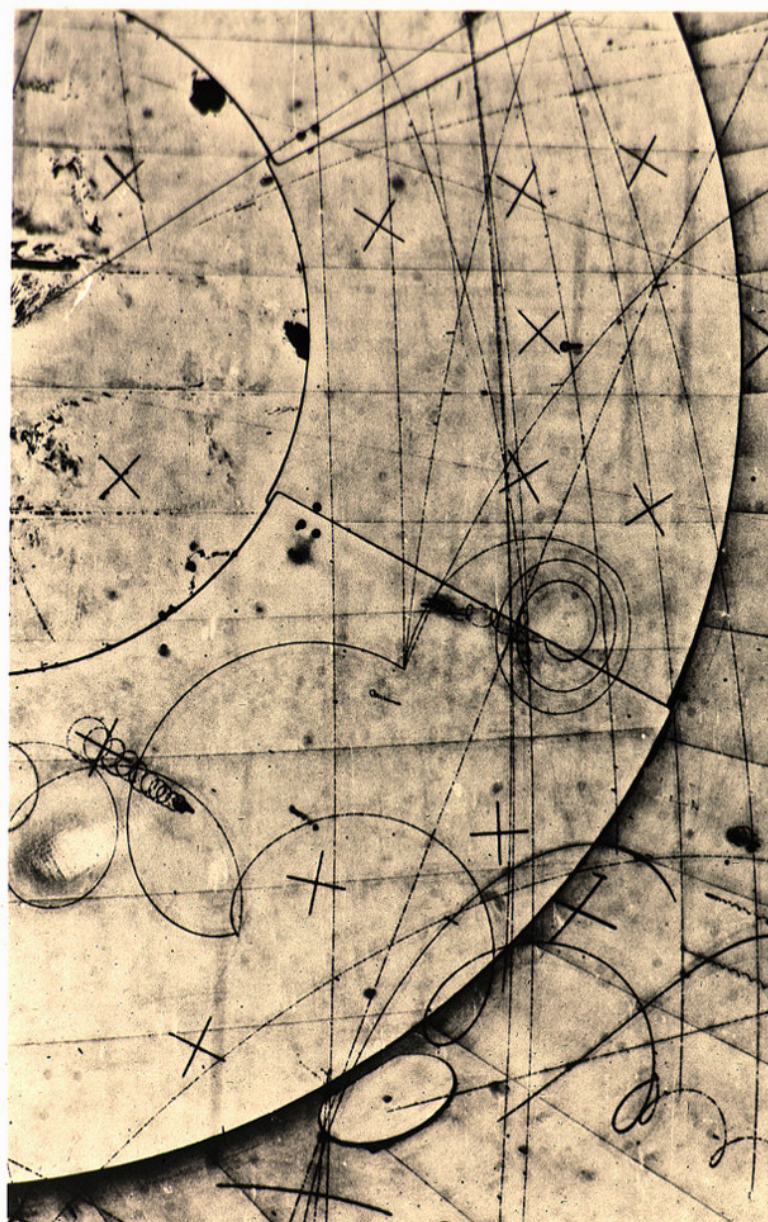
25 ans de préparation	1984	Études préliminaires
	1992	Création de la collaboration ATLAS
	1994	Approbation par le conseil du CERN
	1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
	1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
	Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
35 ans d'exploitation	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 (10 fois plus de données)

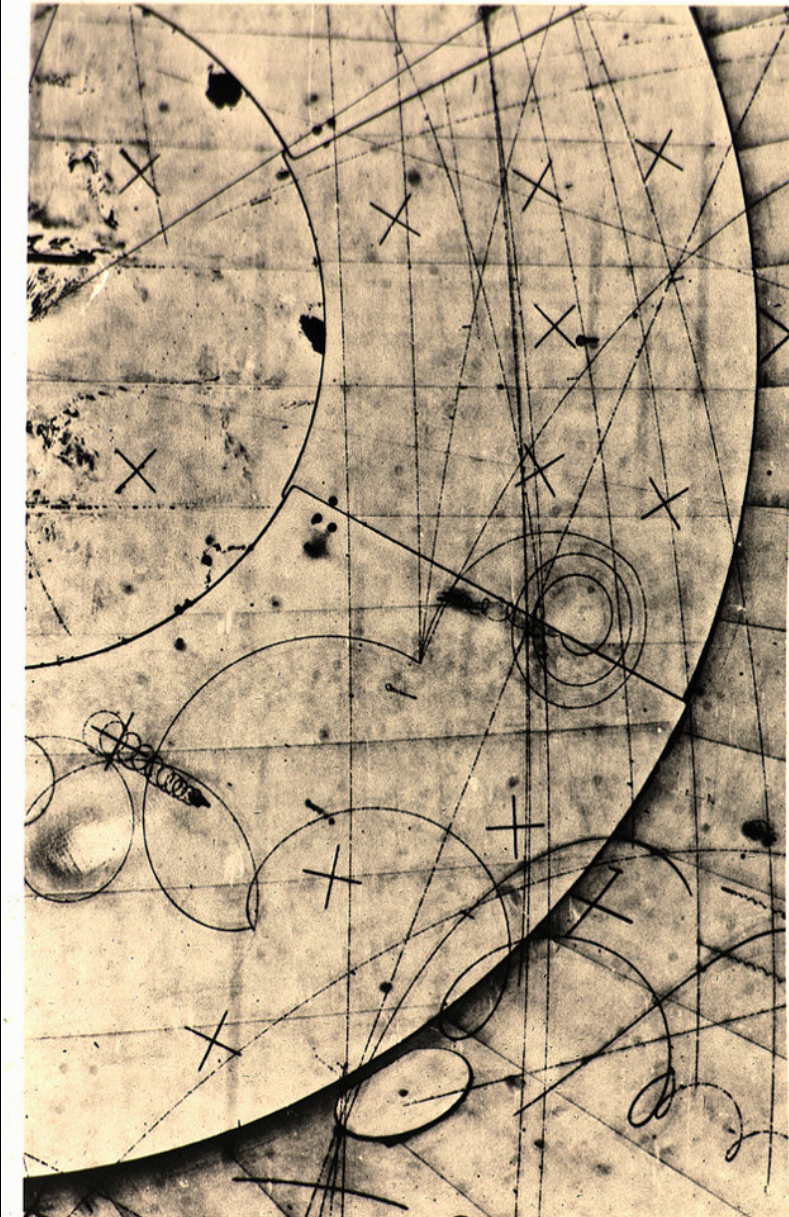
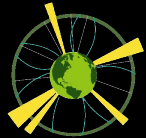


Accélérateur de science



Anciennes photographies





AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION



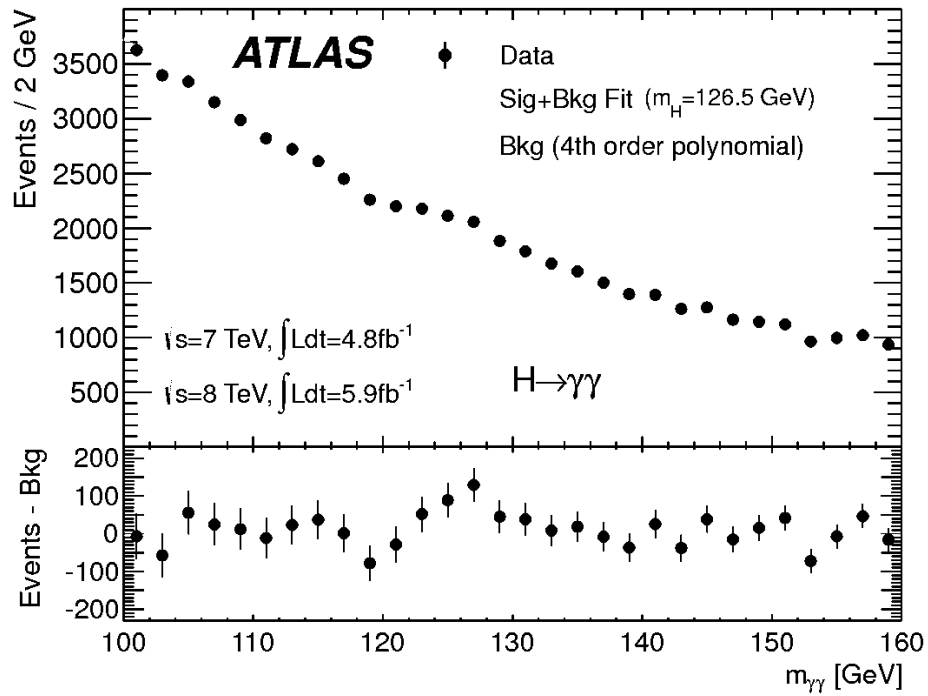
BEAM
MOMENTUM IN GeV/c

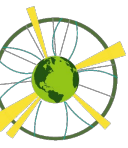


Mesure

■ Higgs en 2 photons

- ▶ Bruit de fond important
- ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

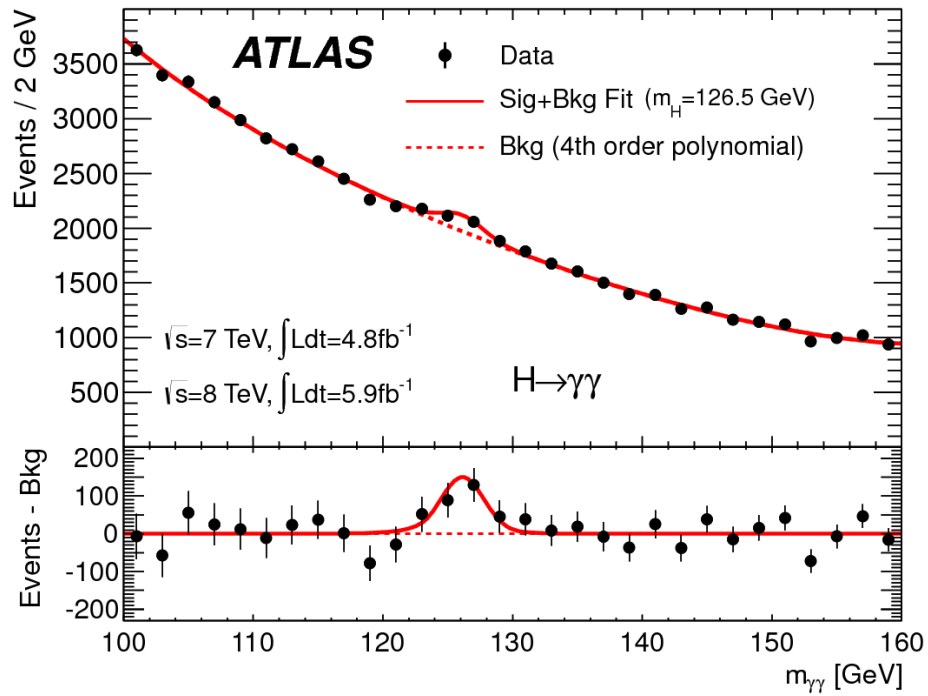


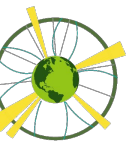


Mesure

■ Higgs en 2 photons

- ▶ Bruit de fond important
- ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal

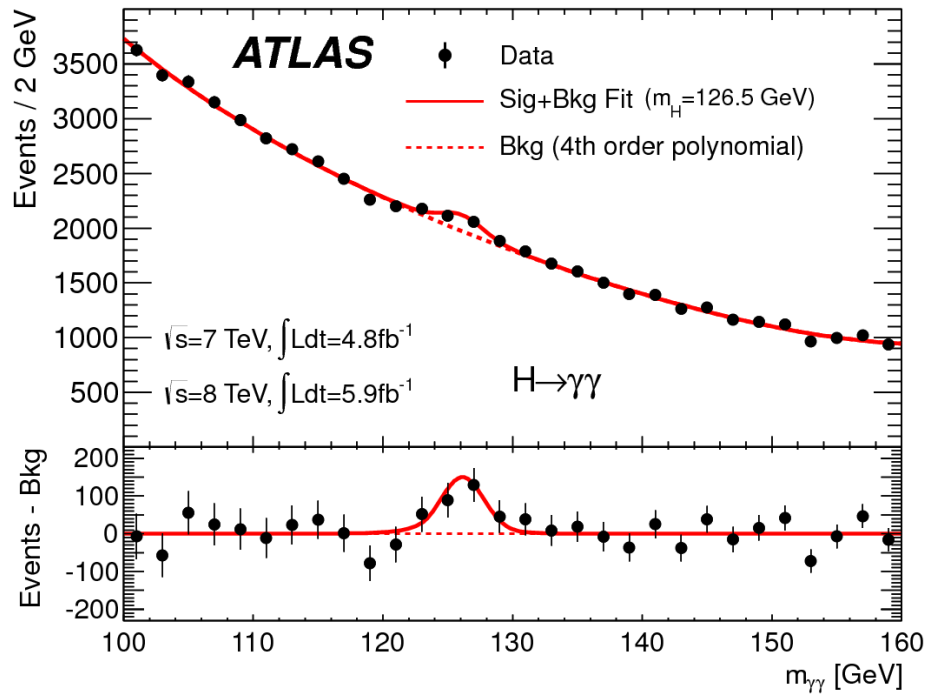




Mesure

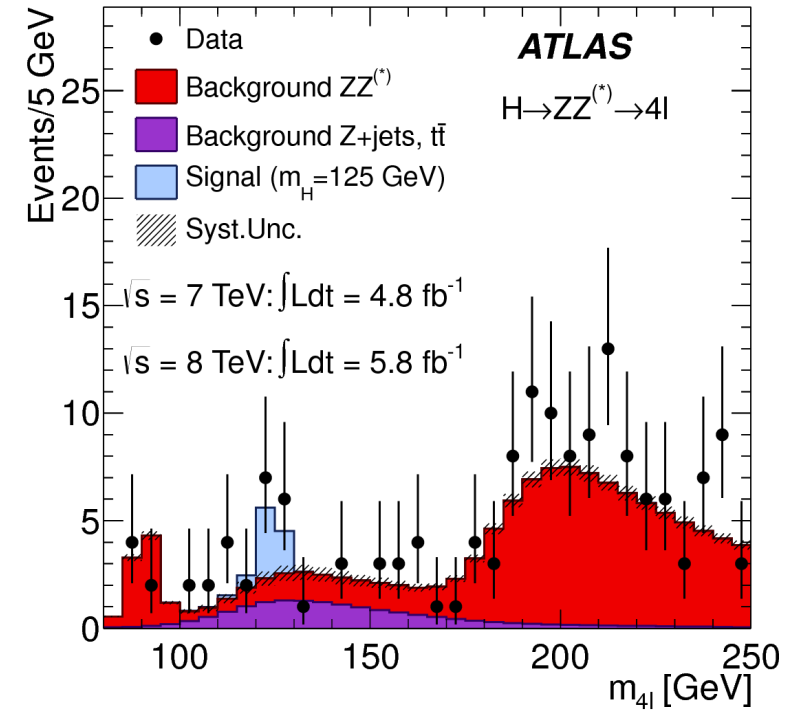
■ Higgs en 2 photons

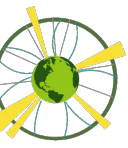
- ▶ Bruit de fond important
- ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



■ Higgs en ZZ

- ▶ Très peu de bruit de fond
- ▶ Très peu d'événements

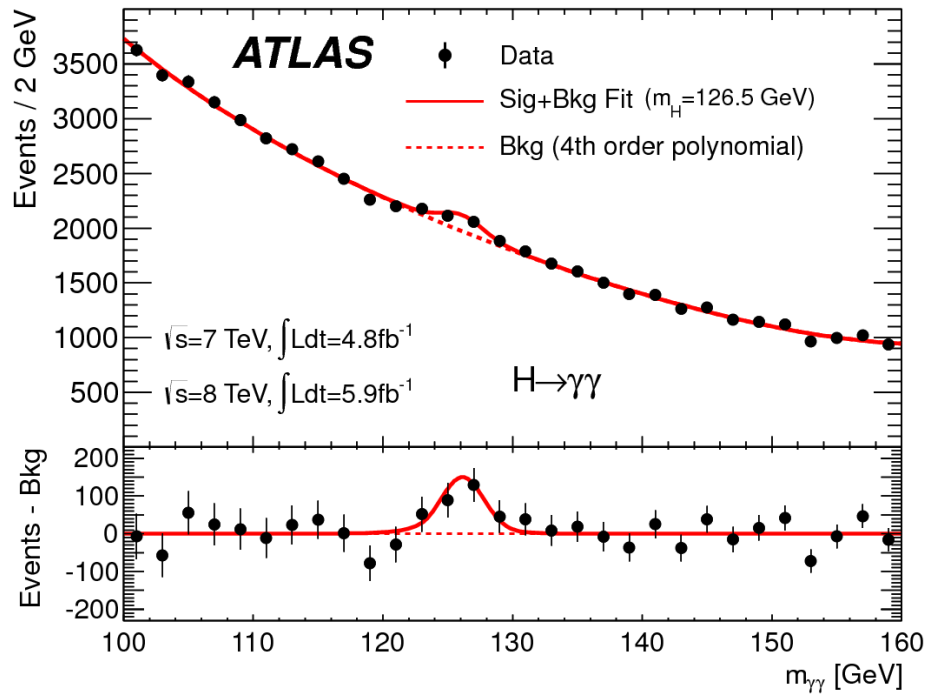




Mesure

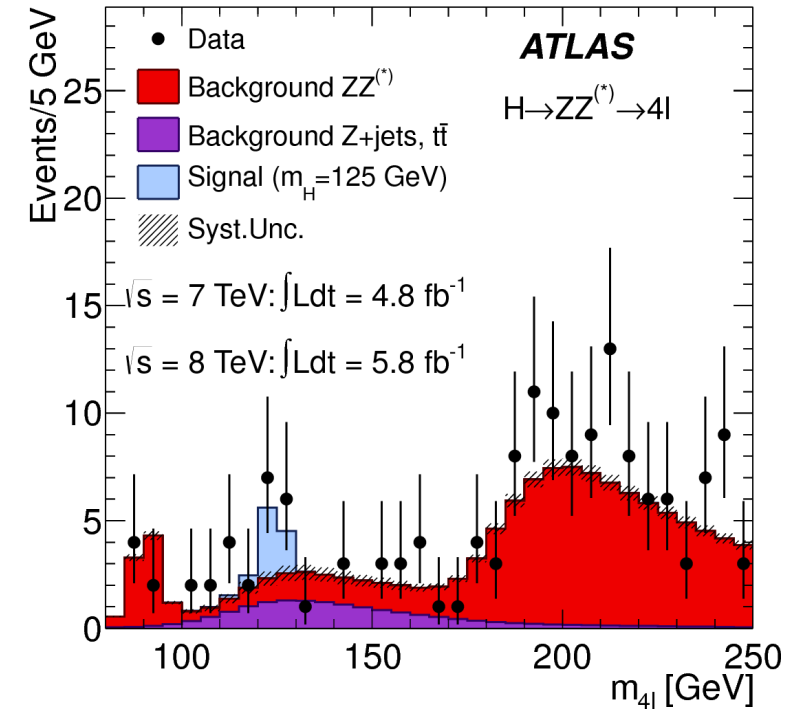
■ Higgs en 2 photons

- ▶ Bruit de fond important
- ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal



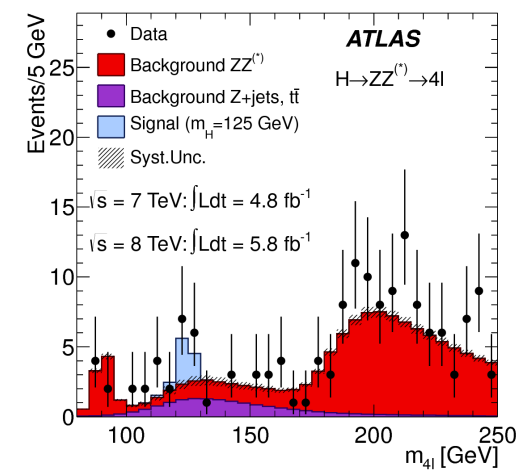
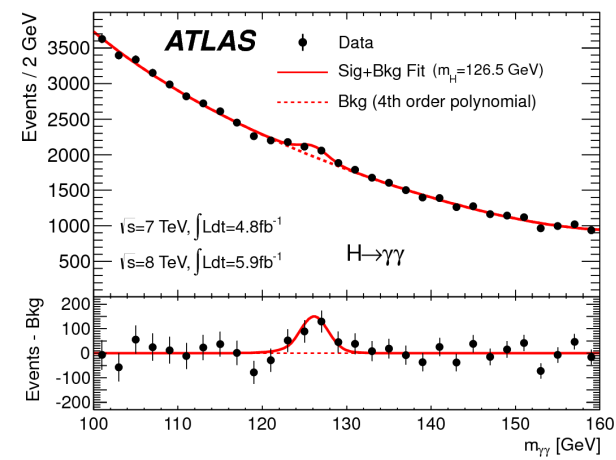
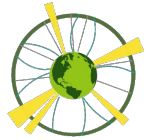
■ Higgs en ZZ

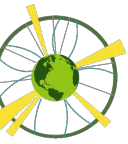
- ▶ Très peu de bruit de fond
- ▶ Très peu d'événements



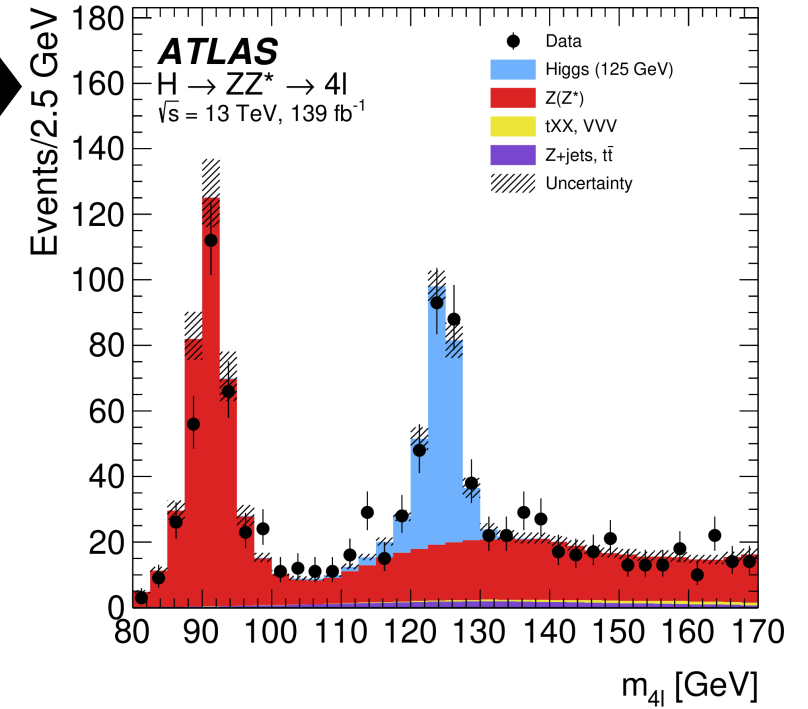
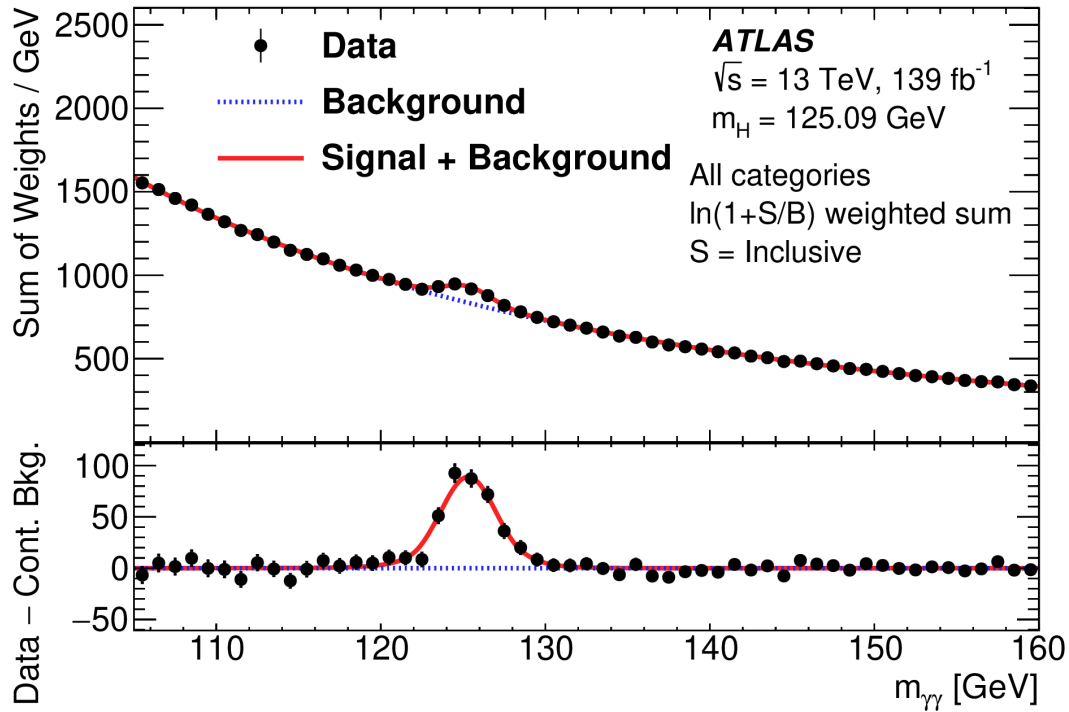
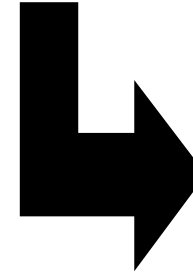
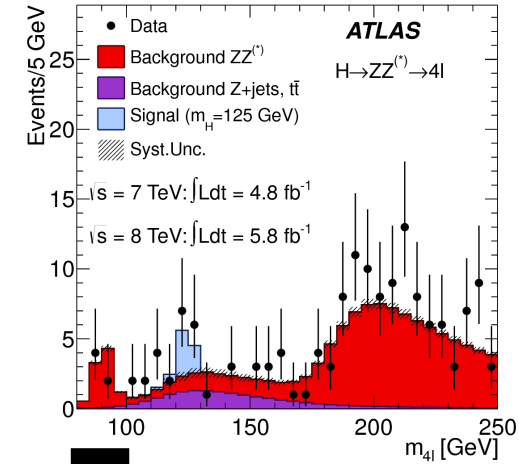
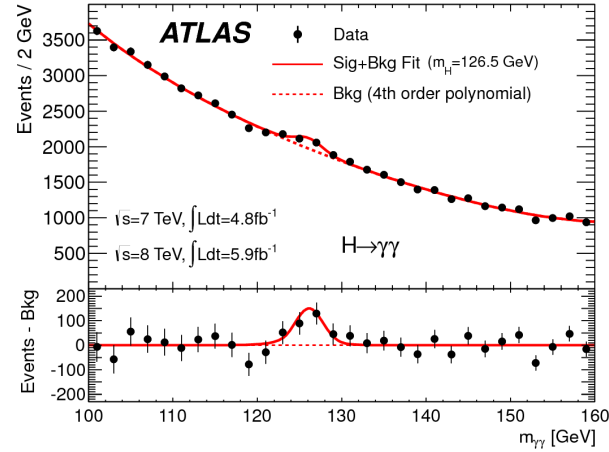
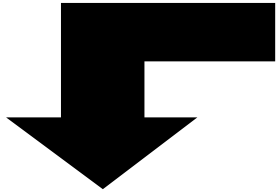
Est-ce significatif ? Outils statistiques pour répondre

Hier...

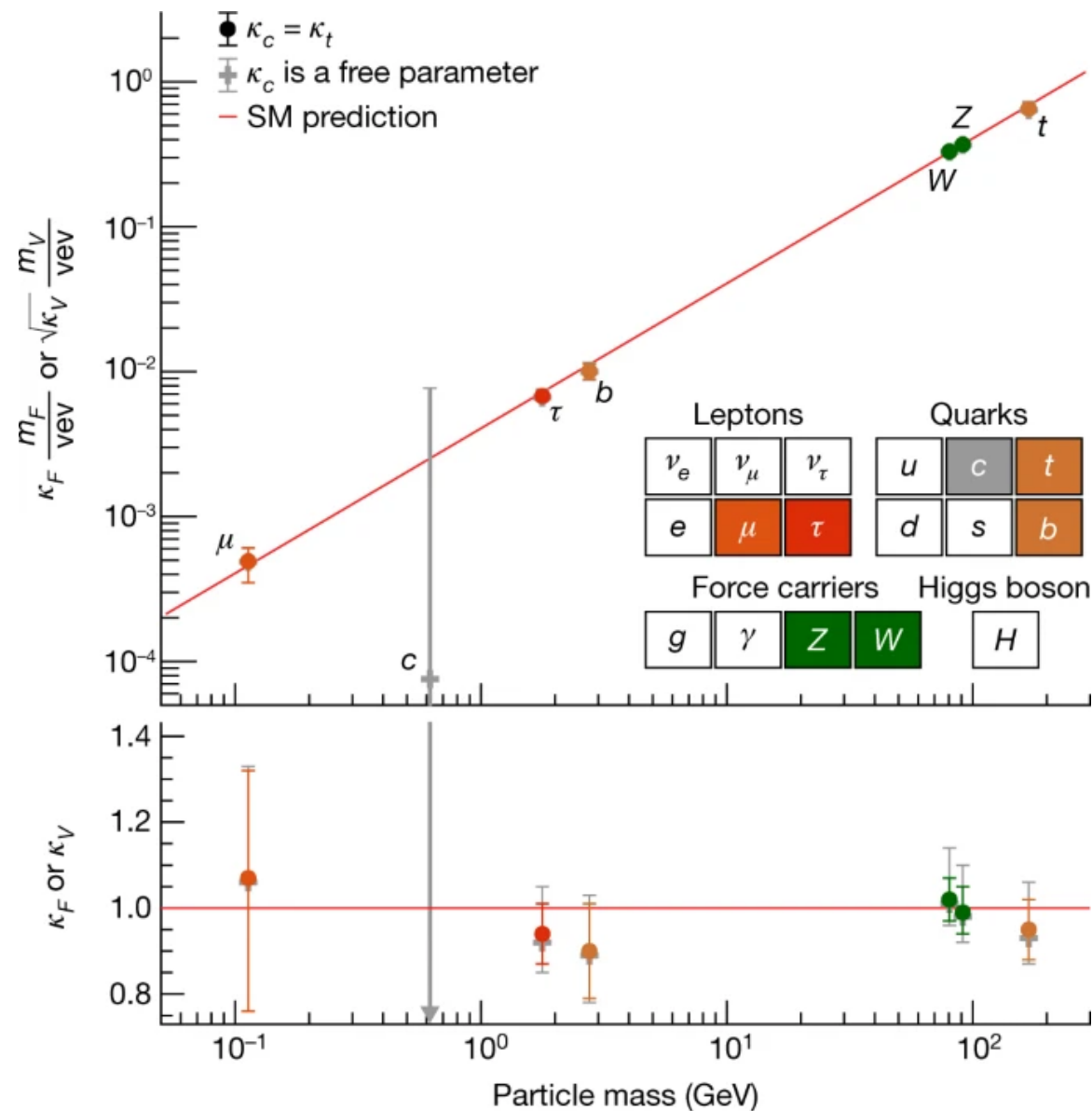
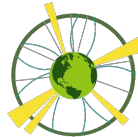




Hier... et aujourd'hui



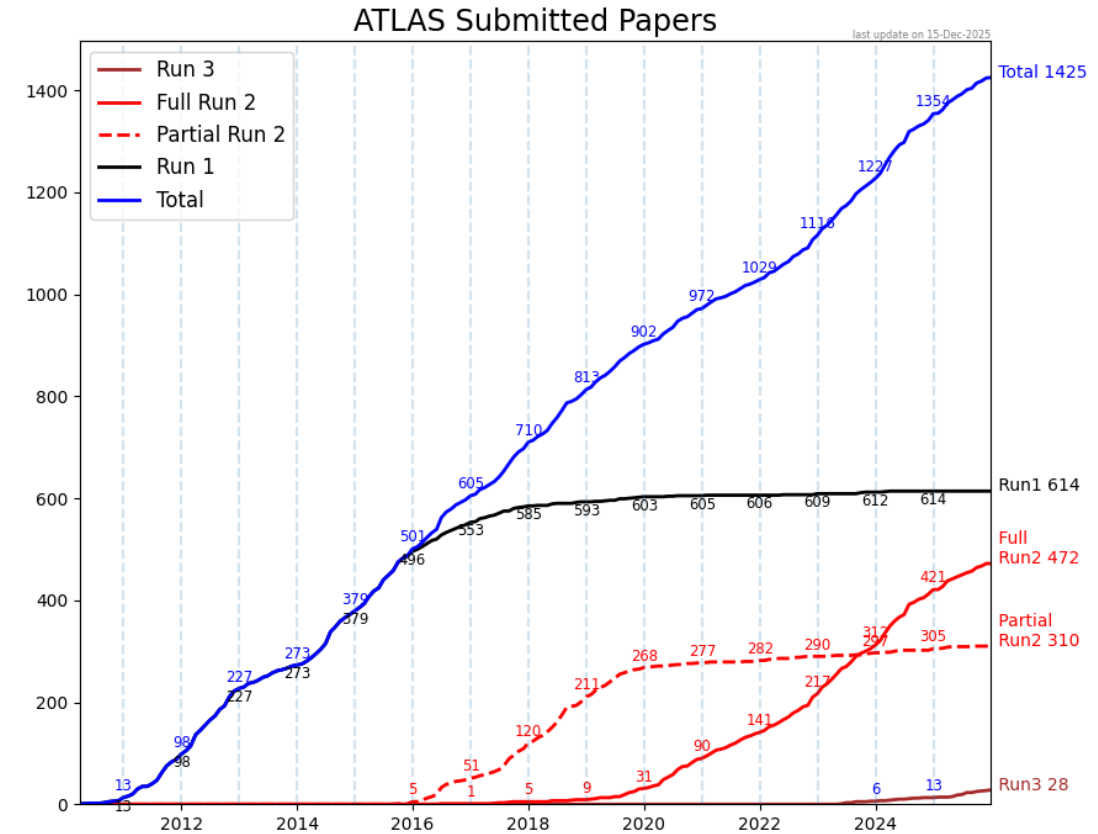
Masse des particules et couplage au boson de Higgs





Publications

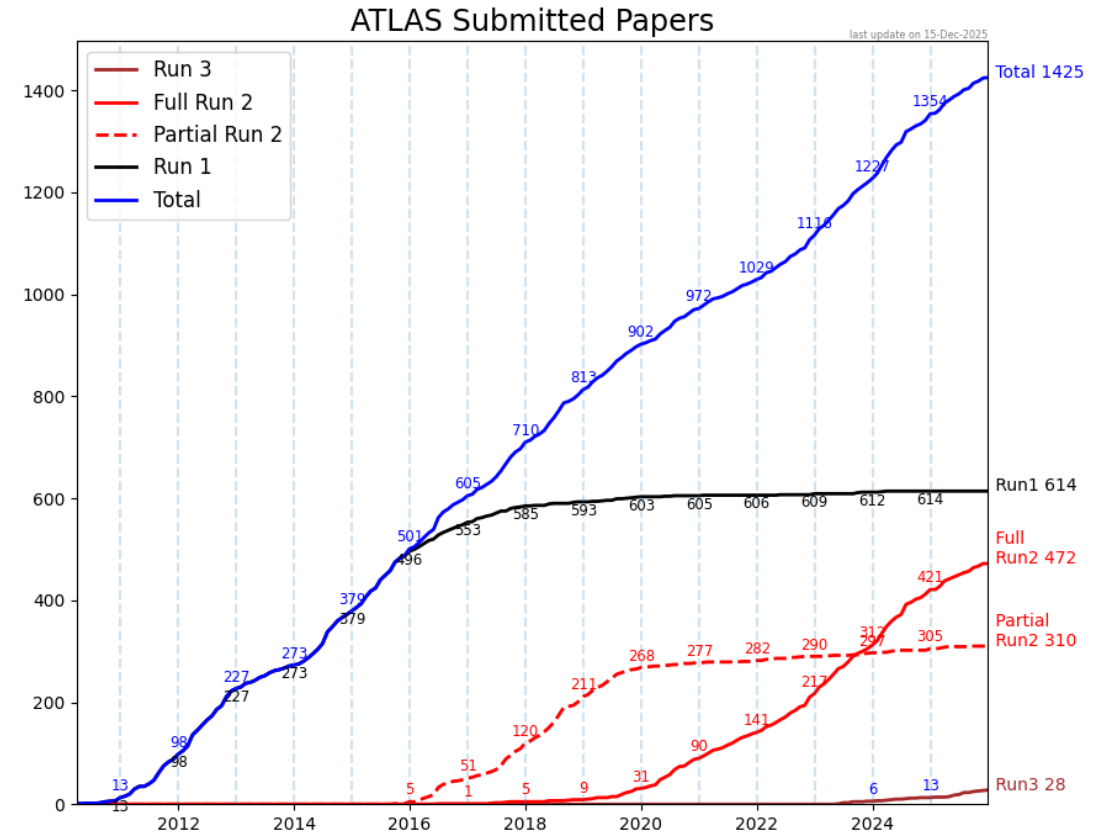
- ATLAS :
 - ▶ >1400 publications
 - ▶ >1200 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
 - ▶ > 800 publications
- ALICE :
 - ▶ > 500 publications





Publications

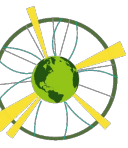
- ATLAS :
 - ▶ >1400 publications
 - ▶ >1200 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
 - ▶ > 800 publications
- ALICE :
 - ▶ > 500 publications



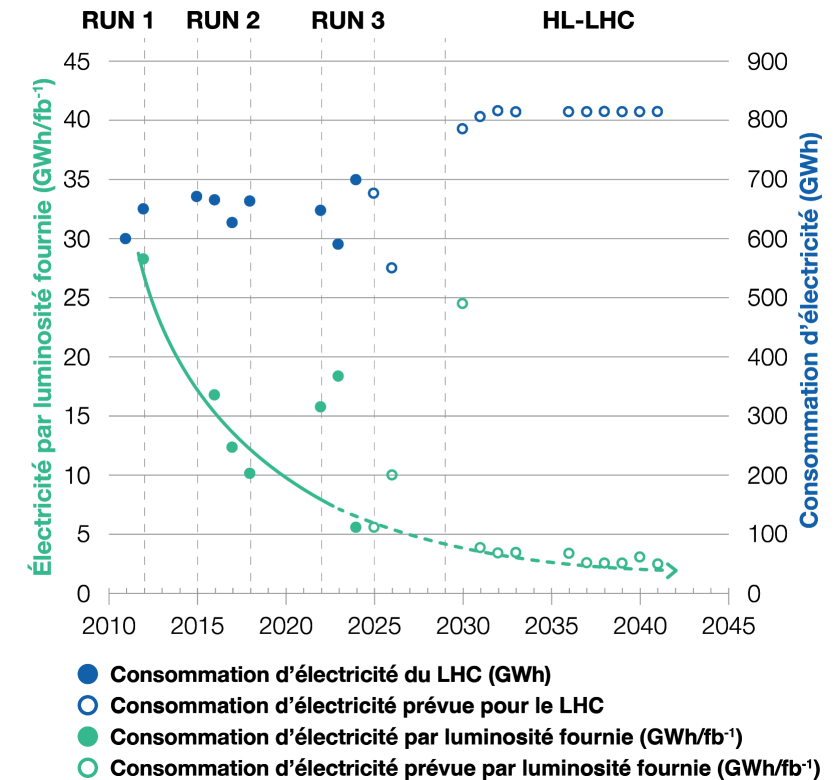
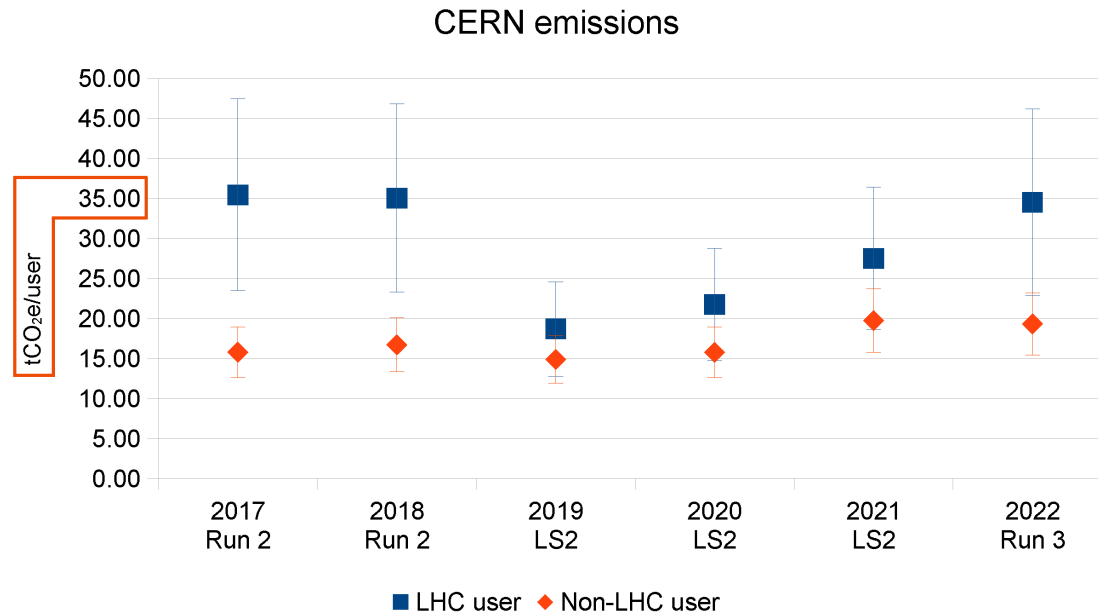
Toutes les publications du LHC sont accessibles gratuitement par tous

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

Durabilité du CERN et du LHC



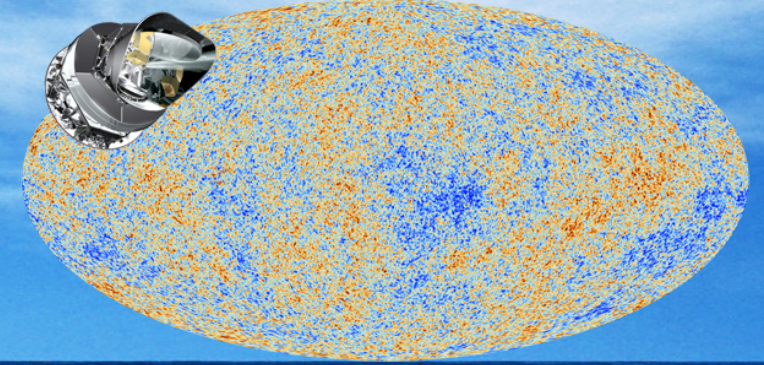
- Très grande infrastructure ► grande empreinte environnementale
- Consommation électrique importante
 - Accélération des particules, aimants, cryogénie
- Première source d'émissions :
 - Gaz à très fort pouvoir de réchauffement utilisés pour le refroidissement et la détection de particules
- Construction de détecteurs
 - Machines, matériaux, bâtiments, etc. : achats
- Laboratoire mondial ► transports





A slide featuring a photograph of an iceberg in a blue ocean under a blue sky. The iceberg's tip is above the water, while a much larger, jagged mass is submerged below the surface. The text "Ce que l'on connaît (5%)" is centered over the visible tip of the iceberg.

Ce que l'on connaît (5%)



Ce que l'on connaît (5%)

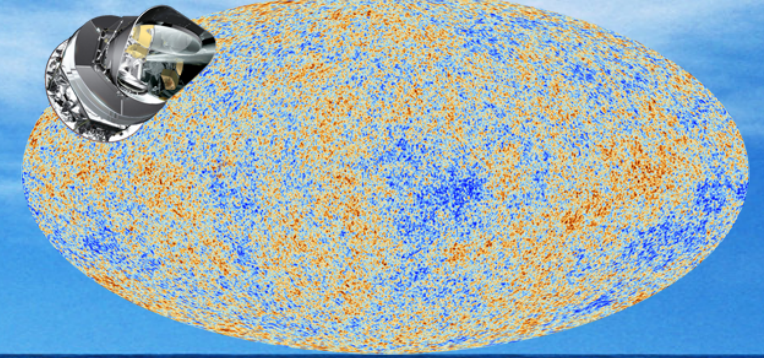
27% Matière noire

Reste à
découvrir !

68% Énergie noire



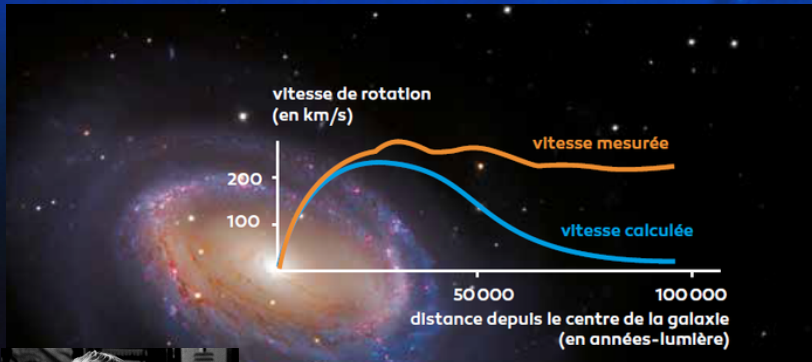
© Render by Jonathan Rey



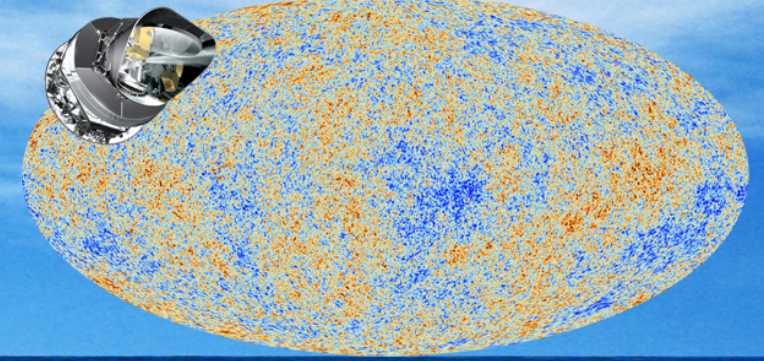
Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

68% Énergie noire



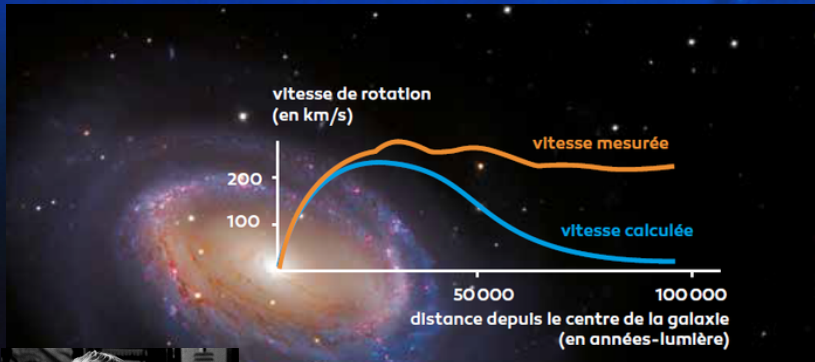
Vera Rubin



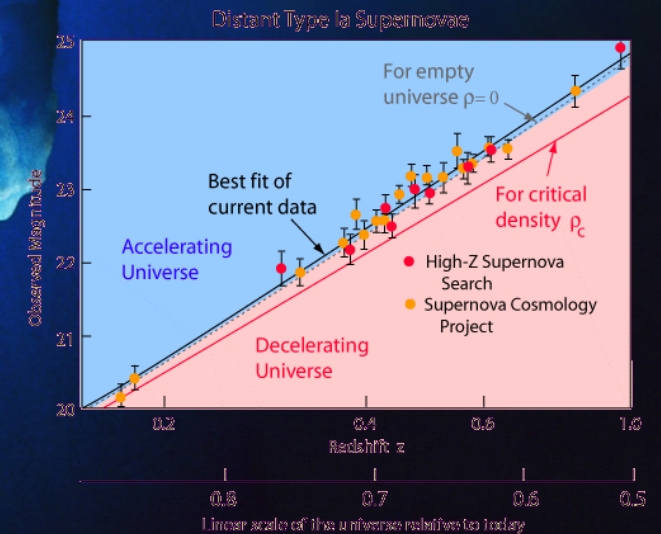
Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

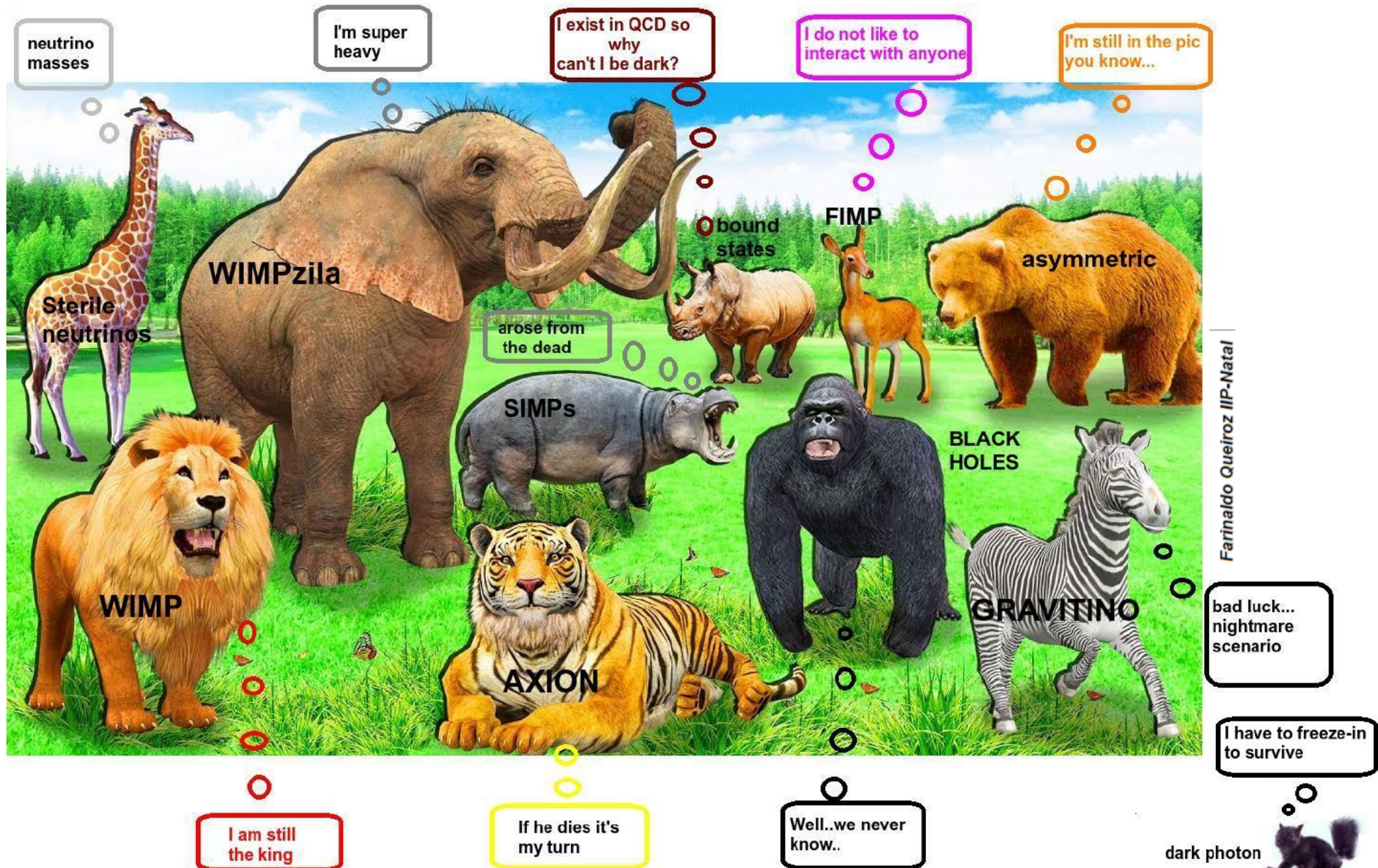
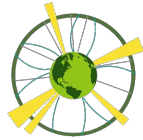
68% Énergie noire



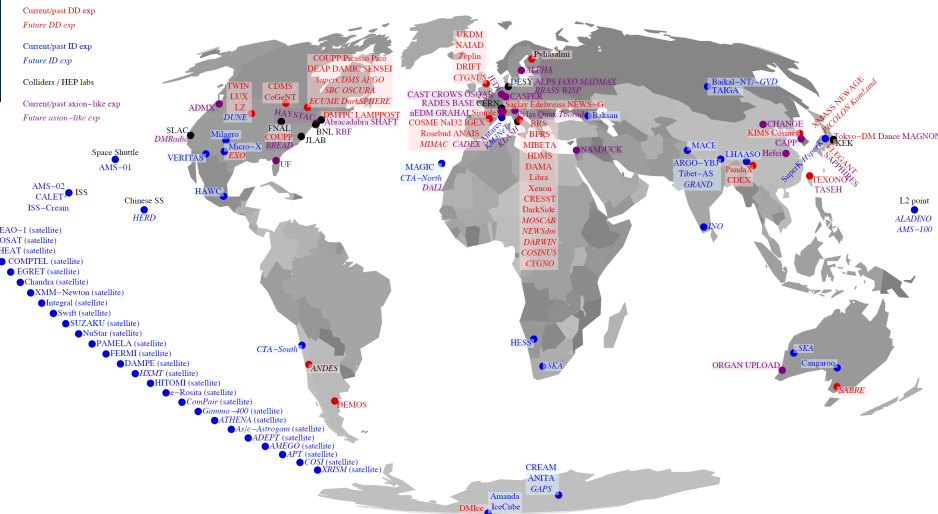
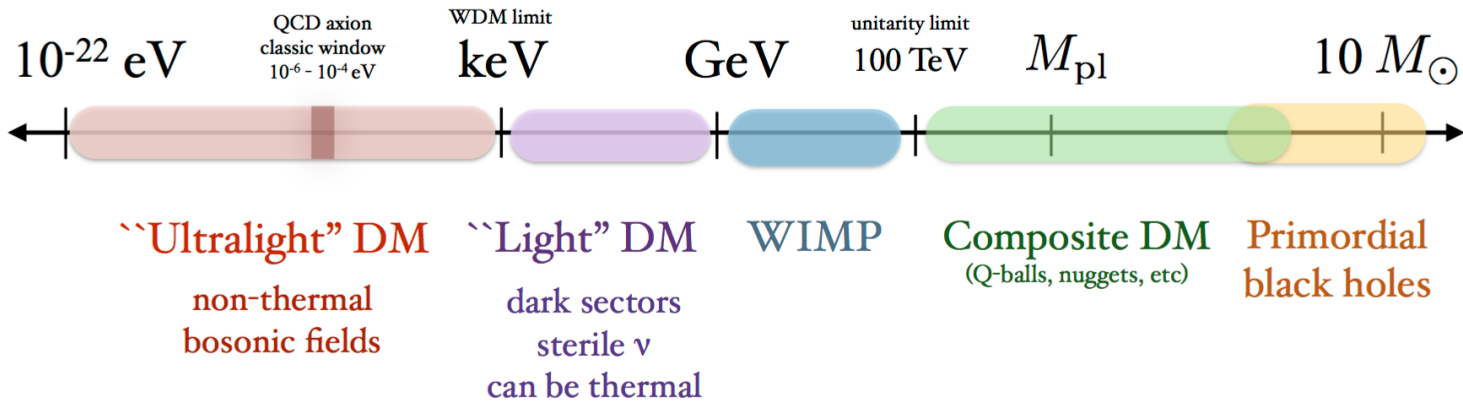
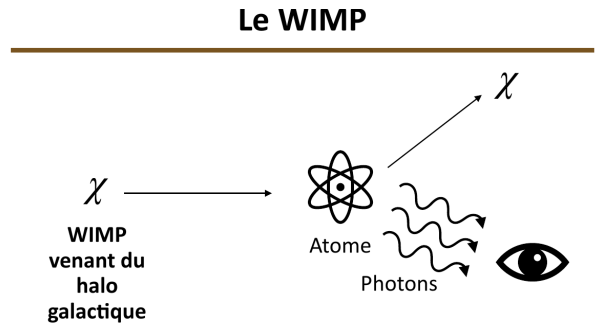
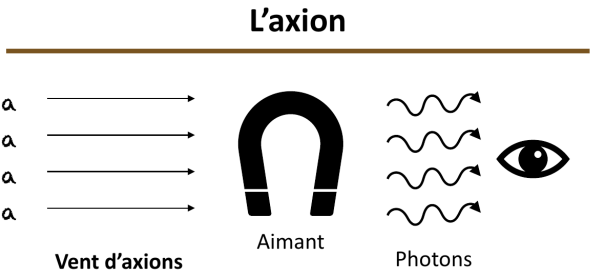
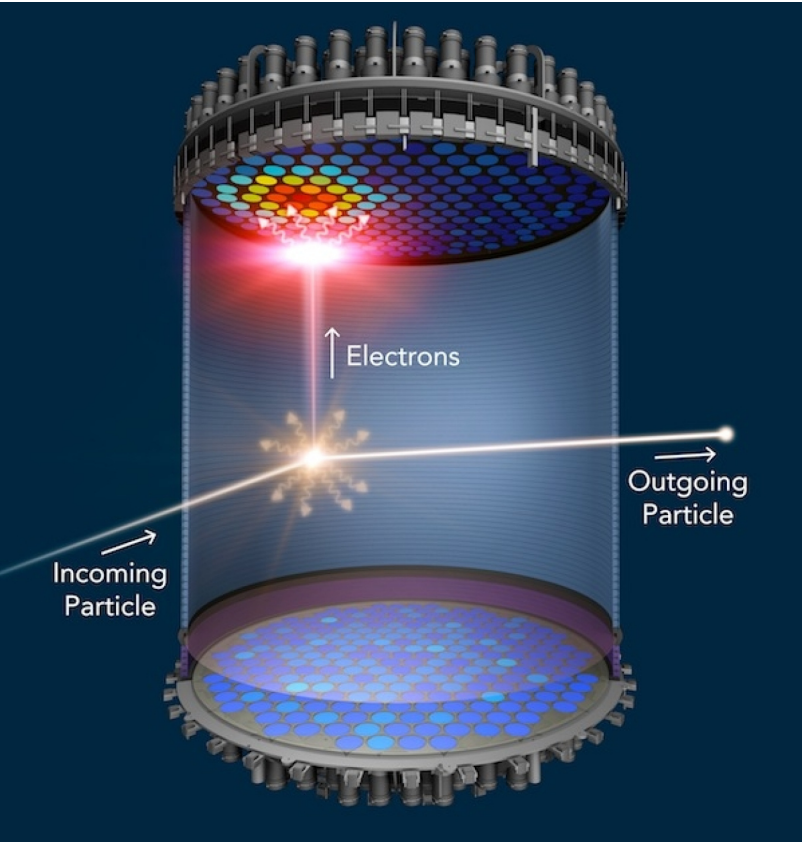
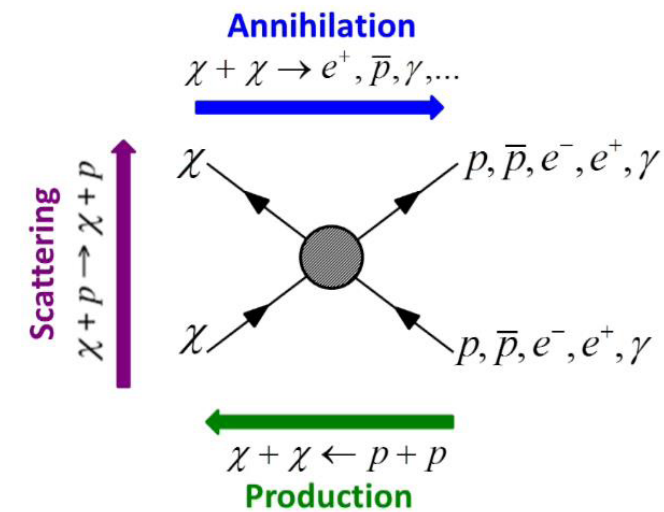
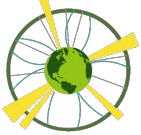
Vera Rubin

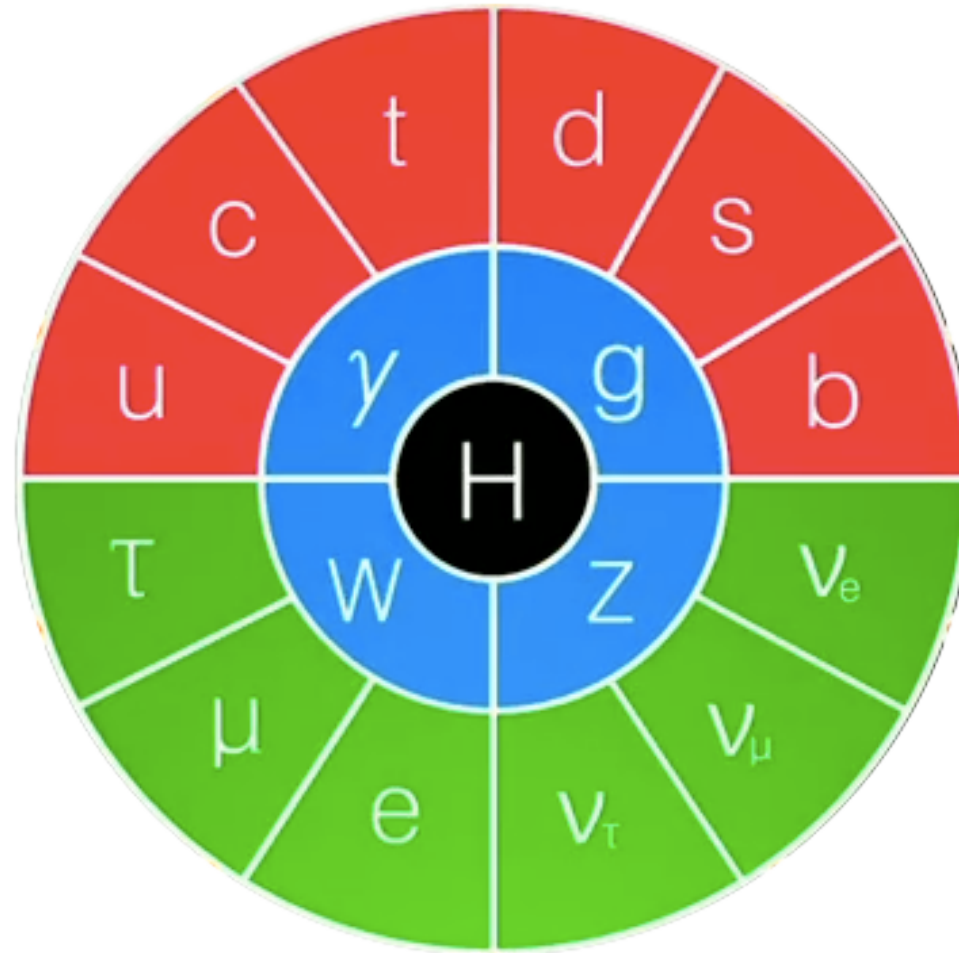


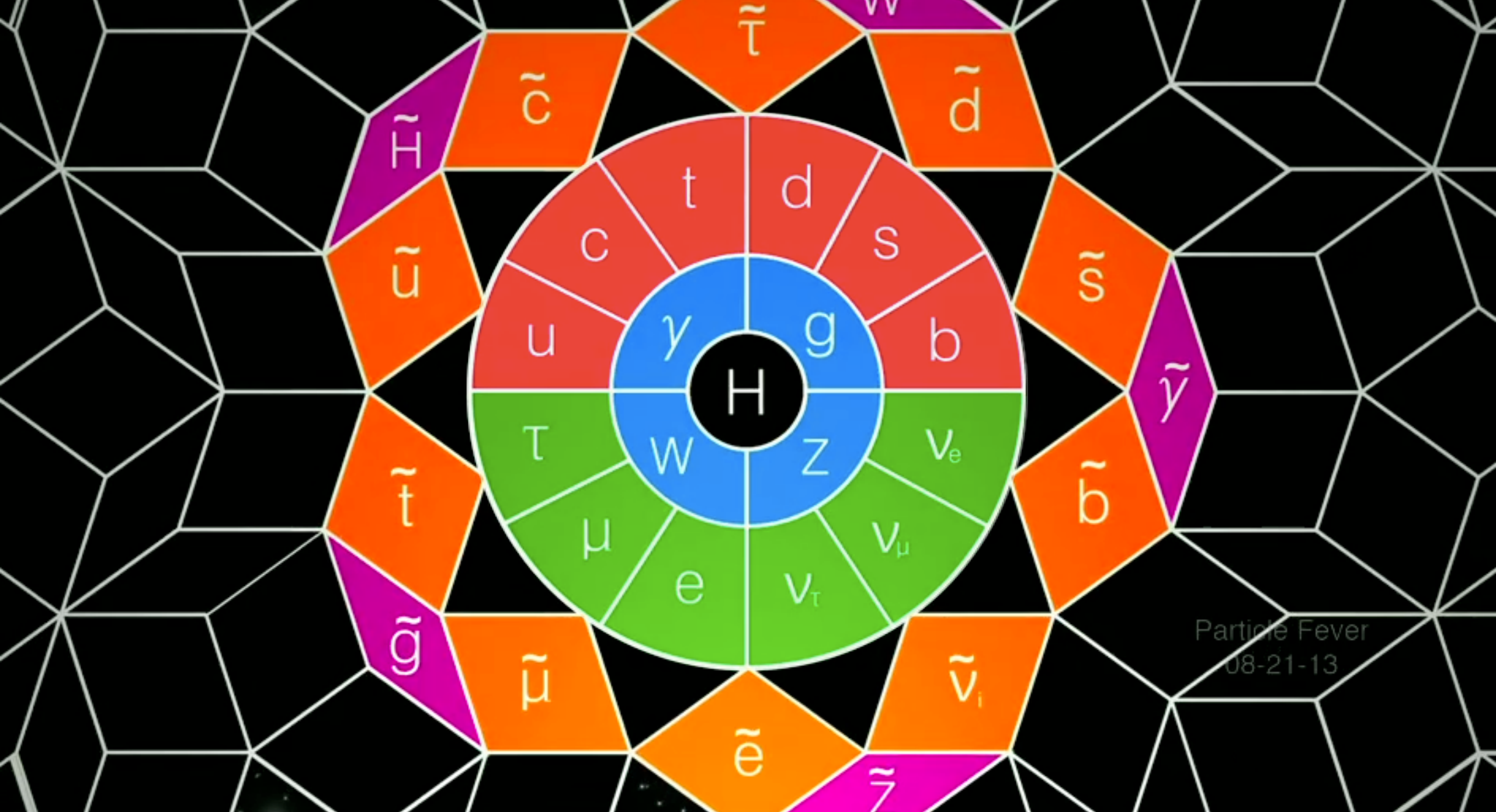
Candidats matière noire



Candidats matière noire

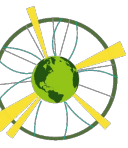






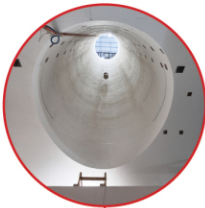
Particle Fever
08-21-13

Accélérateur du futur : 2030-2041



LHC à haute luminosité (HL-LHC)

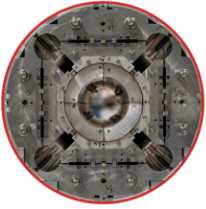
NEW TECHNOLOGIES FOR THE HIGH-LUMINOSITY LHC



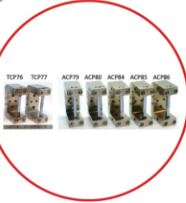
CIVIL ENGINEERING
2 new 300-metre service tunnels and 2 shafts near ATLAS and CMS.



"CRAB" CAVITIES
16 superconducting "crab" cavities for the ATLAS and CMS experiments to tilt the beams before collisions.

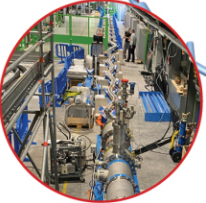


FOCUSING MAGNETS
12 more powerful quadrupole magnets for the ATLAS and CMS experiments, designed to provide the final focusing of the beams before collisions.

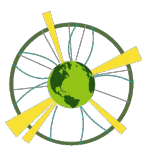
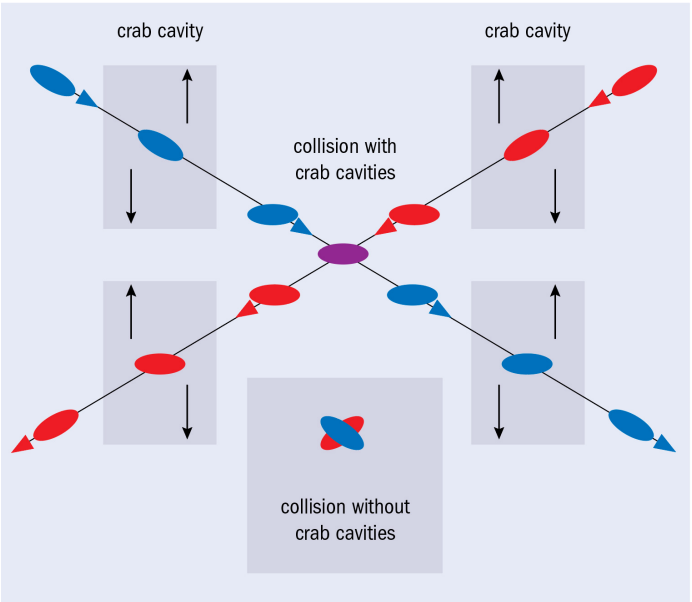


COLLIMATORS
15 to 20 additional collimators and replacement of 60 collimators with improved performance to reinforce machine protection.

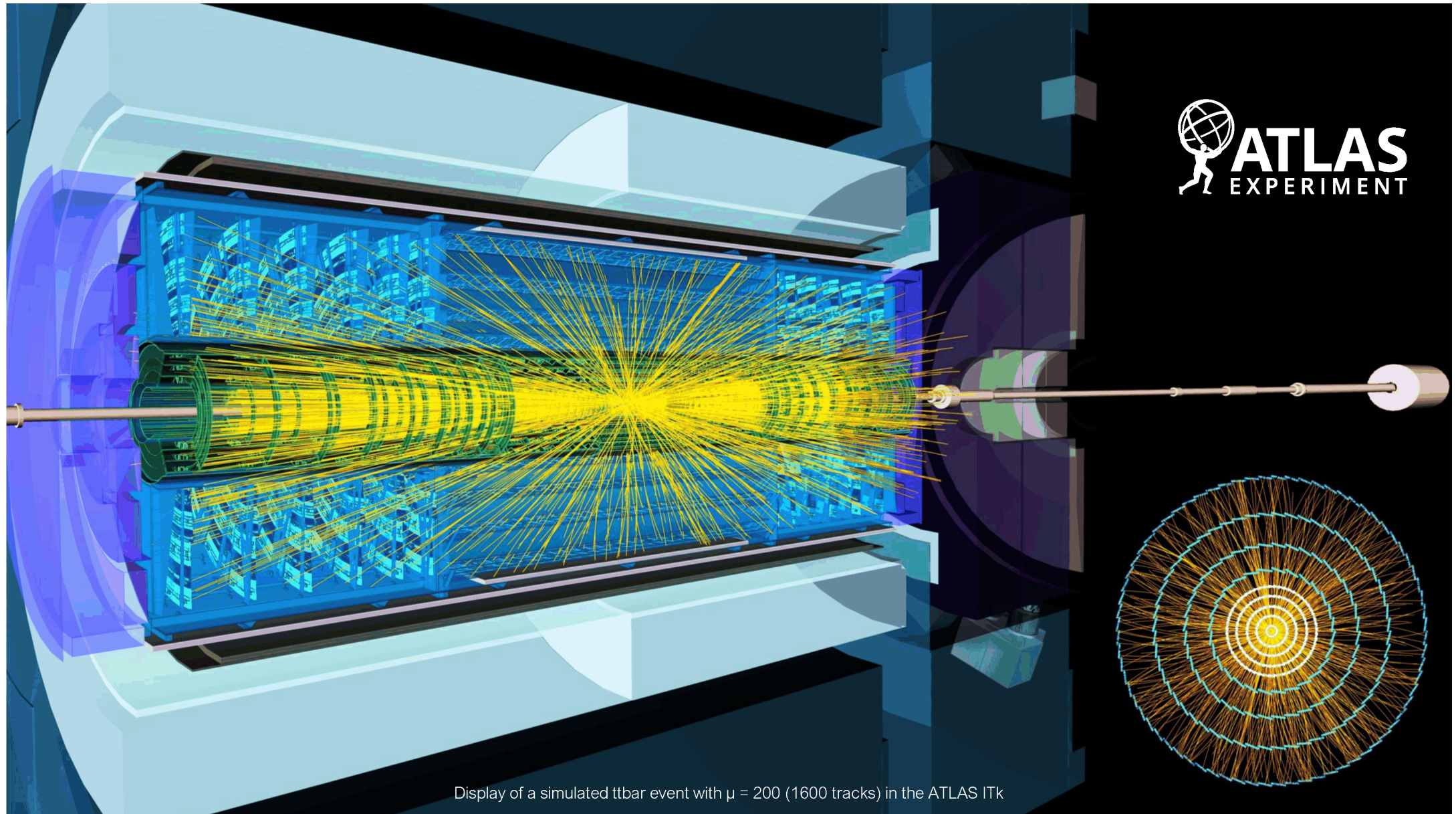
CRYSTAL COLLIMATORS
New crystal collimators in the IR7 cleaning insertion to improve cleaning efficiency during operation with ion beams.



SUPERCONDUCTING LINKS
Electrical transmission lines based on a high-temperature superconductor to carry the very high DC currents to the magnets from the powering systems installed in the new service tunnels near ATLAS and CMS.



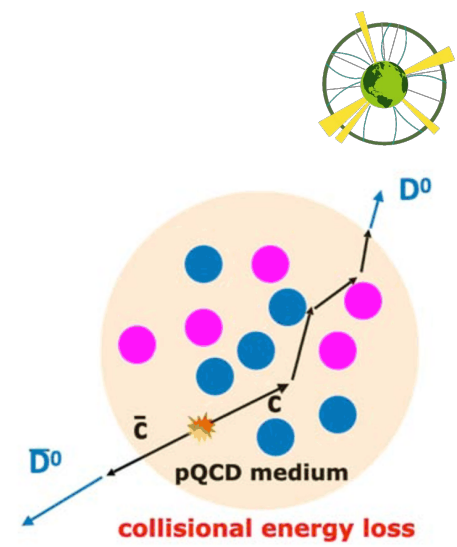
Haute luminosité ?



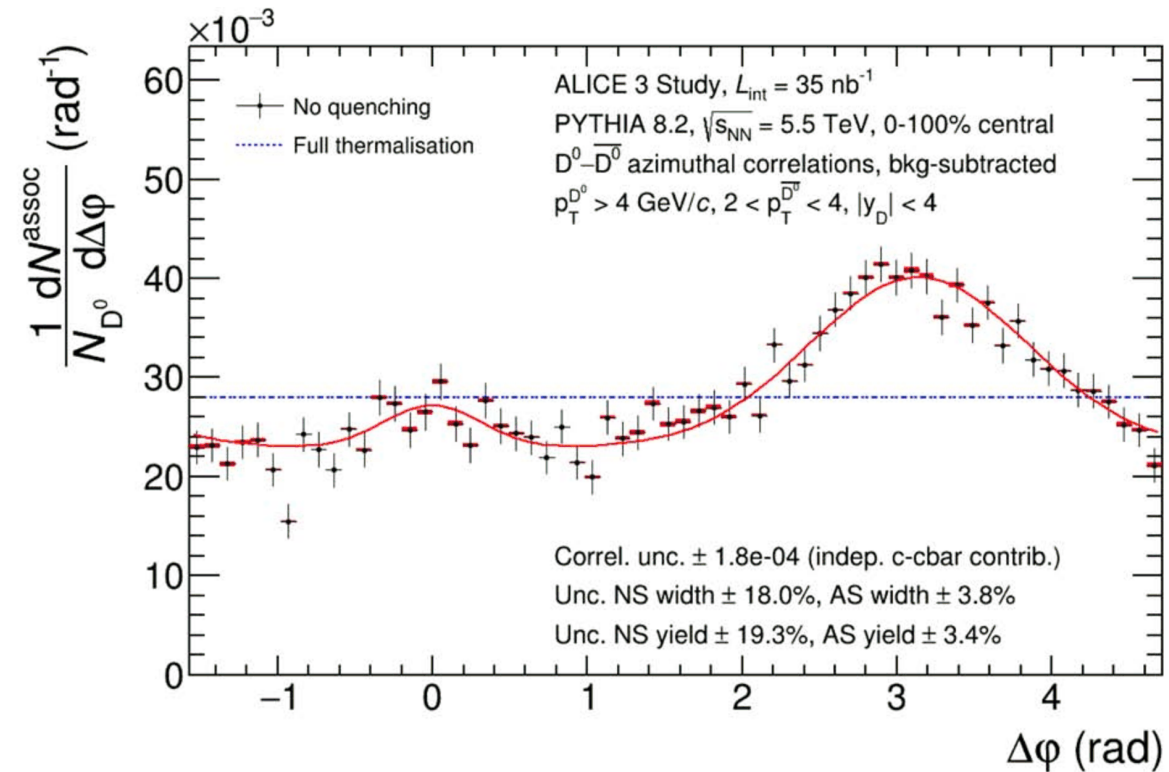
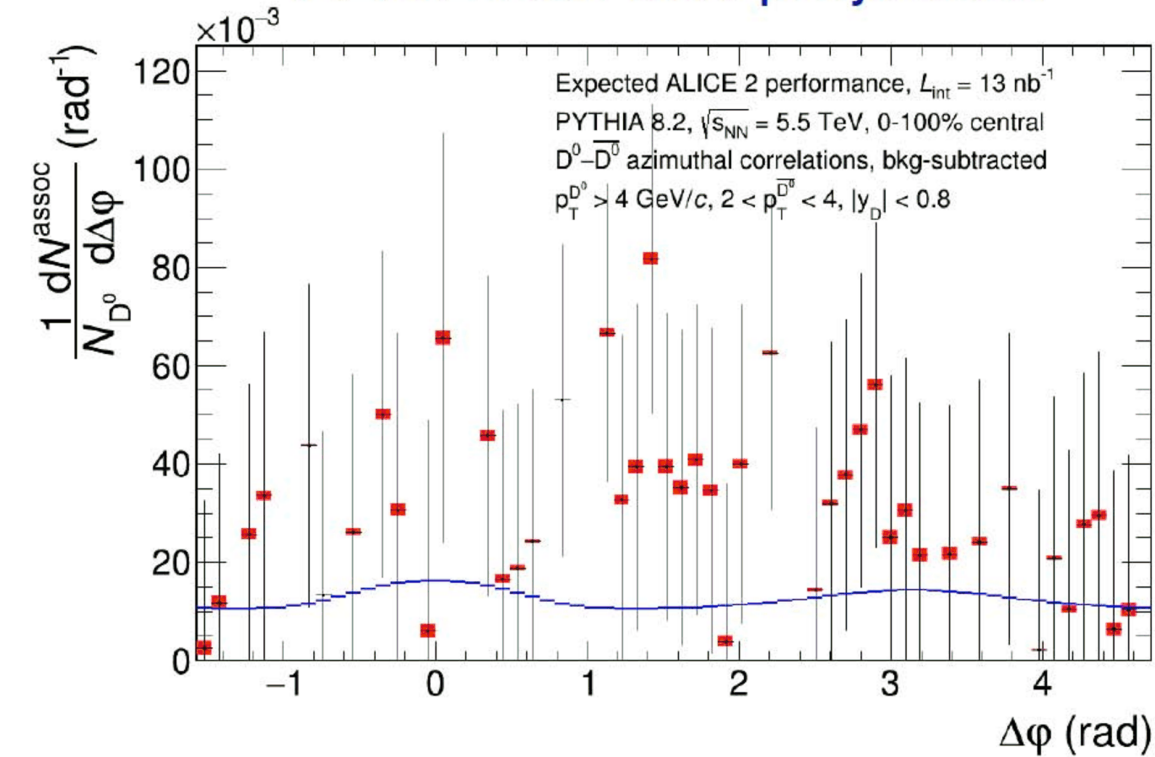
Display of a simulated $t\bar{t}$ event with $\mu = 200$ (1600 tracks) in the ATLAS ITk

Pourquoi toutes ces données ?

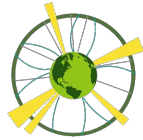
La puissance des statistiques et d'un meilleur détecteur



ALICE Run 3&4 projection



Le HL-LHC pour faire quoi ?

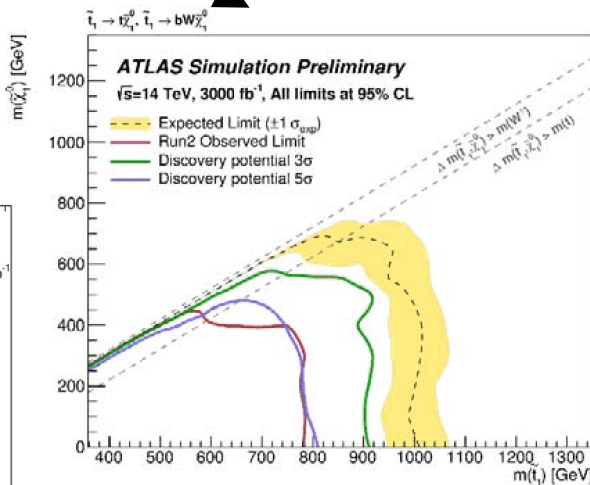
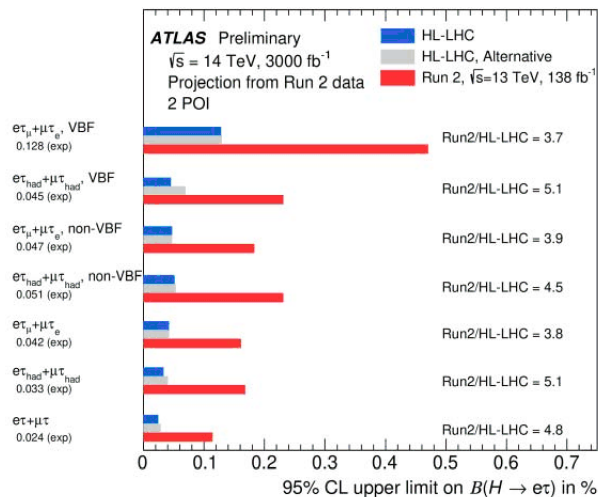
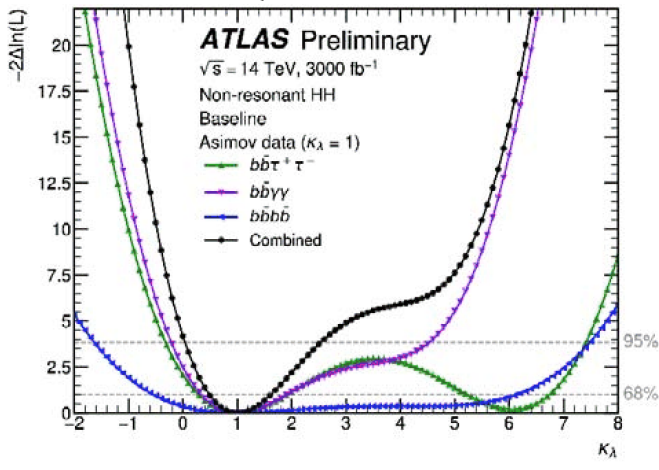
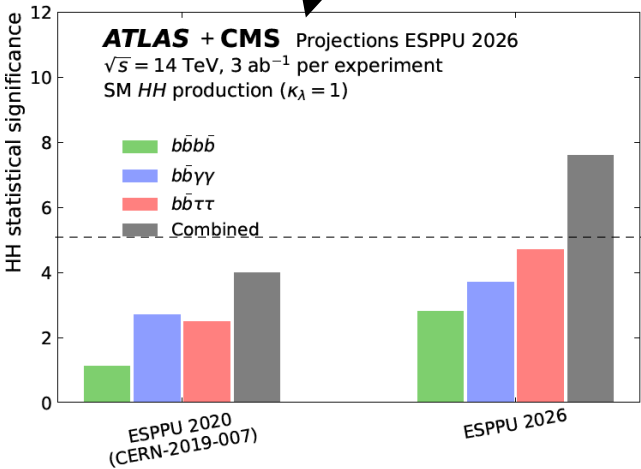


■ De la physique !

- ▶ Mais aussi source de développements techniques, de formation des étudiants, de développement de compétences des personnels, de collaboration internationale
- ▶ Nombreuses études récentes sur le potentiel de physique dans le cadre de la mise à jour 2026 de la stratégie européenne pour la physique des particules

■ Large éventail de buts de physique

- ▶ Paires de Higgs, couplages du Higgs, désintégrations rares du Higgs, nouvelle physique, ...



5sigma : découverte

Pourquoi envisage-t-on de nouveaux accélérateurs ?

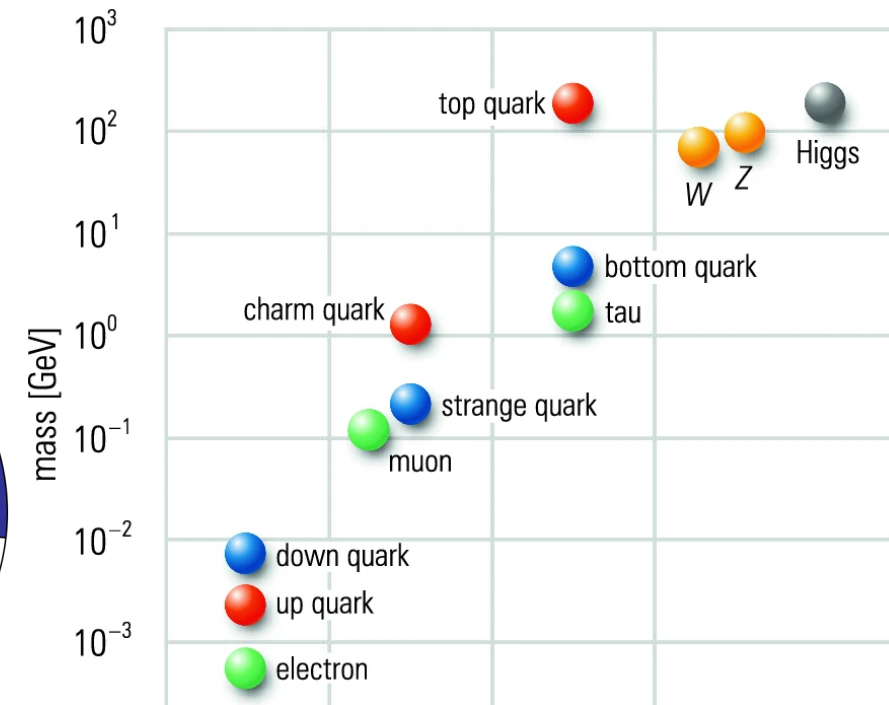
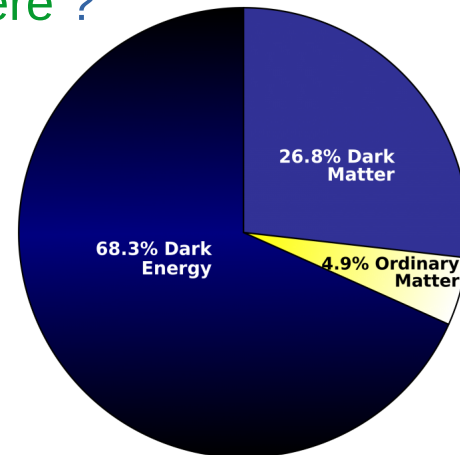


■ Pour la physique !

- ▶ Mais aussi source de développements techniques, de formation des étudiants, de développement de compétences des personnels, de collaboration internationale...
- ▶ ... dont découlent des retombées technologiques, économiques, de leadership, de prestige
- ▶ ... et des impacts environnementaux : émissions, extractivisme, consommation d'énergie

■ Plein de questions de physique

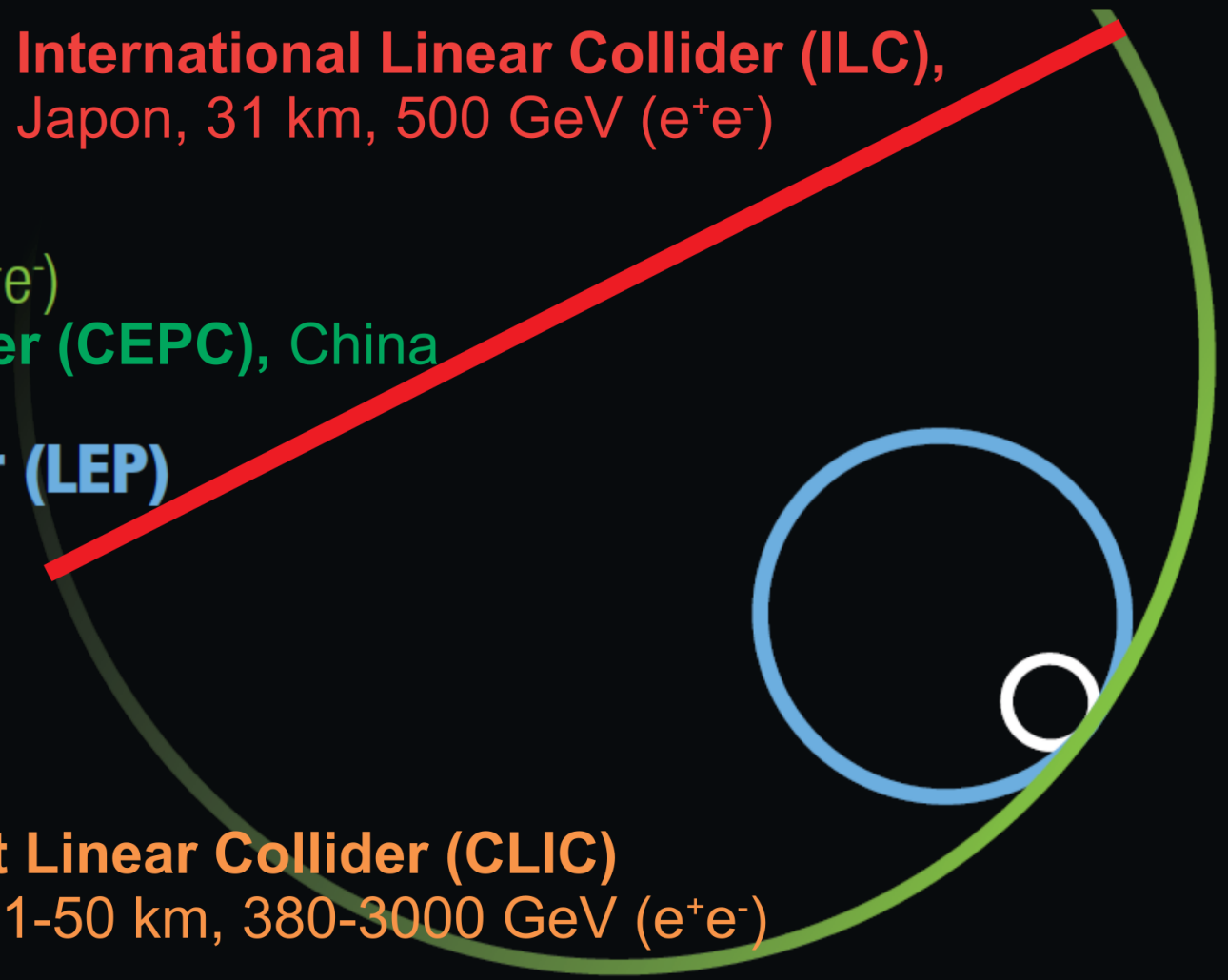
- ▶ Pourquoi trois familles de particules de matière ?
- ▶ Pourquoi une telle variété de masses ?
- ▶ Que sont la matière noire et l'énergie noire ?
- ▶ Pourquoi n'y a-t-il presque pas d'antimatière ?



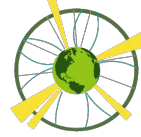
Possibles futurs collisionneurs après le HL-LHC



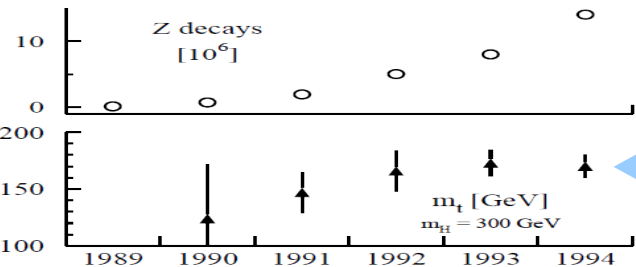
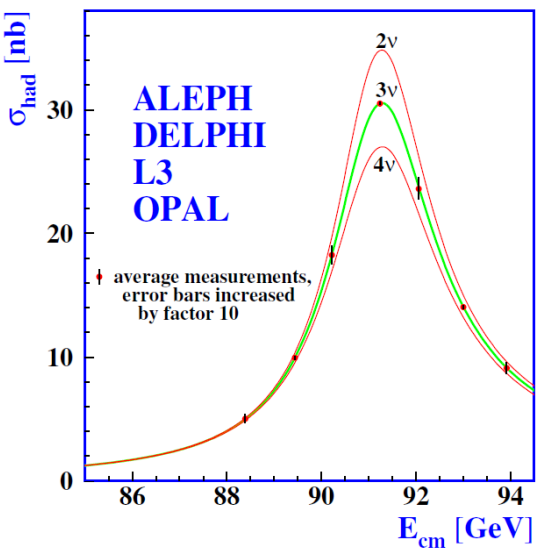
- **Future Circular Collider (FCC)**
Circumference: 90 -100 km
Energy: 100 TeV (pp) 90-350 GeV (e^+e^-)
- **Circular Electron Positron Collider (CEPC), China**
- **Large Hadron Collider (LHC)**
Large Electron-Positron Collider (LEP)
Circumference: 27 km
Energy: 14 TeV (pp) 209 GeV (e^+e^-)
- **Tevatron**
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^-)



Interactions du boson de Higgs

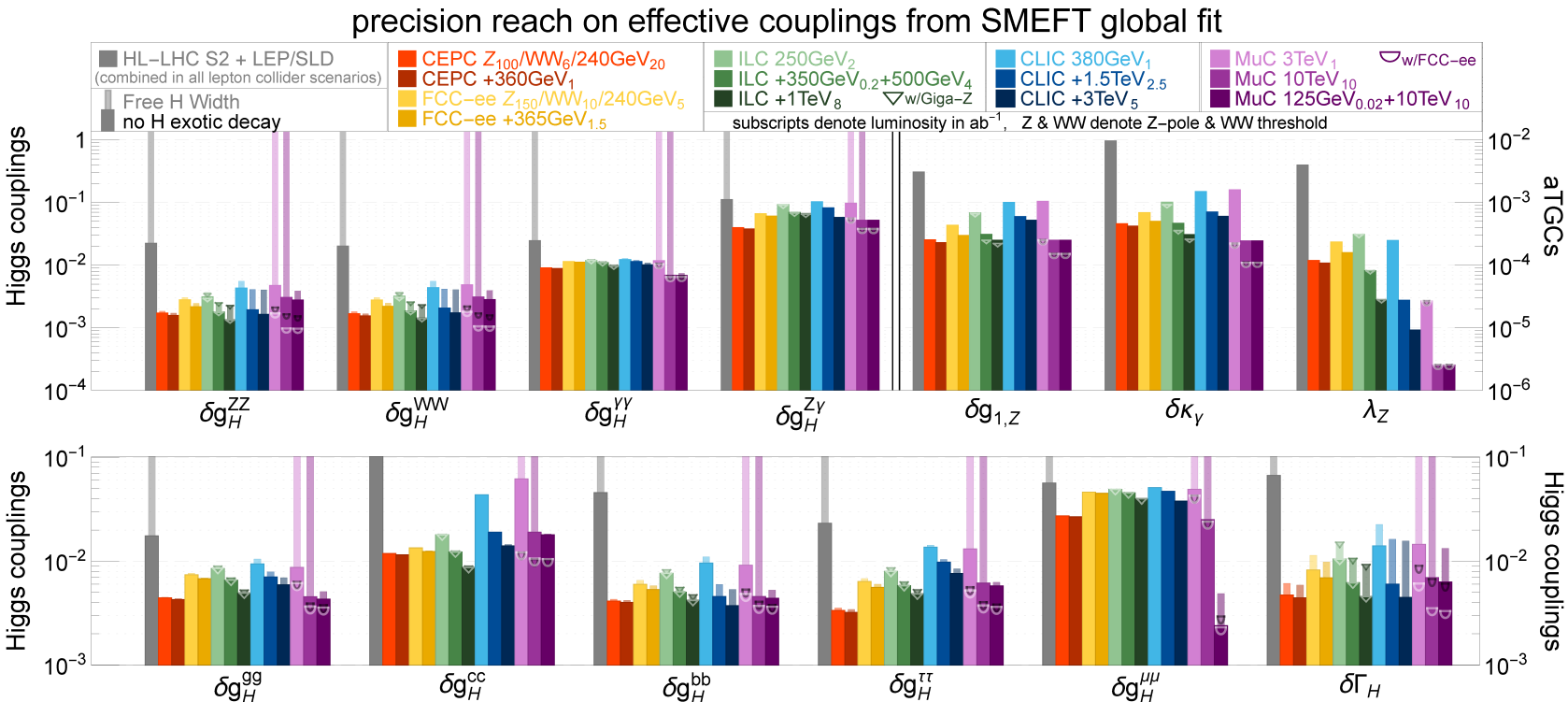


- Précision accrue d'au moins un ordre de grandeur par rapport au HL-LHC
 - Rend les mesures sensibles à des effets de nouvelle physique à des énergies plus élevées

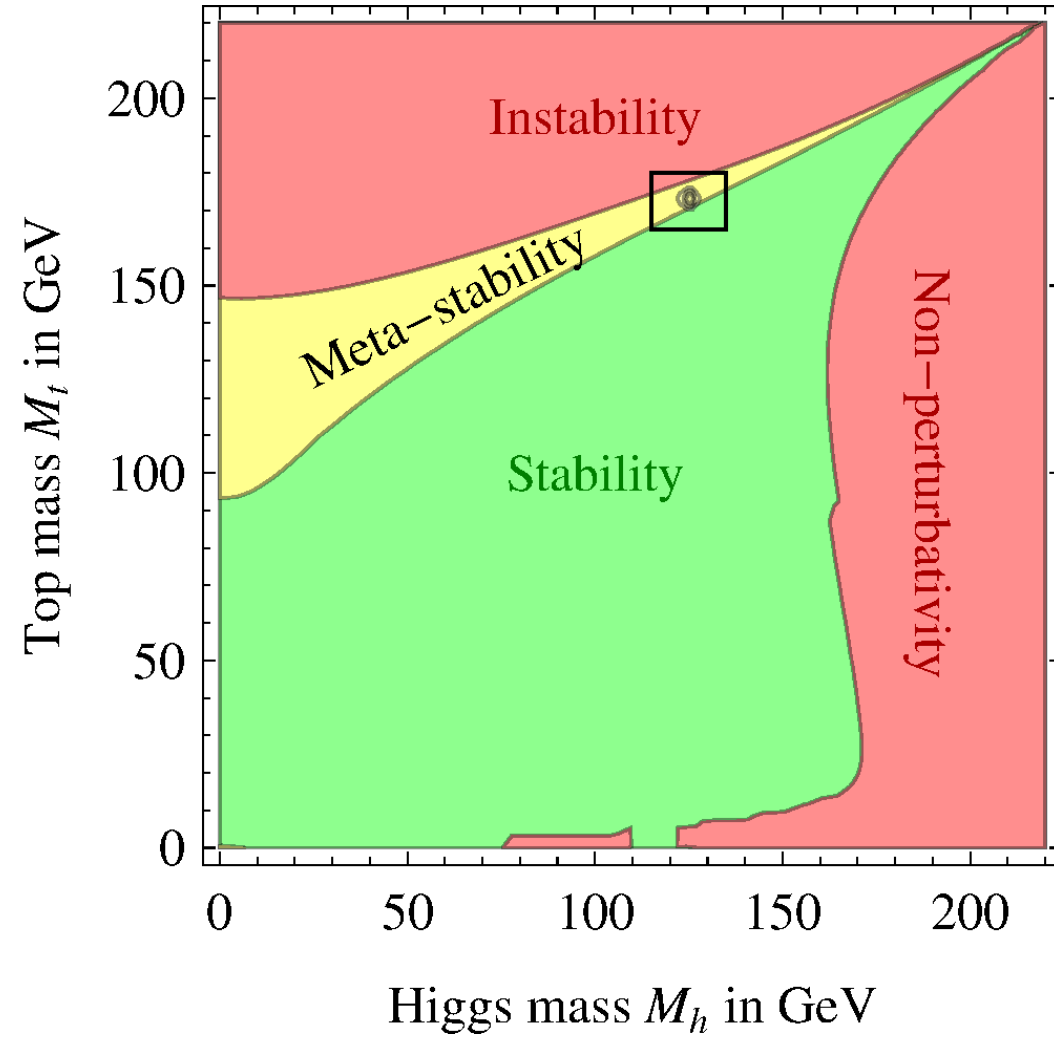
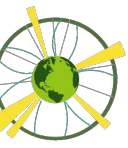


Prédiction du LEP
 $170 \pm 10^{+17}_{-19} \text{ GeV}$

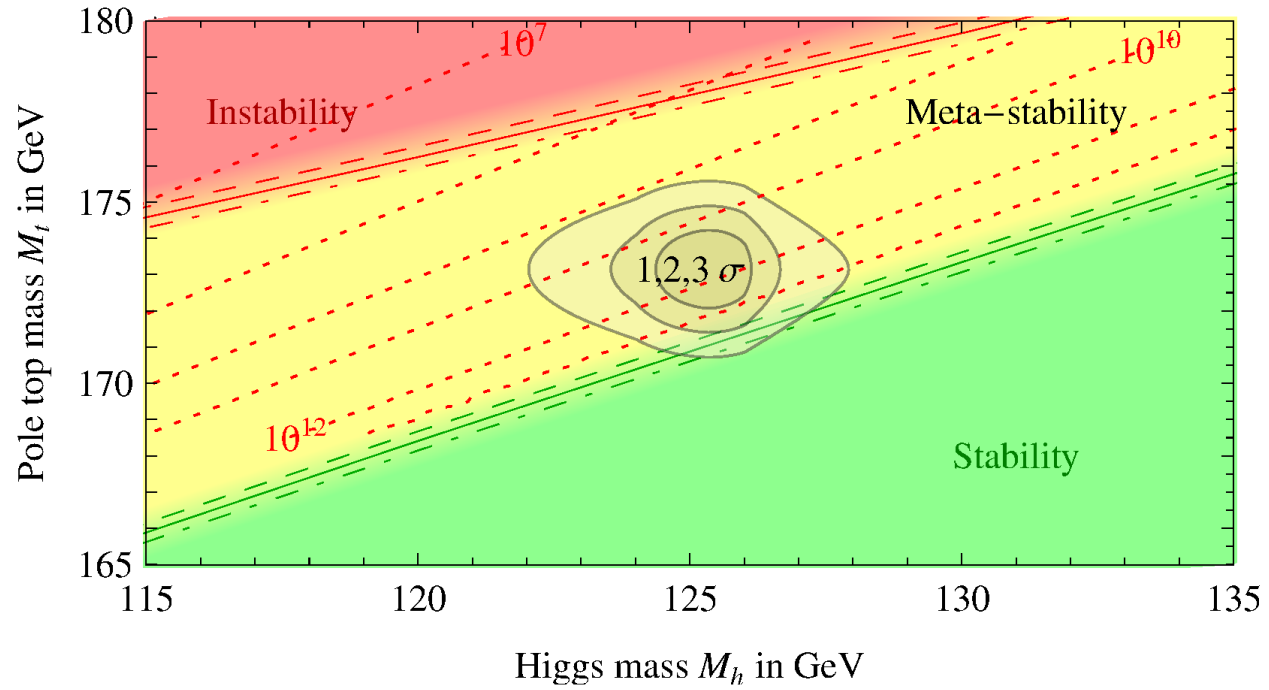
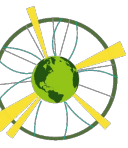
Quark top découvert en 1995 au Tevatron
Masse du quark top aujourd'hui : $172.52 \pm 0.33 \text{ GeV}$



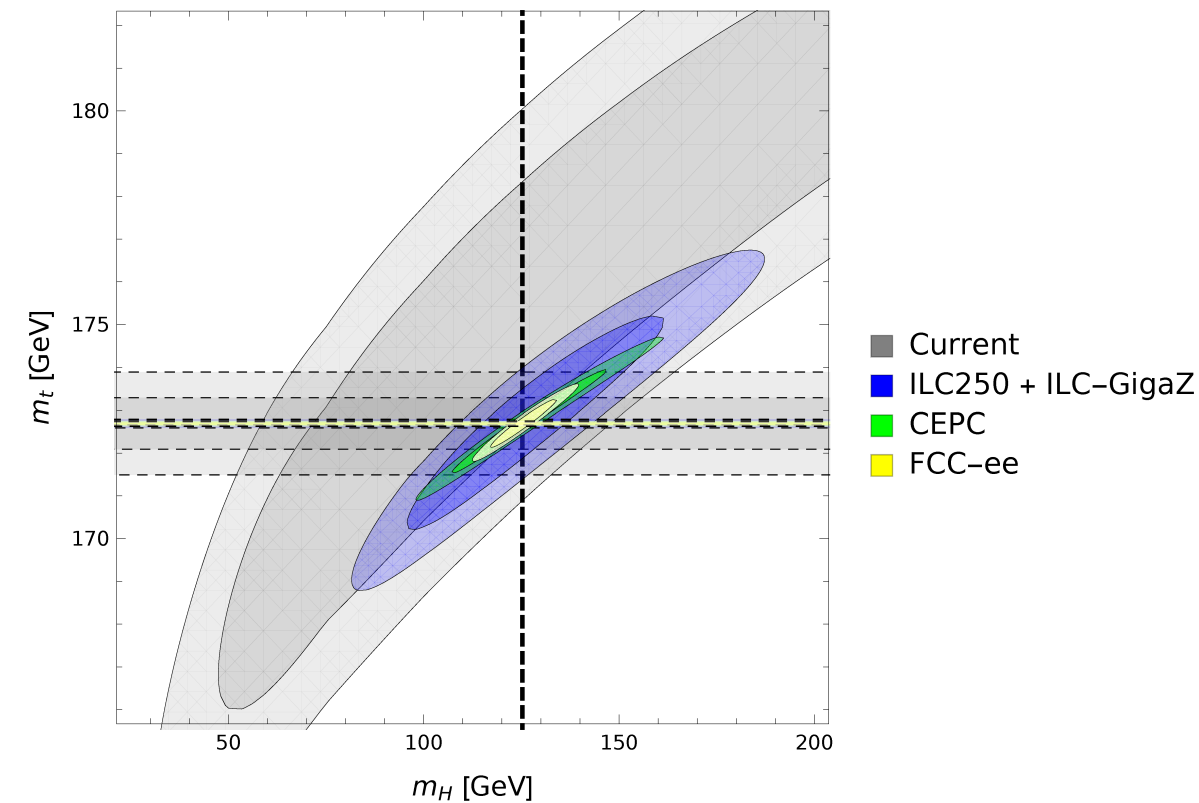
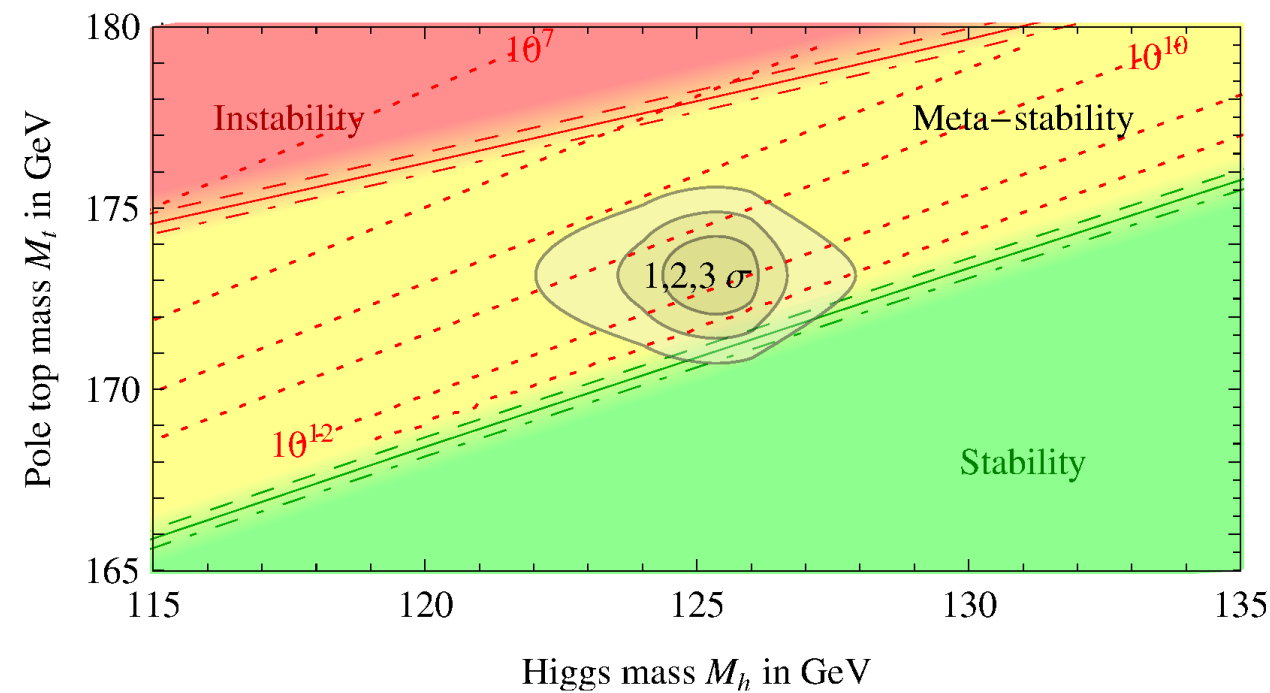
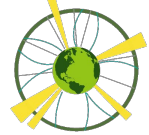
Un univers instable ?



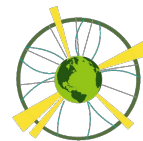
Un univers instable ?



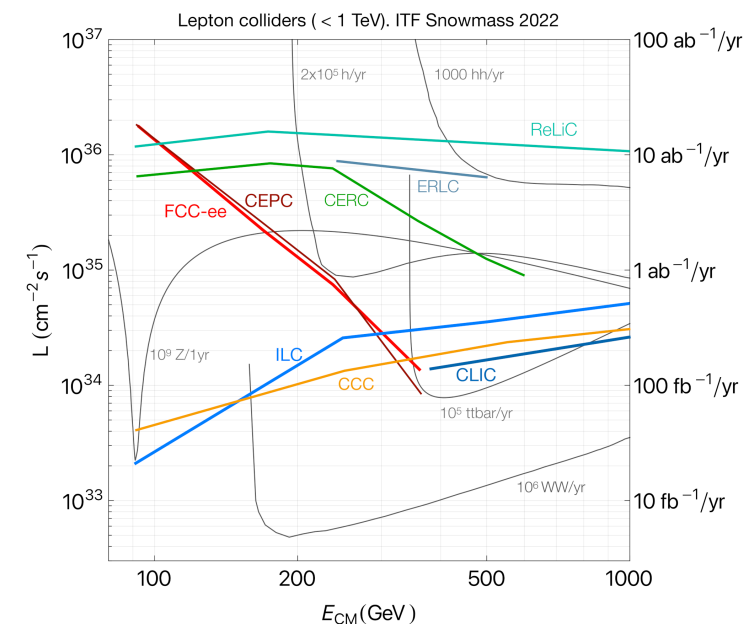
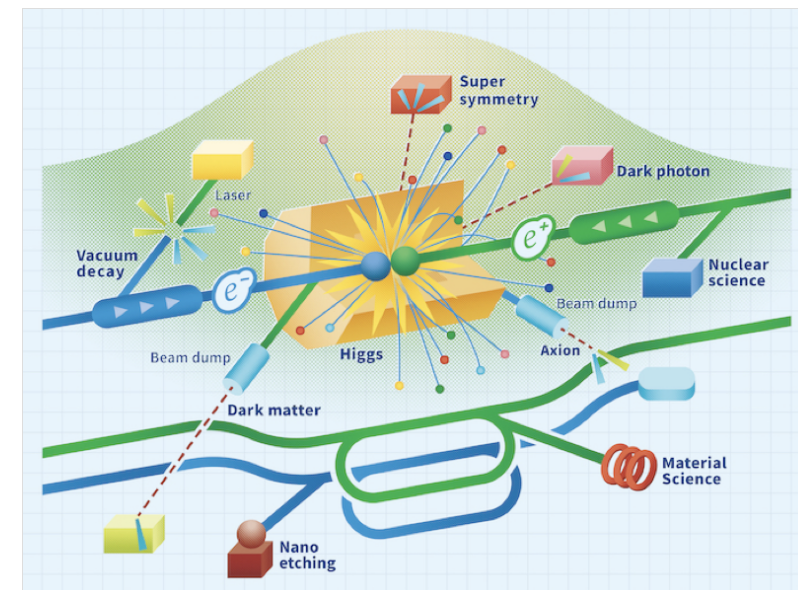
Un univers instable ?



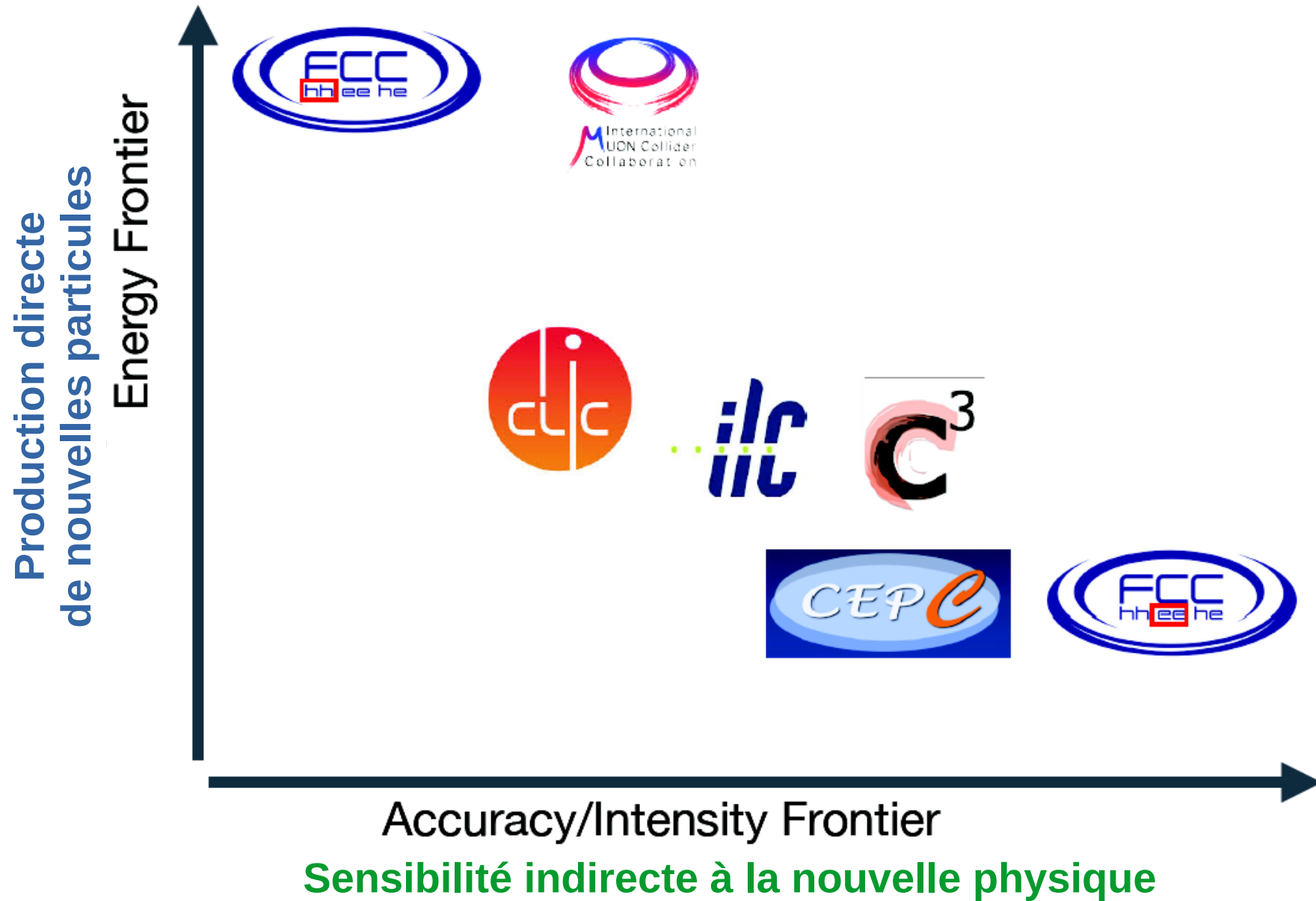
Principaux projets envisagés



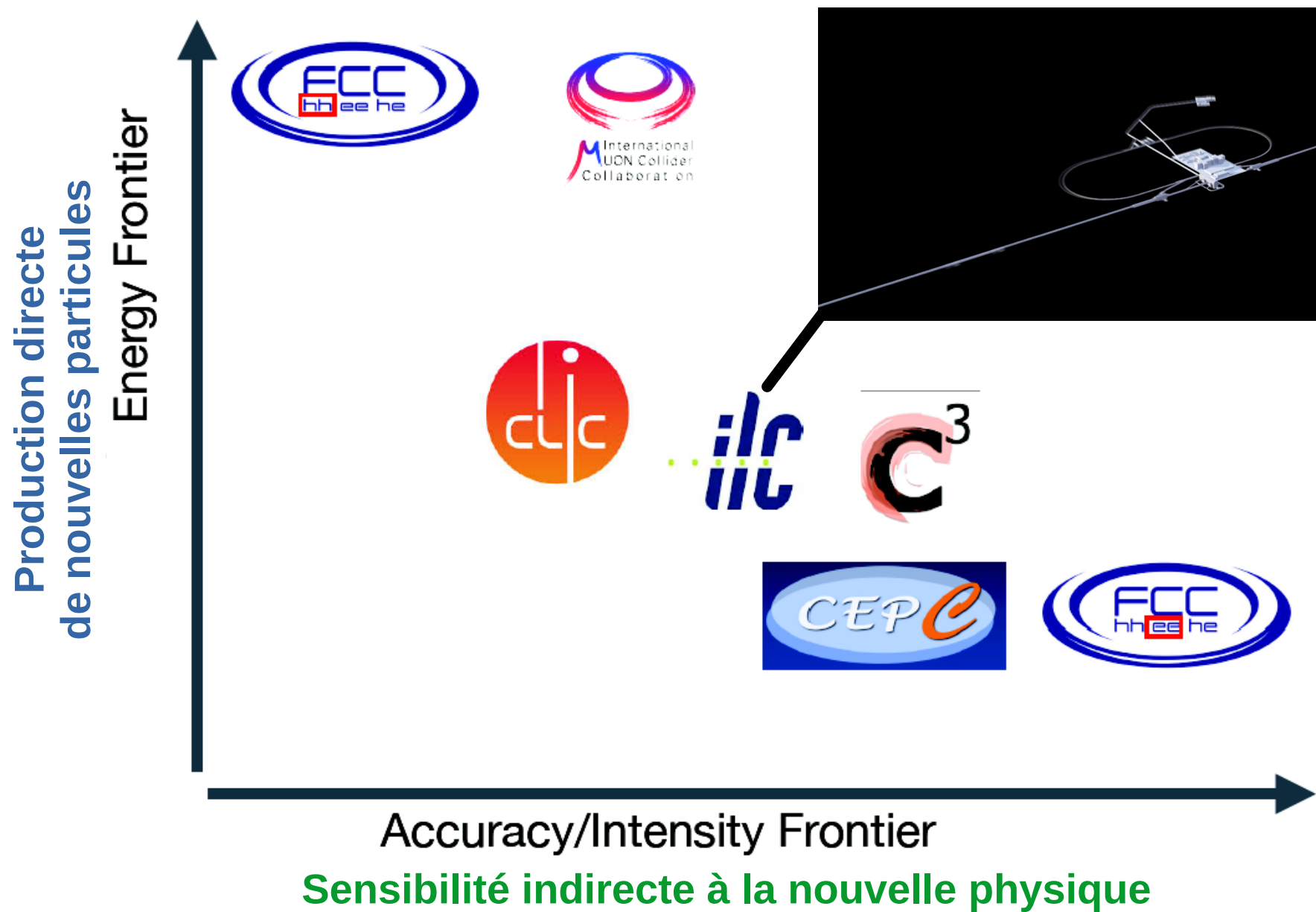
- **Collisionneurs linéaires** (énergie plus élevée)
 - ▶ **ILC** (International Linear Collider) : e^+e^- , 250–1000 GeV [Japon ?]
 - ▶ **CLIC** (Compact Linear Collider) : e^+e^- , 380 GeV–3 TeV [CERN]
 - ▶ **LCVision / LCF** (Linear Collider Facility) : programme intégré de collisionneur linéaire, par étape, en variant les technologies dans le temps si besoin [CERN]
- **Collisionneurs circulaires** (nombre de collisions plus élevé)
 - ▶ **FCC** (Future Circular Collider) [CERN]:
 - FCC-ee: e^+e^- , 90–350 GeV
 - FCC-hh: pp, ~100 TeV (aussi avec des ions)
 - FCC-e: ep
 - ▶ **CEPC/SppC** (Circular Electron-Positron Collider/Super Proton-Proton Collider) [Chine]:
 - CEPC: e^+e^- , 90–360 GeV
 - SppC: pp, ~70 TeV
 - ▶ **Collisionneur de muons** : $\mu^+\mu^-$, 3–10 TeV



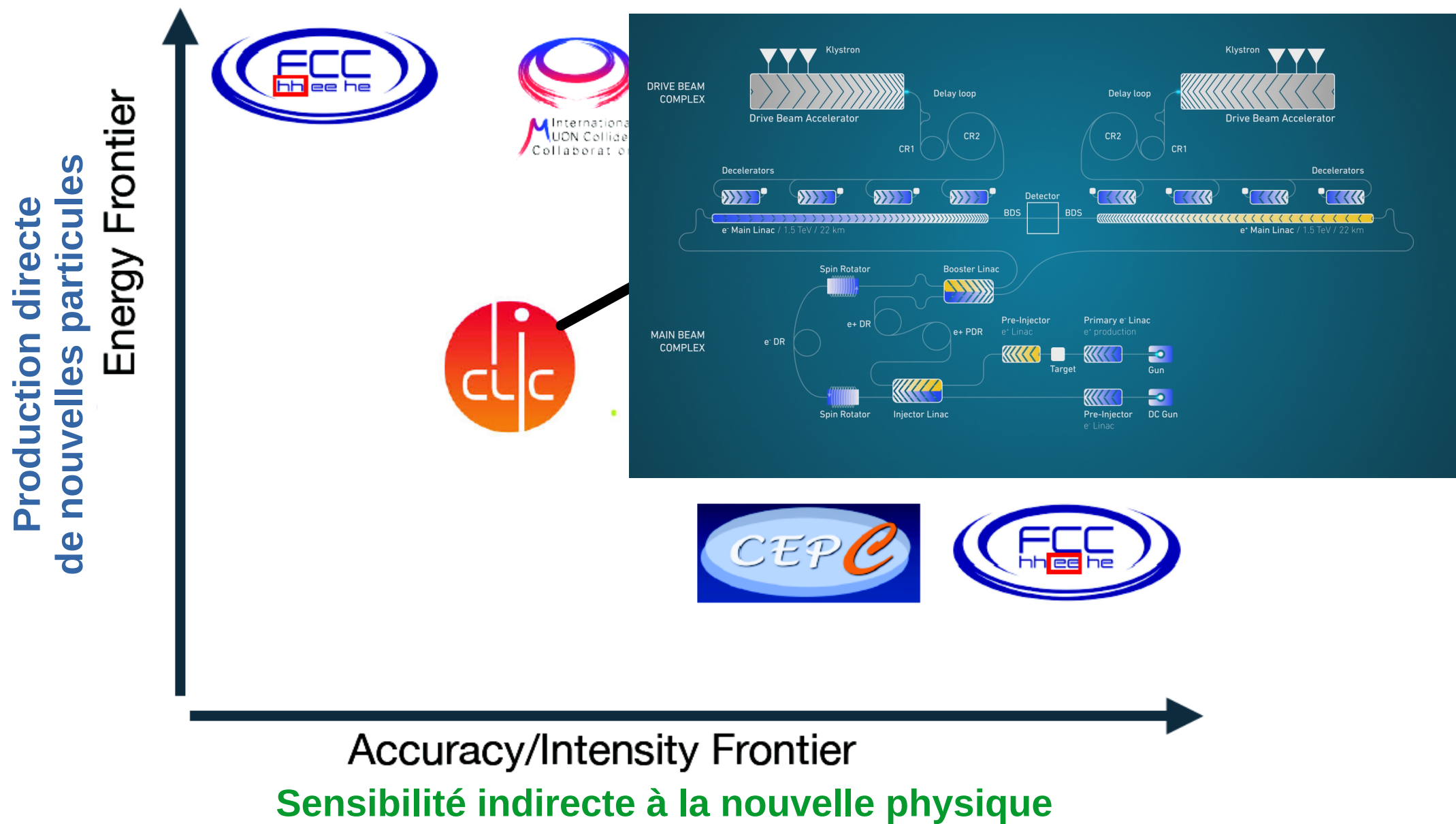
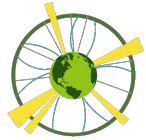
Frontière en énergie et en intensité



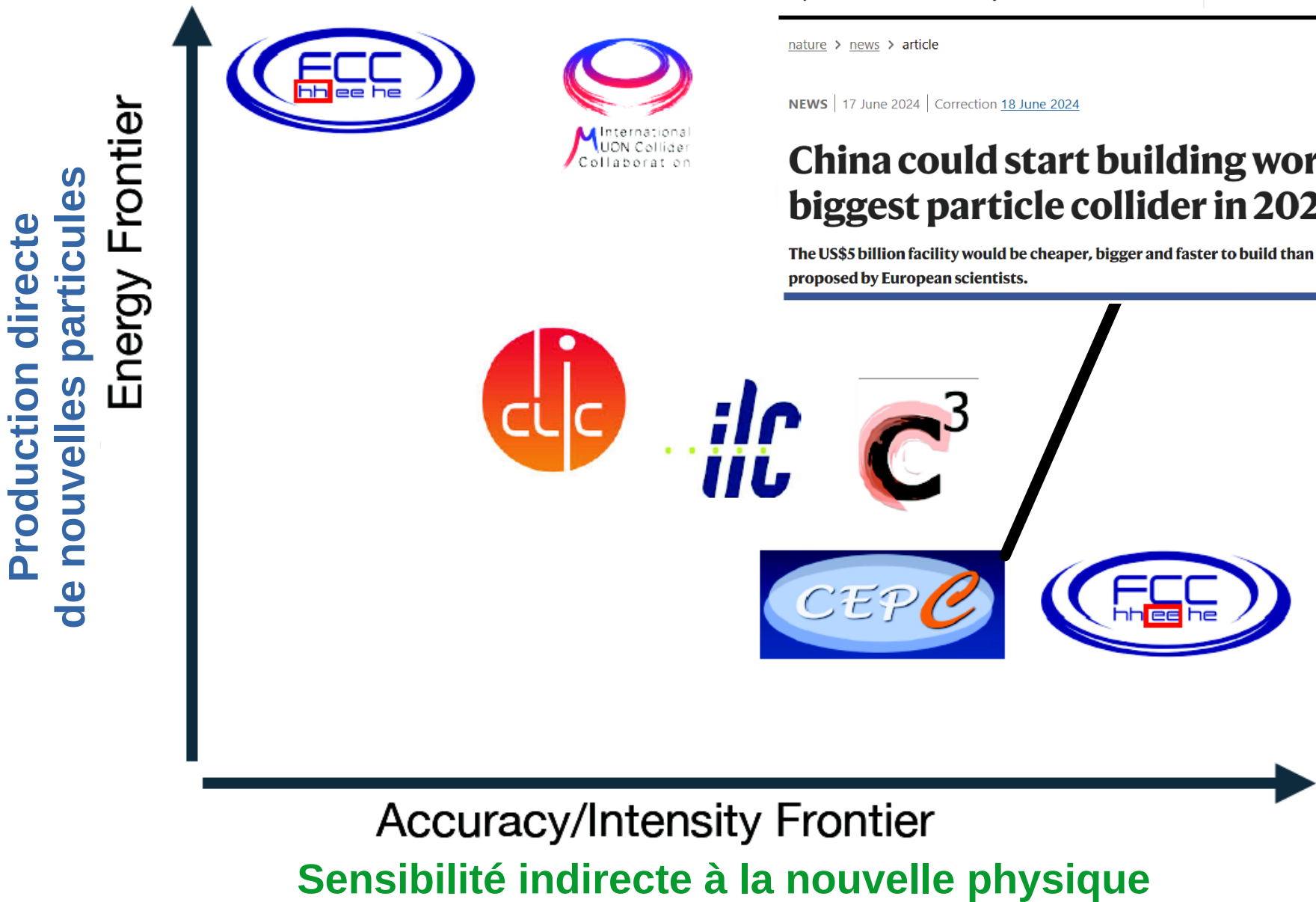
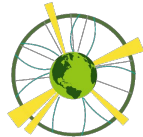
Frontière en énergie et en intensité



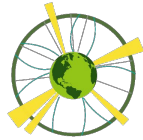
Frontière en énergie et en intensité



Frontière en énergie et en intensité



Frontière en énergie et en intensité



nature

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾ Subscribe

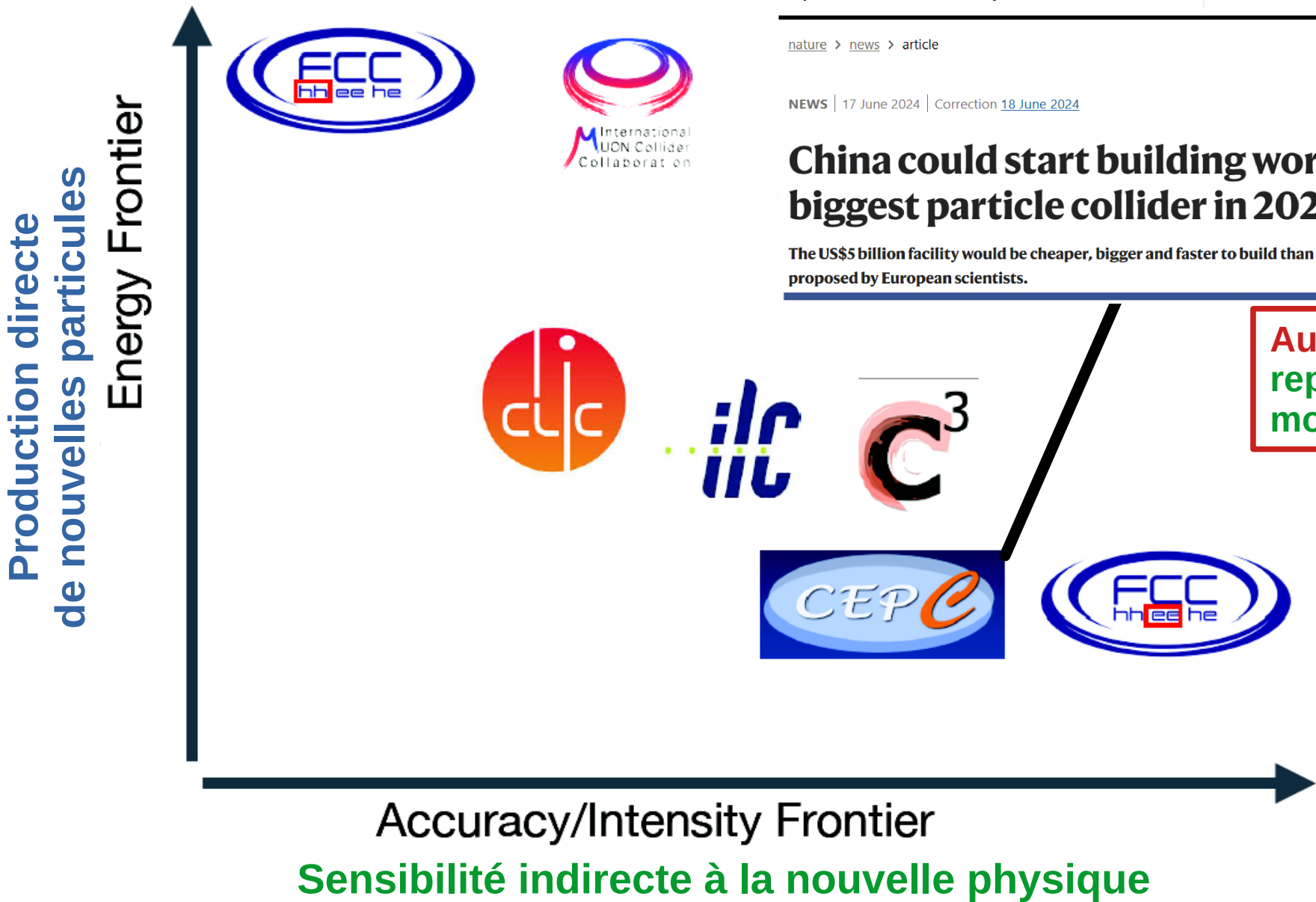
[nature](#) > [news](#) > article

NEWS | 17 June 2024 | Correction 18 June 2024

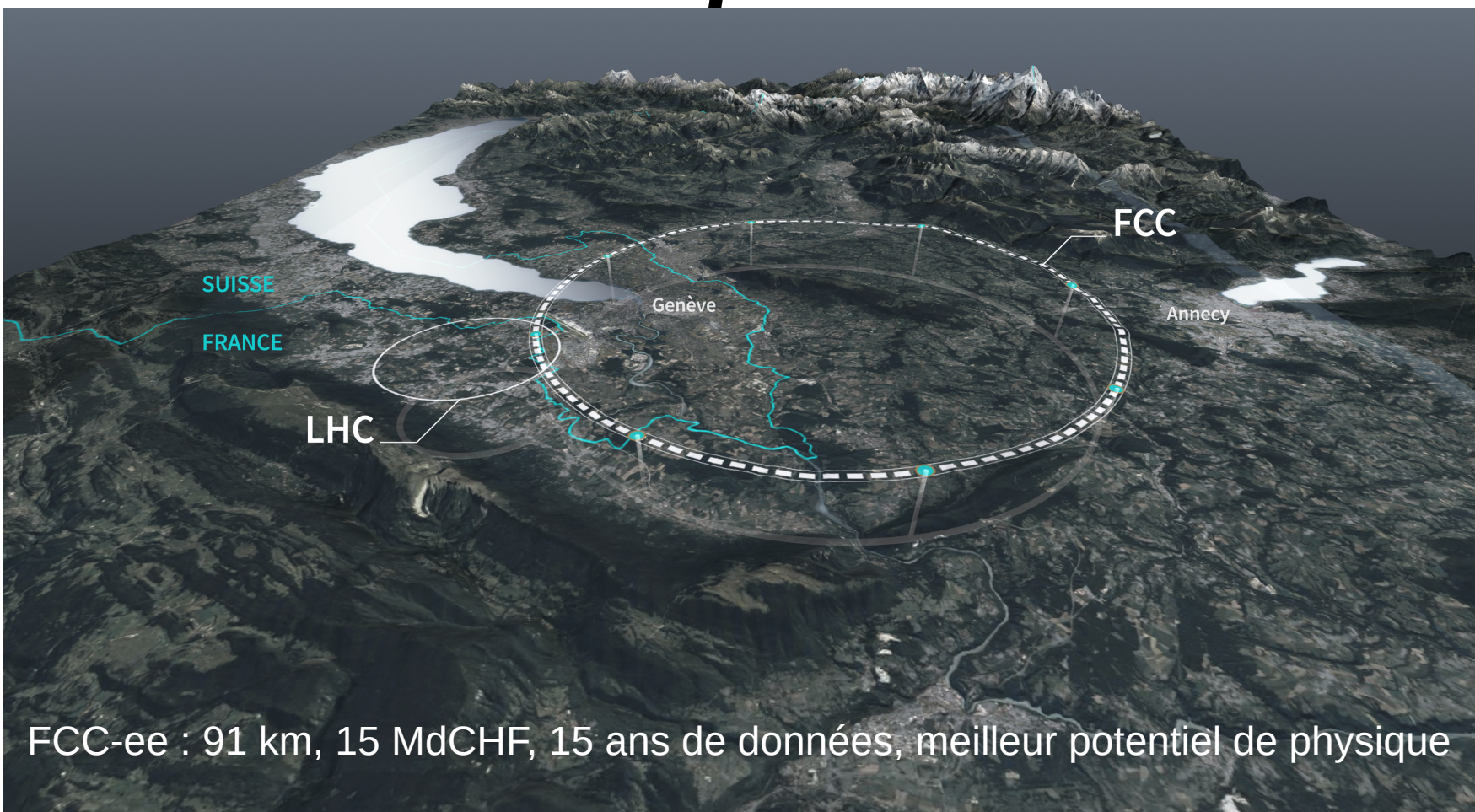
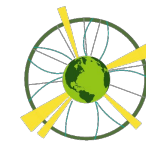
China could start building world's biggest particle collider in 2027

The US\$5 billion facility would be cheaper, bigger and faster to build than a similar one proposed by European scientists.

Automne 2025 :
repoussé d'au
moins 5 ans

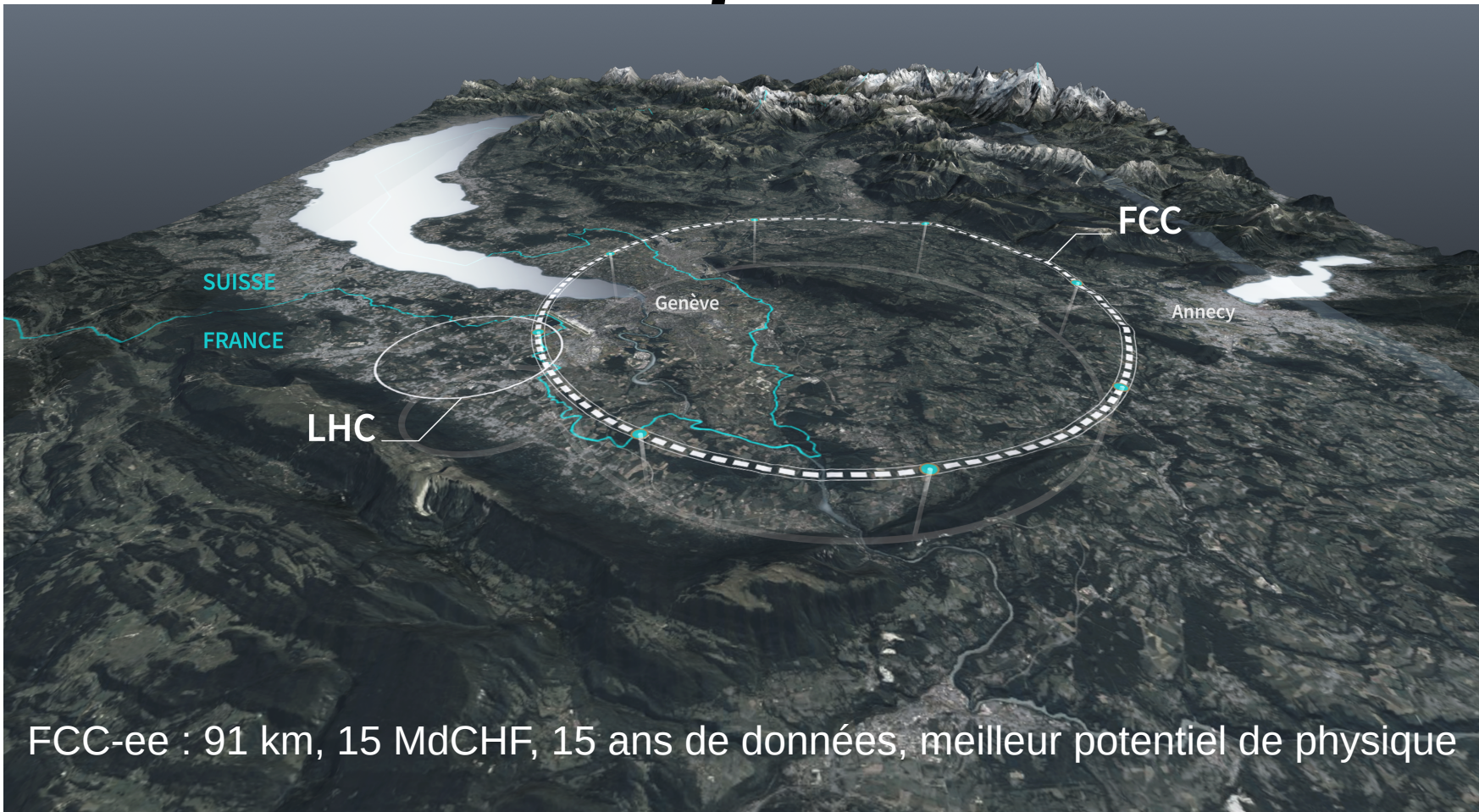
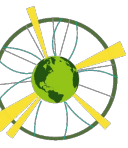


Frontière en énergie et en intensité



FCC-ee : 91 km, 15 MdCHF, 15 ans de données, meilleur potentiel de physique

Frontière en énergie et en intensité



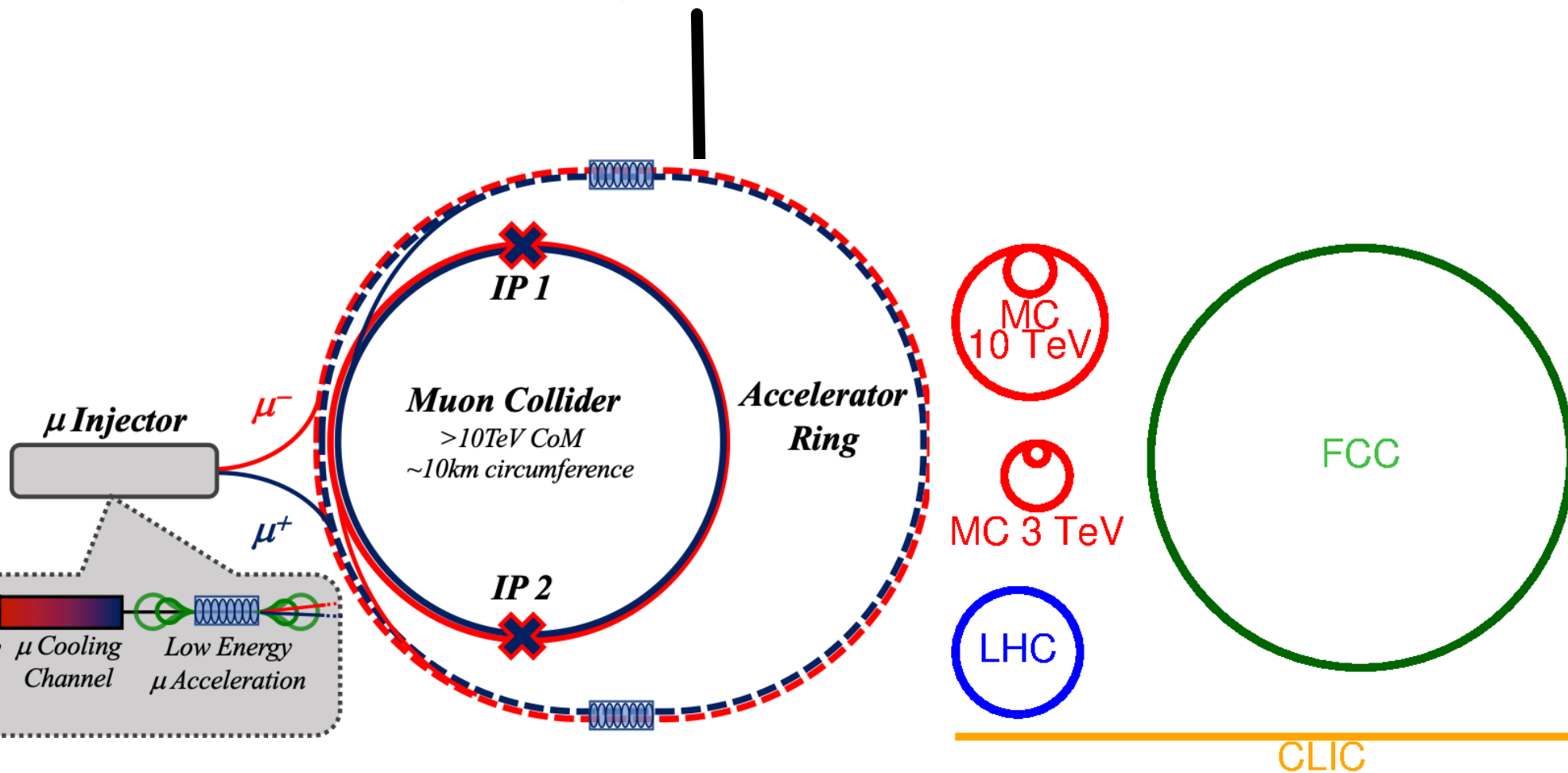
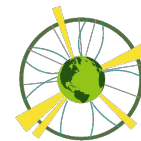
HOT OFF THE PRESS

FCC-ee : programme préféré par la communauté de physique des particules européenne [communiqué]



FCC-ee : 91 km, 15 MdCHF, 15 ans de données, meilleur potentiel de physique

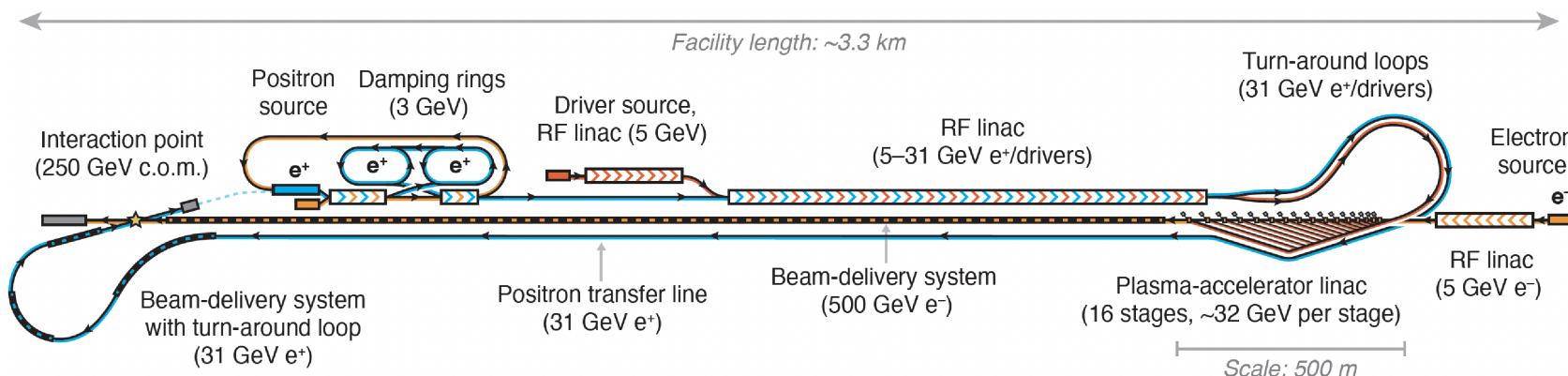
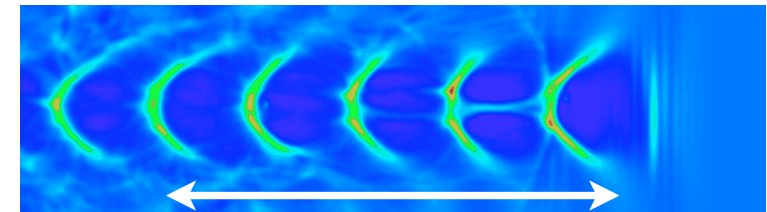
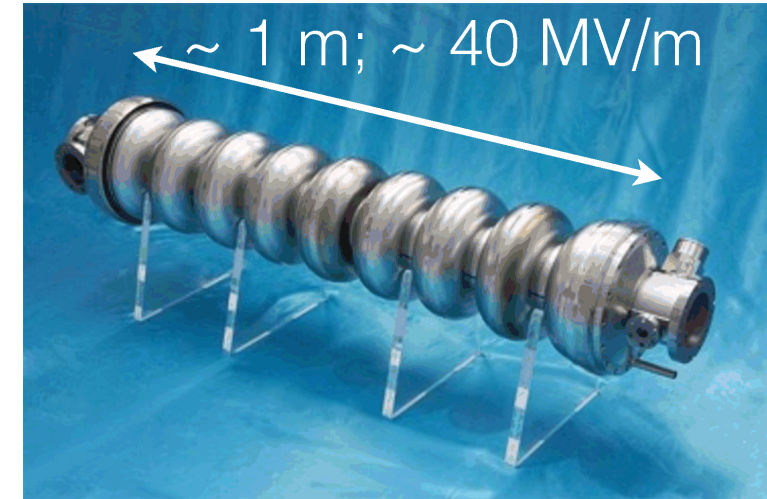
Frontière en énergie et en intensité



Accélération à champ de sillage plasma



- “Plasma wakefield acceleration”
- Déplacement des électrons par rapport aux ions dans le plasma (avec un faisceau de particules ou un laser)
 - ▶ Création d’une onde d’électrons, sur laquelle un faisceau d’électrons peut “surfer”
- Gradient d’accélération phénoménal
 - ▶ Potentiellement accélérateurs très petits (physique, hôpitaux)
- Concept de collisionneur e^+e^- HALHF
 - ▶ Plasma pour les électrons, linac classique pour les positrons
 - ▶ Même énergie de collision dans 3,3 km qu’avec un ILC de 20 km

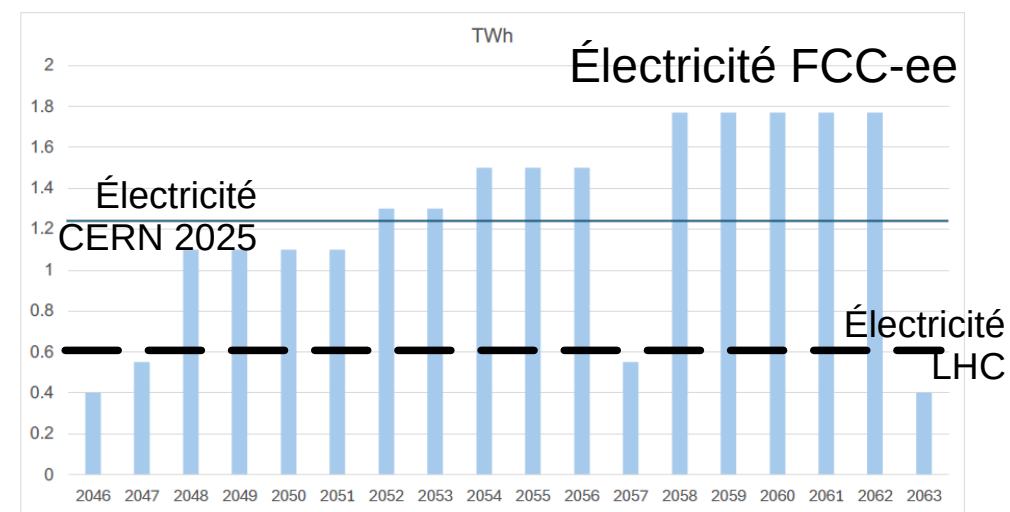
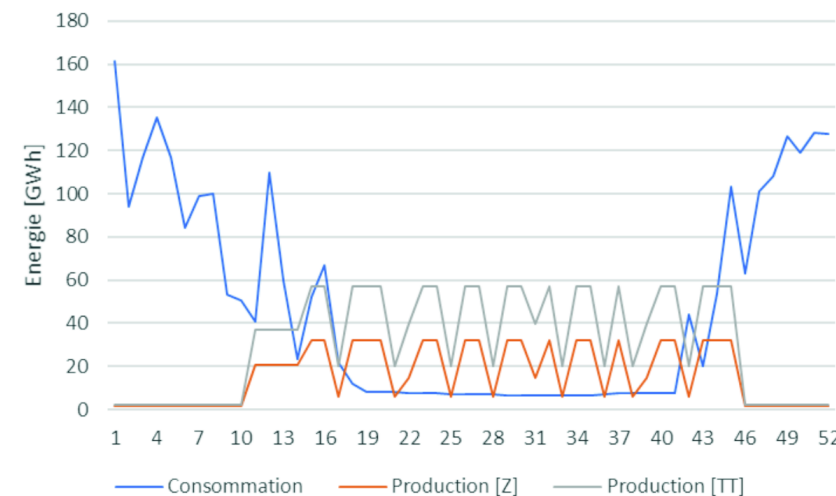


$\sim 50 \mu\text{m}$; ~ 100 GV/m

Durabilité des futures machines

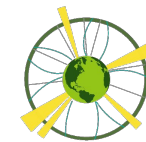


- Gros projets ► gros impacts environnementaux
- Tentatives de minimisation en optimisant le design
- Malgré les efforts, encore (beaucoup) de travail pour faire évoluer les mentalités des scientifiques
 - Combien d'émissions/d'impacts environnementaux ou sociétaux sont acceptables ? Au nom de quel impératif ?
 - Ex : consommation électrique
 - FCC-ee seul : entre 1 et 1,8 TWh/an : **augmentation !**
 - Même si c'est une énergie décarbonée, même renouvelable



- Prise de conscience pas encore à la hauteur des enjeux

Motivations à l'âge de l'anthropocène et du Trumpisme



- Pour la beauté de la science ?
 - ▶ Pure curiosité, au service de l'humanité toute entière
- Rapport Draghi sur la compétitivité européenne (sept 2024)
 - ▶ *"Si la Chine devait gagner cette course et que son collisionneur circulaire commençait à fonctionner avant celui du CERN, l'Europe risquerait de perdre son leadership dans le domaine de la physique des particules, ce qui pourrait mettre en péril l'avenir du CERN."*
- Très grandes incertitudes dans le monde (de la recherche)
 - ▶ Pressions de l'administration US sur place et autour du monde
 - ▶ Difficultés dans d'autres pays
- Les grandes infrastructures sont-elles soutenables ?
 - ▶ Consommation énergétique
 - ▶ Consommation de ressources matérielles, financières, humaines
 - ▶ Toujours plus grand dans un monde limité ?
 - Viser plutôt de nouvelles approches ? Renoncer à certaines recherches ?

"There is no particle physics on a dead planet" S. Renner



TRIBUNE 25/2/2025

Il faut renoncer au futur méga-collisionneur de particules du Cern, par 400 scientifiques

L'EXPRESS 1/3/2025

▶ "L'empreinte carbone n'est pas significative" : le Cern répond aux critiques sur son futur collisionneur



TRIBUNE 11/3/2025

Pourquoi l'Europe devrait approuver la construction du futur collisionneur de particules du Cern
nature

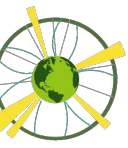
EDITORIAL | 24 March 2025

What CERN does next matters for science and for international cooperation
nature

NEWS FEATURE | 19 March 2025 | Correction [19 March 2025](#)

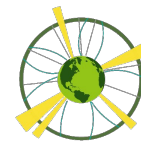
The biggest machine in science: inside the fight to build the next giant particle collider

Conclusion



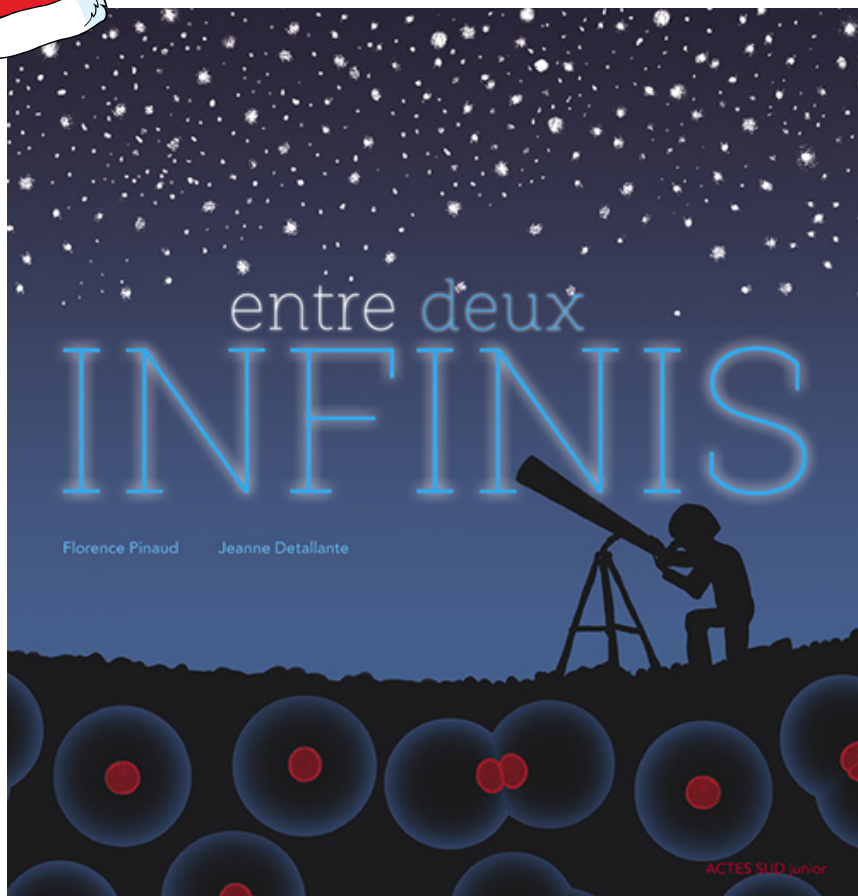
- **LHC** (2010-2026) : grand succès de physique, technologique, de collaboration mondiale
 - ▶ Fonctionne très au-delà des spécifications
 - ▶ Découverte du boson de Higgs, mesures de précision
- **HL-LHC** (2030-2041)
 - ▶ 6 fois plus de données qu'à la fin du LHC
 - ▶ Importantes mises à niveau accélérateur & détecteurs
 - ▶ Potentiel d'observation de l'autocouplage du Higgs
- Et après ?
 - ▶ Usine à Higgs (e^+e^-)
 - Linéaire ou circulaire ?
 - Au Japon ? En Chine ? En Europe ?
 - ▶ Machine à la frontière en énergie
 - Collisionneur pp en Chine ou au CERN ?
 - Collisionneur de muons ?
 - ▶ Concepts émergents
 - Accélérateur à récupération d'énergie, accélération plasma ?





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/entre-deux-infinis>