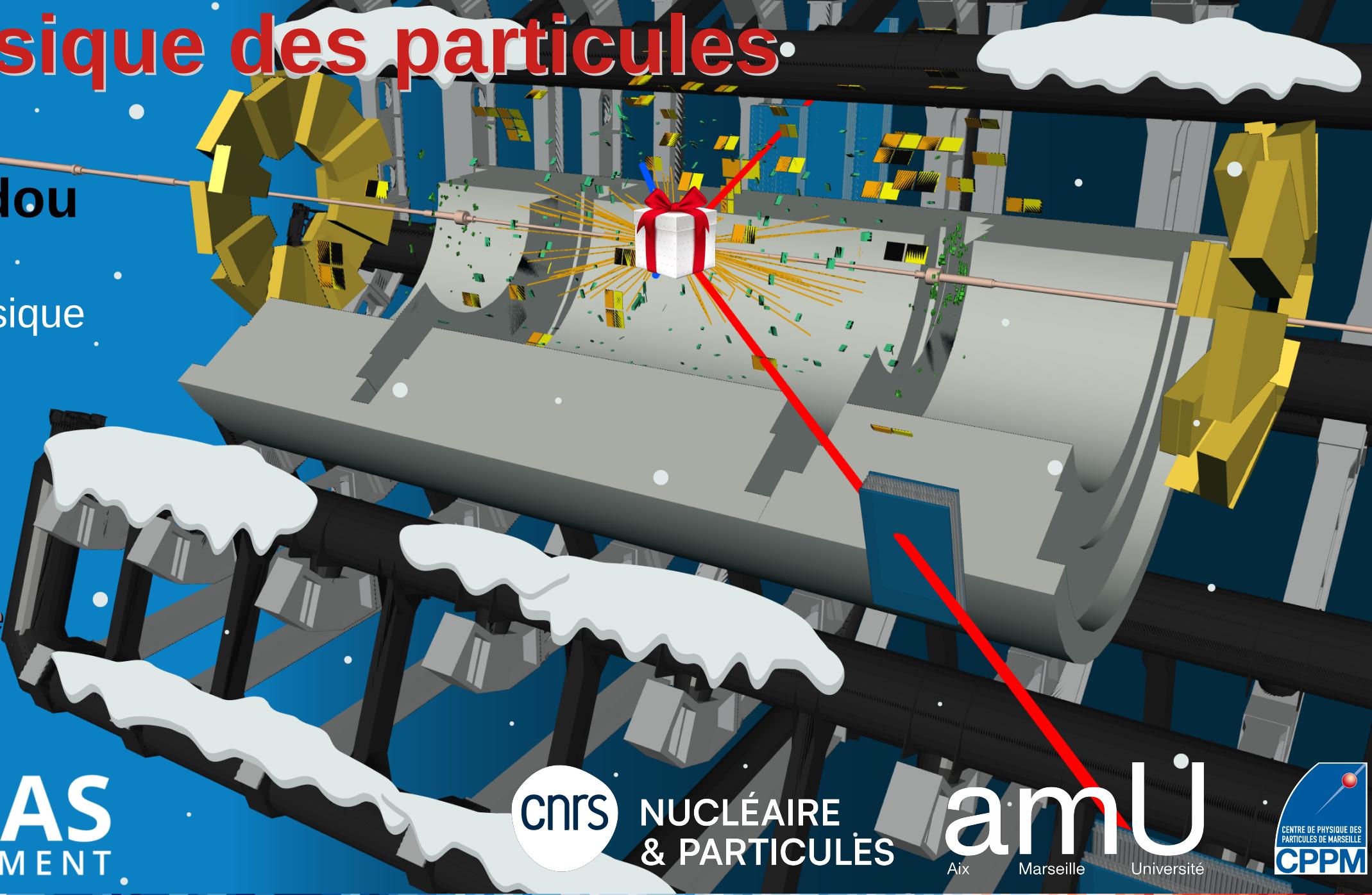


La physique des particules

Yann Coadou

Centre de physique
des particules
de Marseille

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



NUCLÉAIRE
& PARTICULES

amU
Aix
Marseille
Université





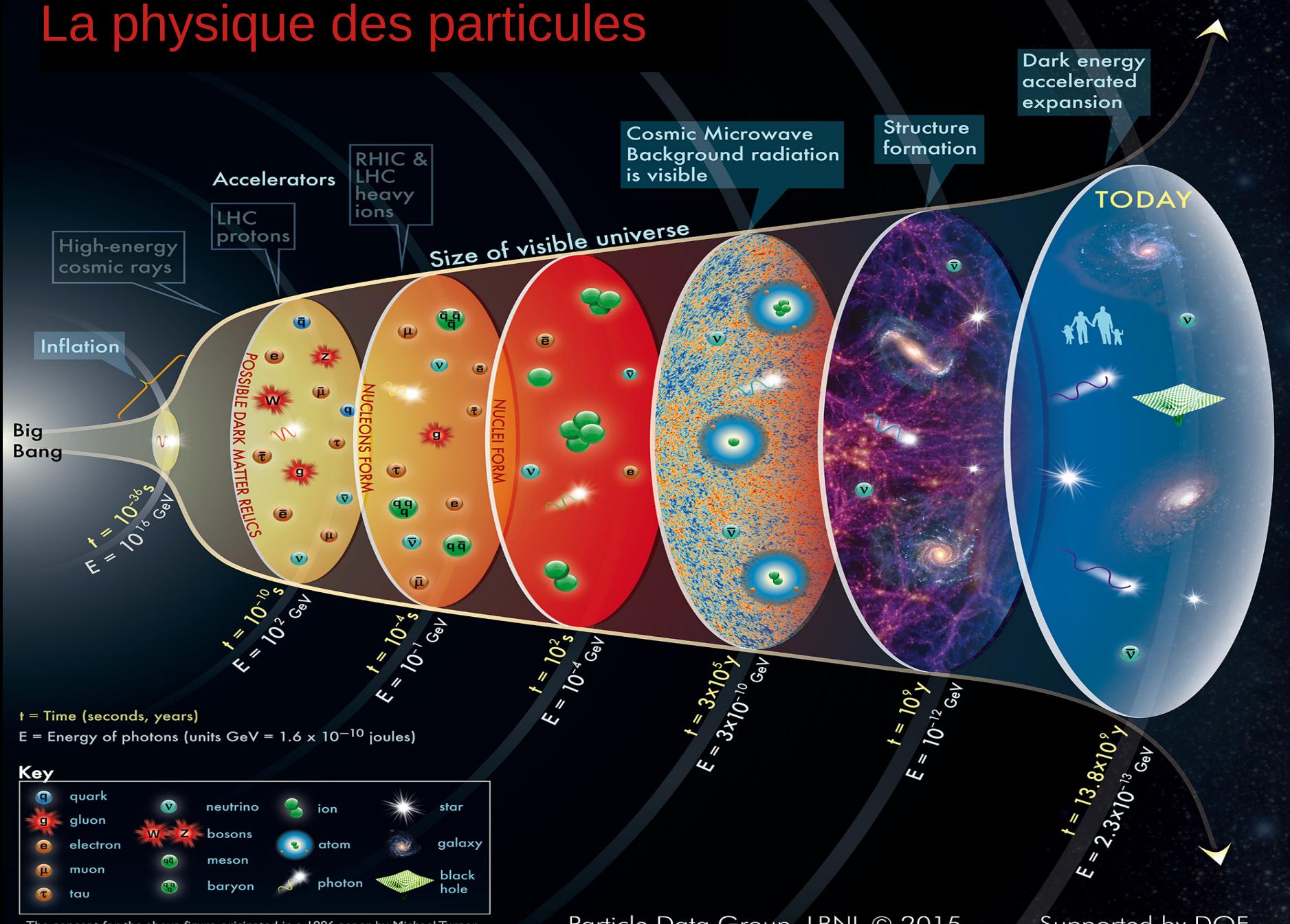
Yann Coadou

- 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
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





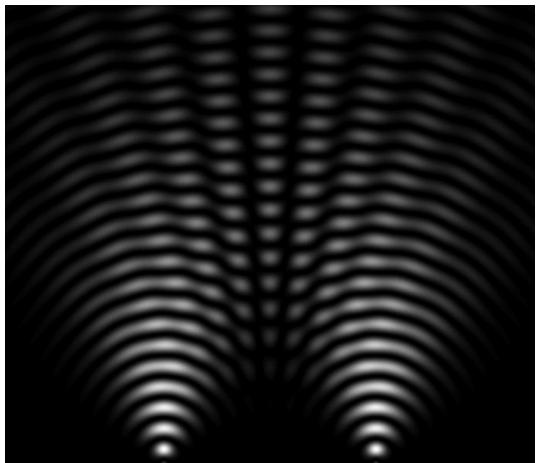
La physique des particules





État des lieux à la fin du XIX^e siècle

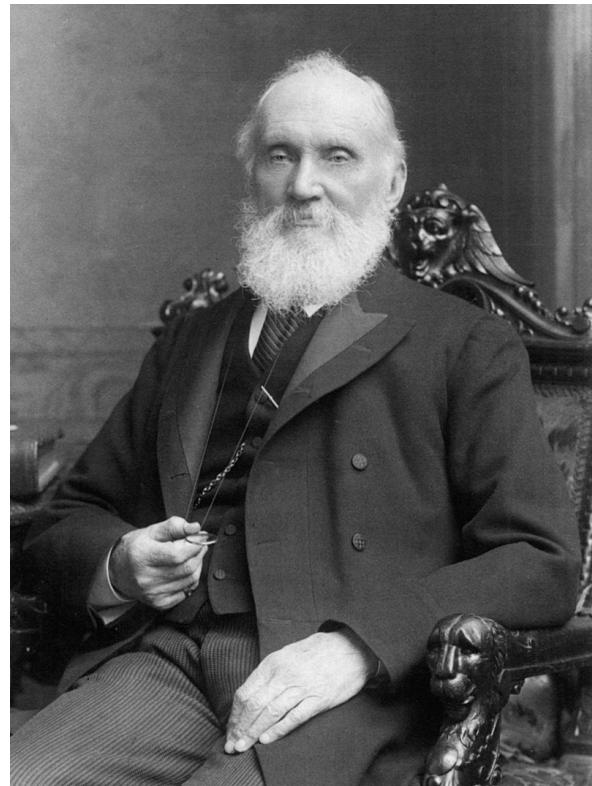
- Mécanique newtonienne [Newton (1643-1727)]
 - ▶ principe d'inertie
 - ▶ loi de la dynamique
 - ▶ gravitation universelle
- Mécanique analytique [Lagrange (1736-1813)]
 - ▶ principe de moindre action
- Optique ondulatoire [Fresnel (1788-1827) – Young (1773-1829)]
 - ▶ nature ondulatoire de la lumière
- 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



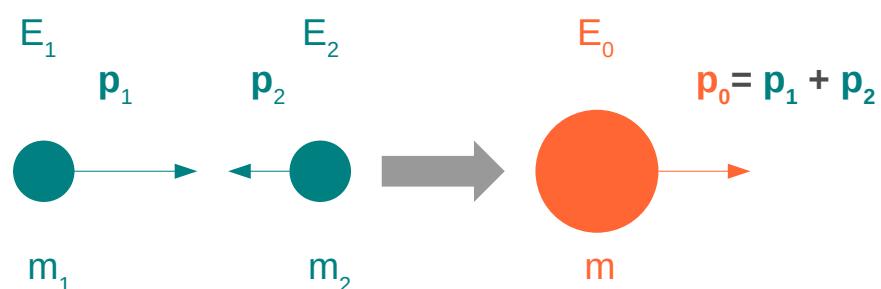
Relativité restreinte : masse et énergie

$$E = mc^2$$

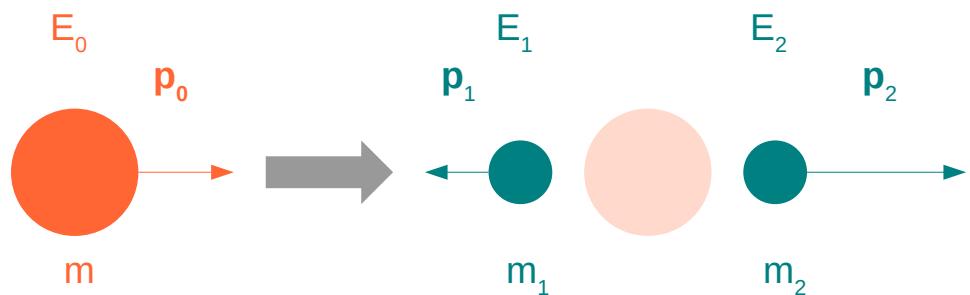
■ Équivalence masse-énergie

- ▶ 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 : $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$ (p : quantité de mouvement)
- ▶ Transformation de l'énergie cinétique en masse ▶ Transformation de la masse en énergie cinétique

Collision



Désintégration

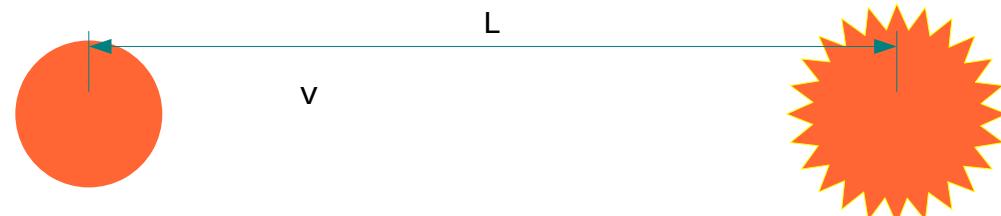




Relativité restreinte : espace-temps

■ Contraction des longueurs et dilatation du temps

- ▶ L'écoulement du temps dépend du référentiel
- ▶ Exemple : bombe programmée pour exploser après 1 s



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

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

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

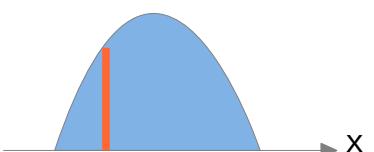
- Deux descriptions antagonistes !

- **corpuscule** : objet ponctuel avec une position et une impulsion bien définies

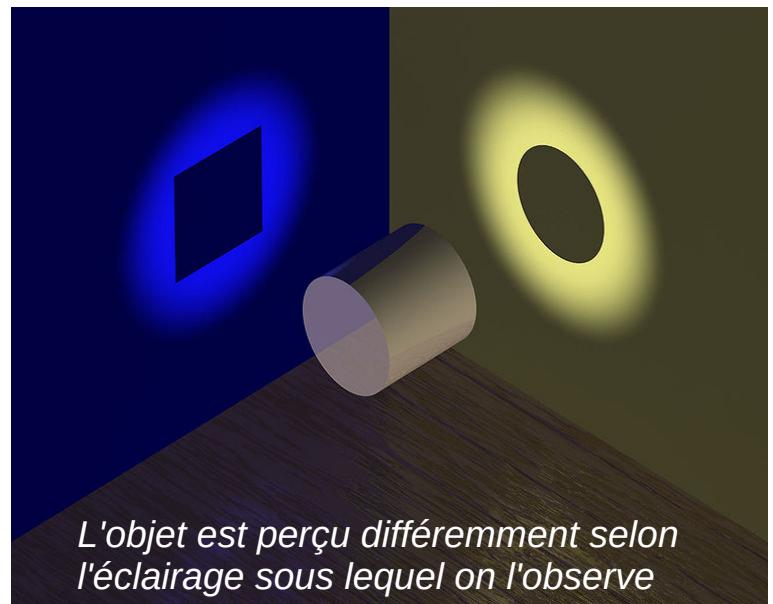
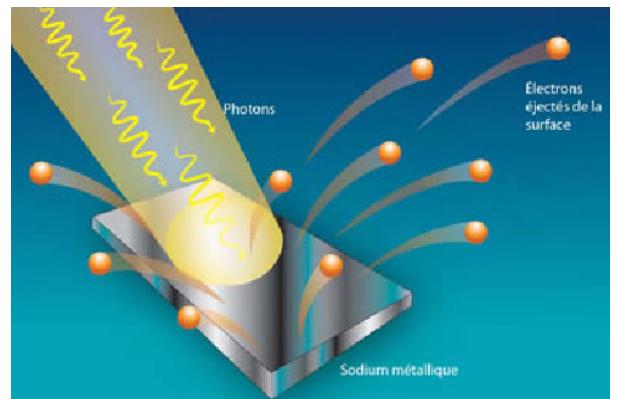
- **onde** : objet étendu pouvant interférer

- ▶ **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

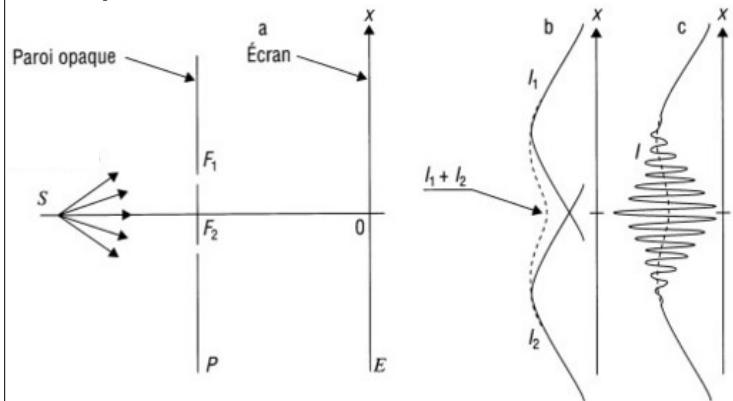




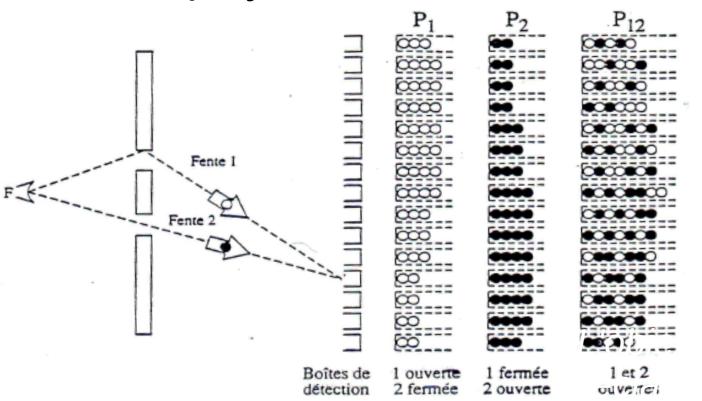
Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young

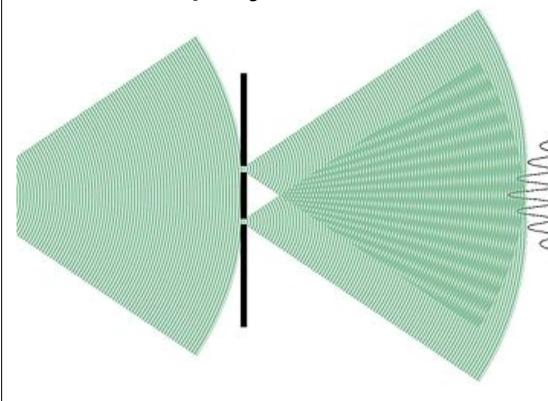
L'expérience :



Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde

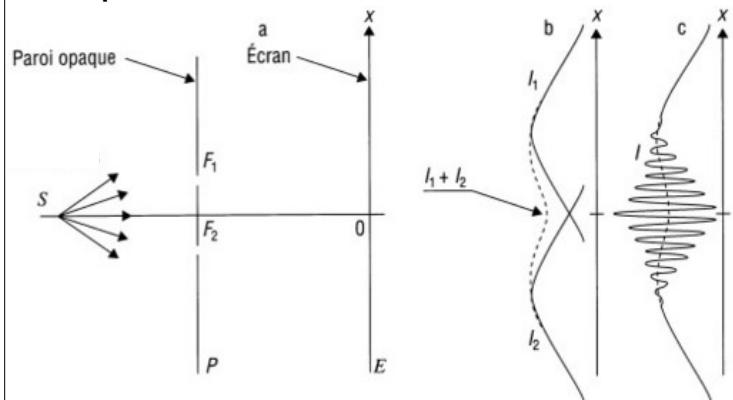




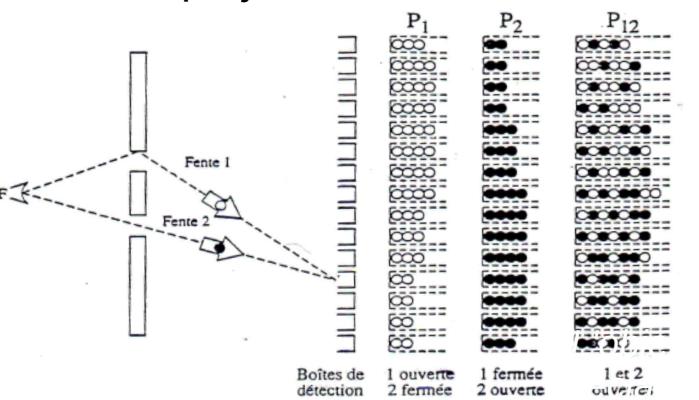
Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young

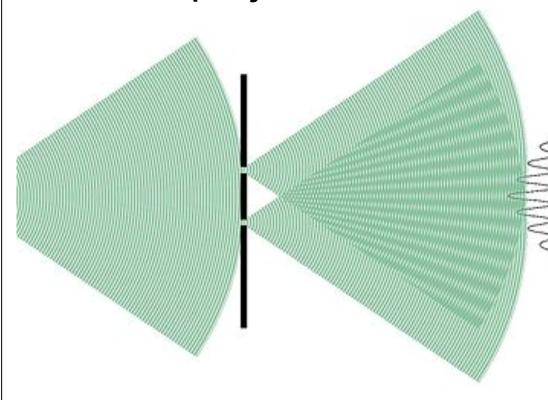
L'expérience :



Cas #1: projectile = bille



Cas #2: projectile = onde



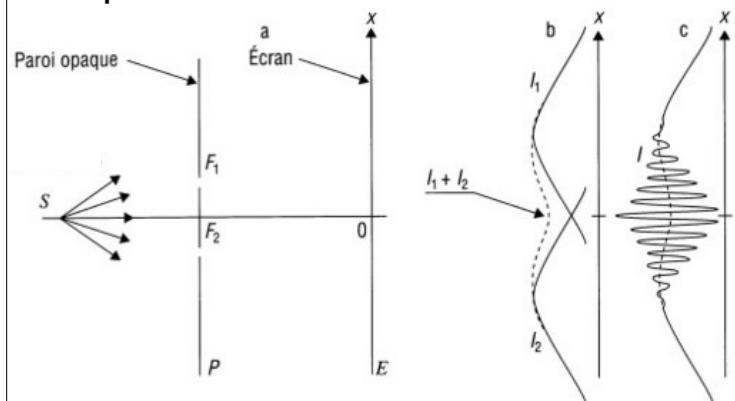
Cas #3:
projectile = objet quantique
(par ex électron, photon)



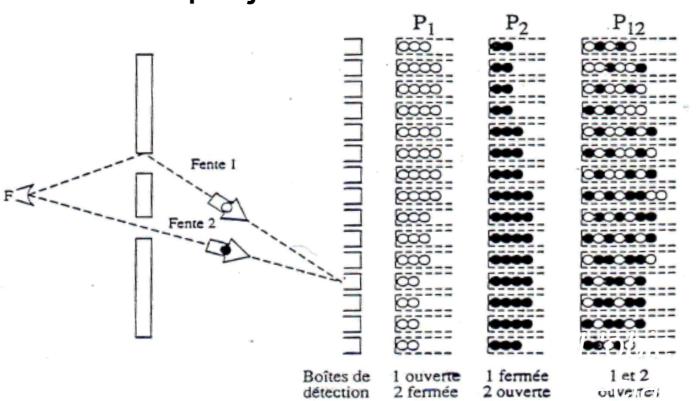
Mécanique quantique : illustration

L'expérience des fentes d'Young

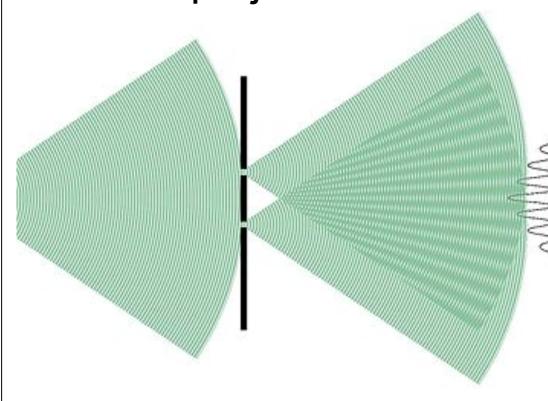
L'expérience :



Cas #1: projectile = bille

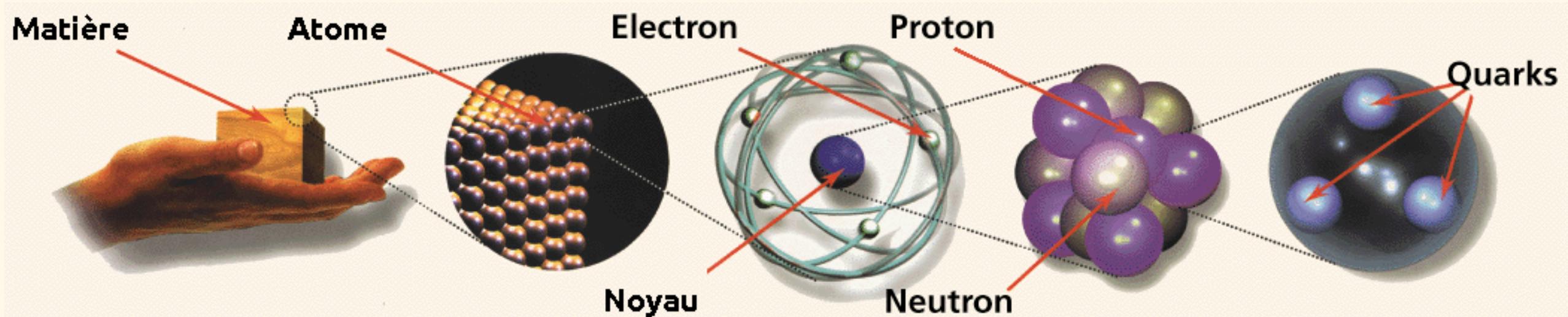


Cas #2: projectile = onde



-2660 nm

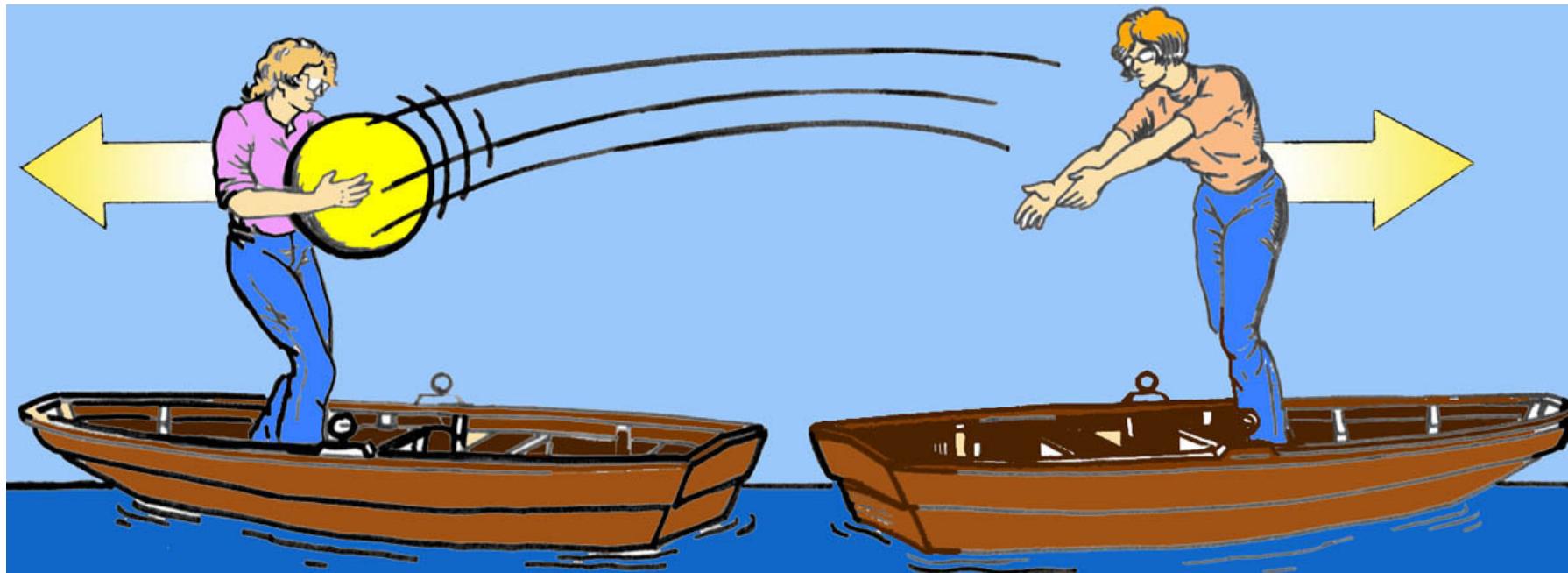
*De l'infiniment grand
à l'infiniment petit...*



Interaction fondamentale



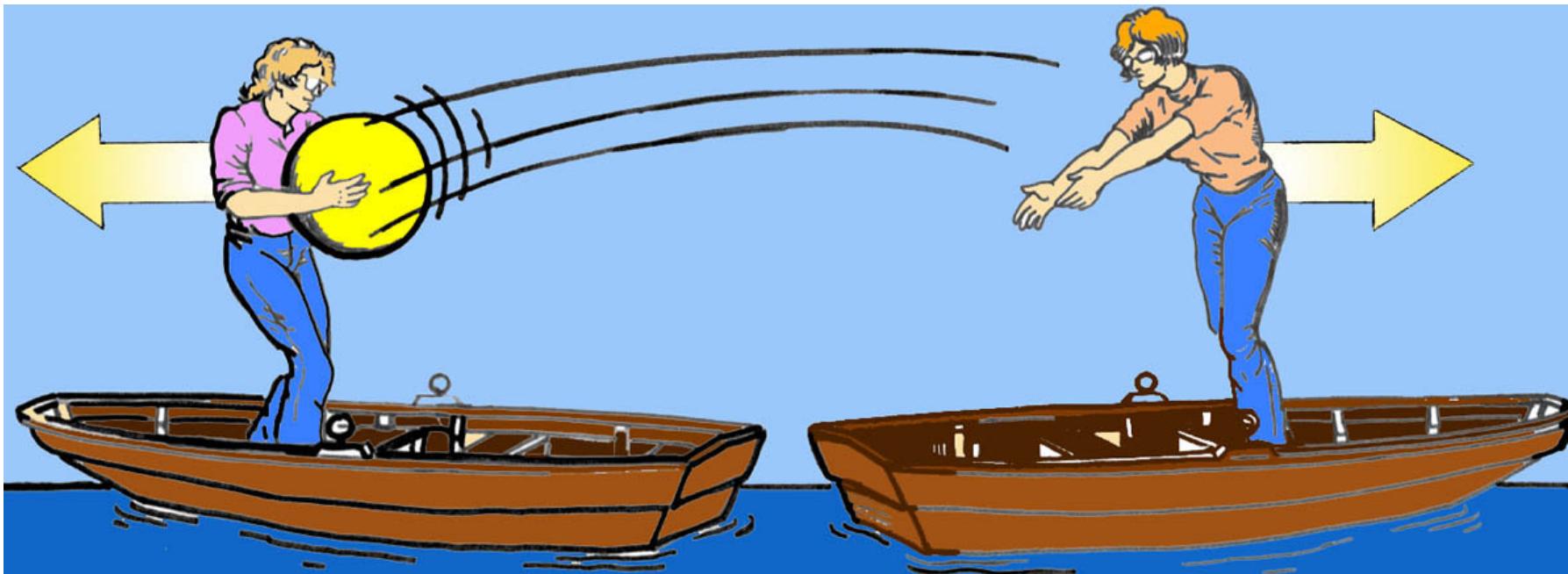
- Échange de particules (**bosons**) entre particules de matière (**fermions**, comme les quarks ou les électrons)



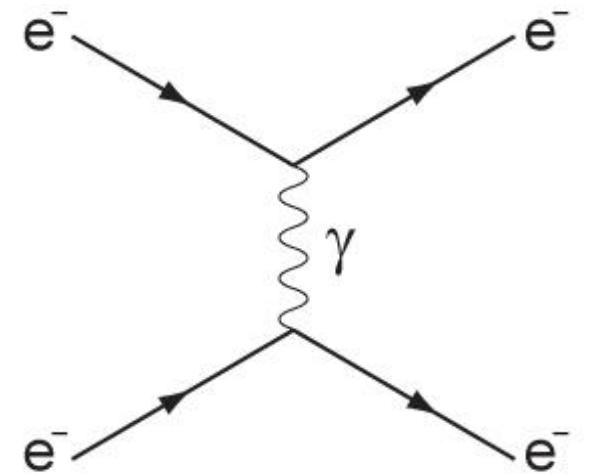
Interaction fondamentale



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



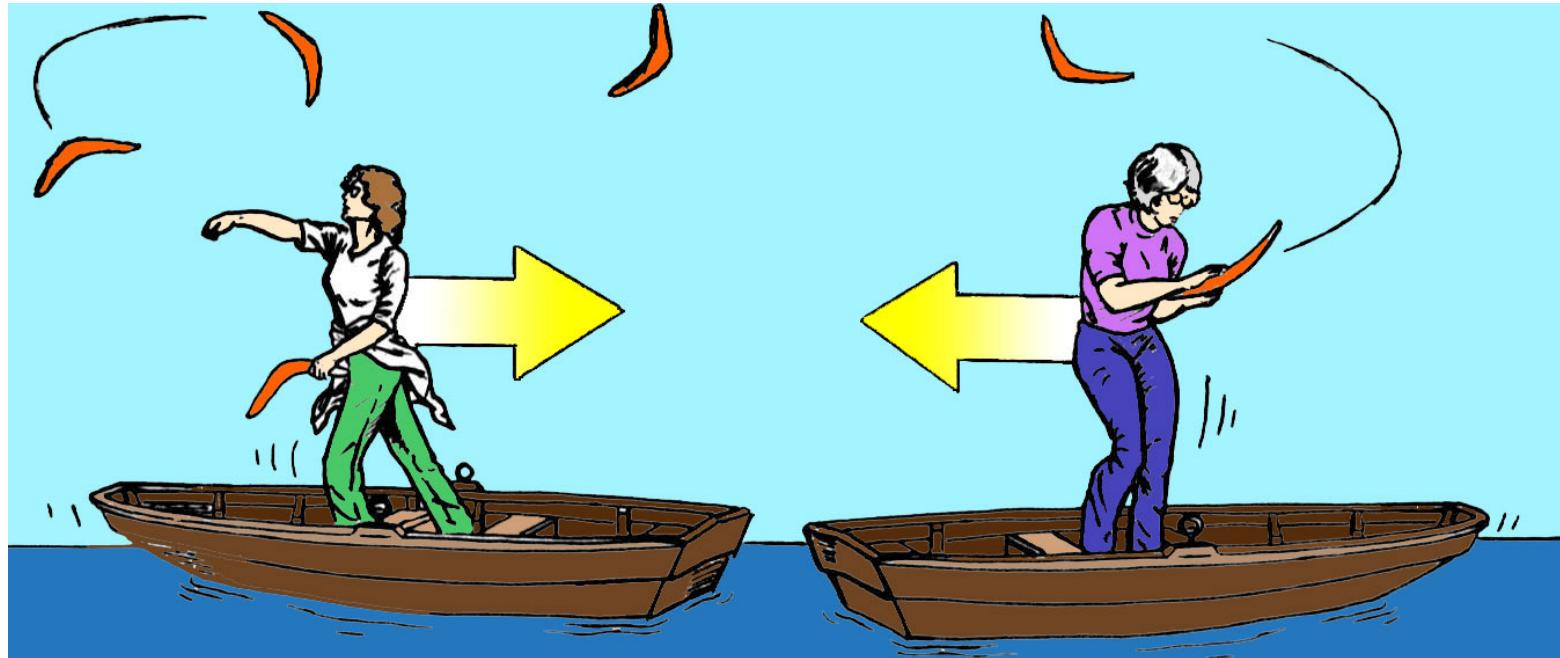
- En physique des particules :



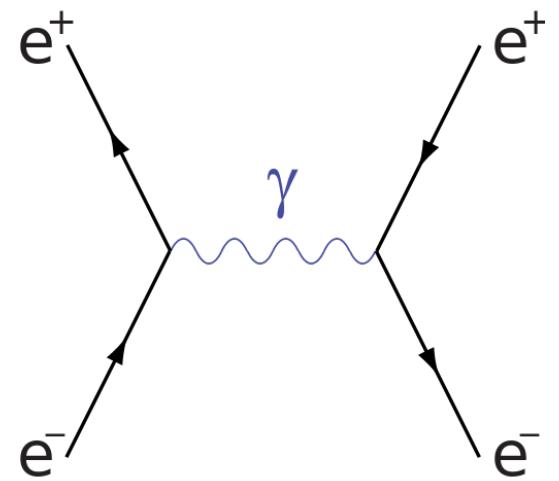
Interaction fondamentale



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



- En physique des particules :

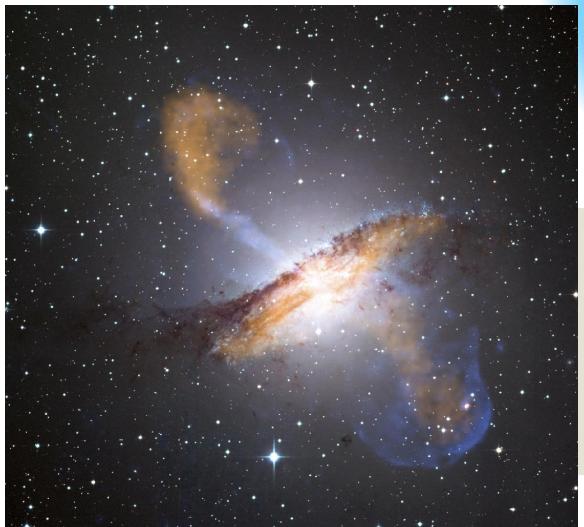




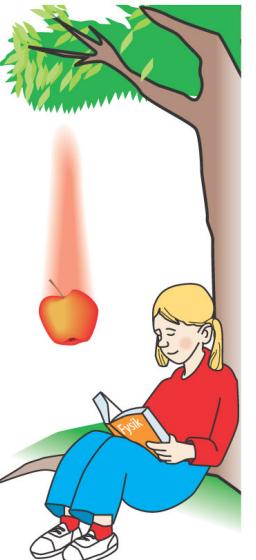
Les forces



Les forces

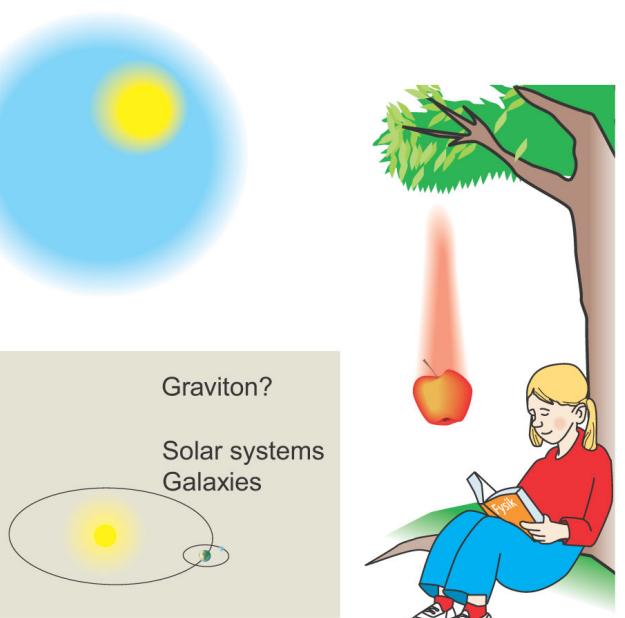
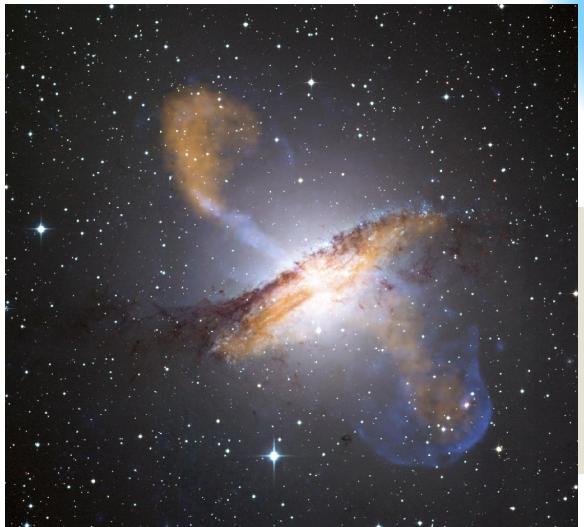


Force gravitationnelle

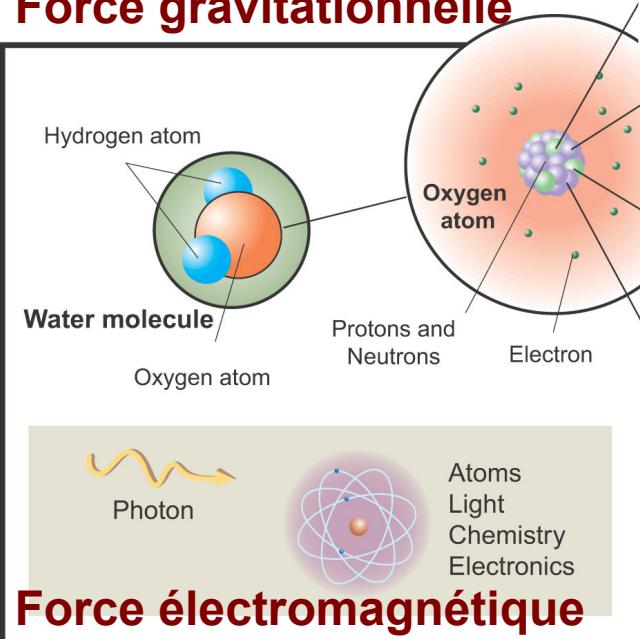




Les forces



Force gravitationnelle

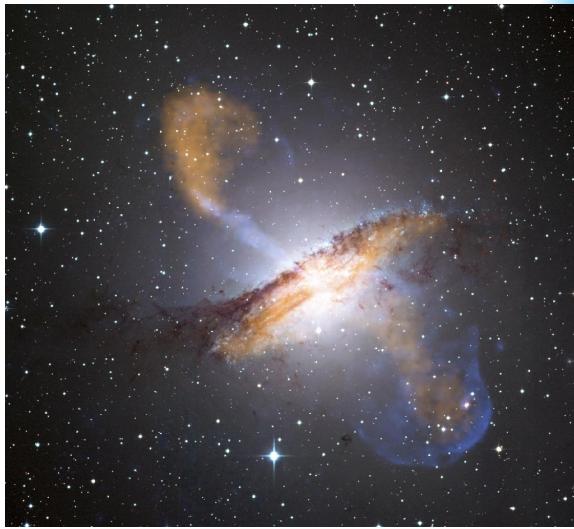


Force électromagnétique

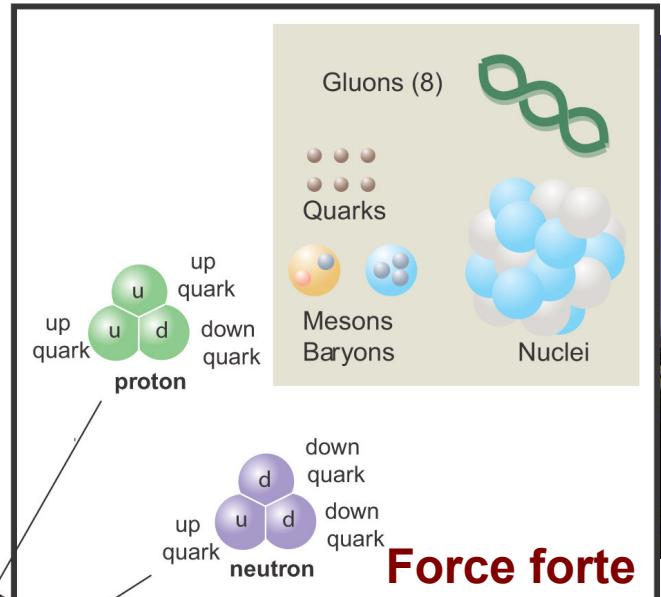
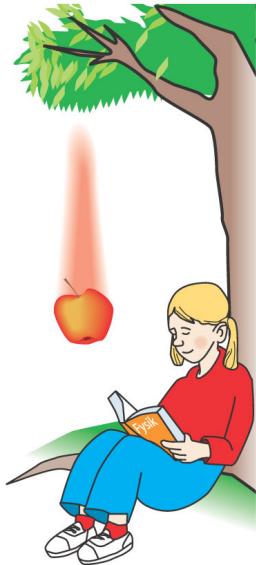


Illustration: Typoform

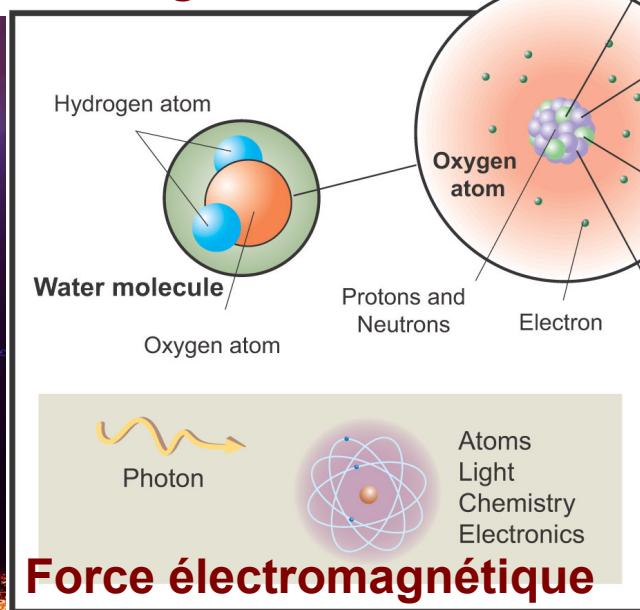
Les forces



Force gravitationnelle



Force forte

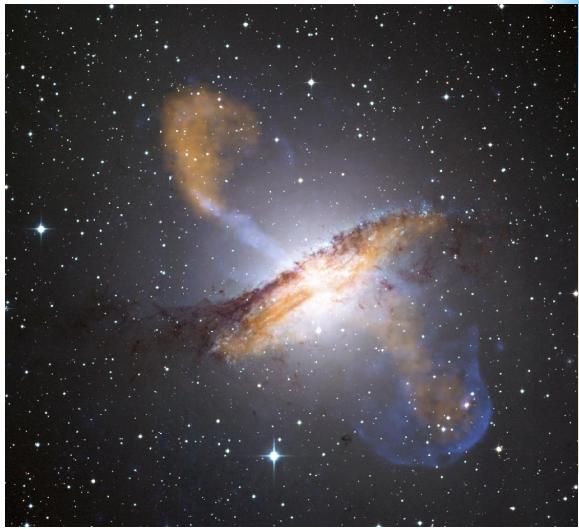


Force électromagnétique

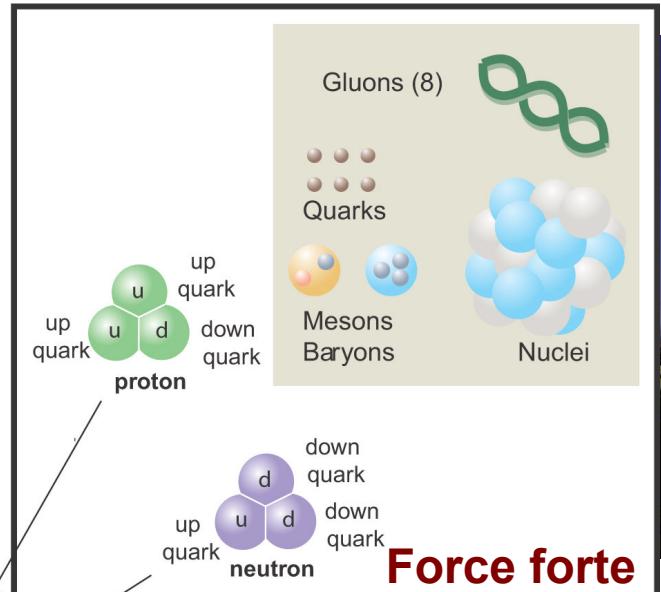
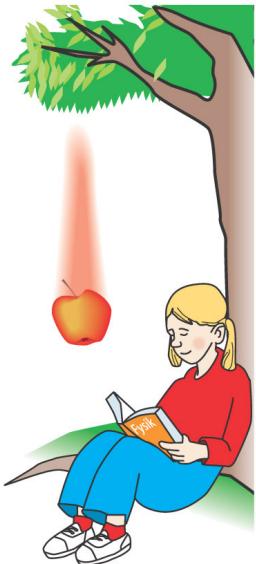


Illustration: Typoform

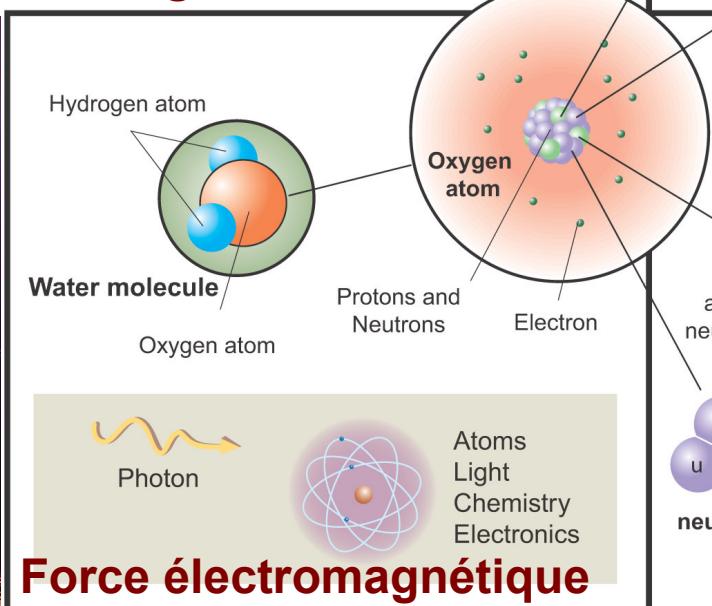
Les forces



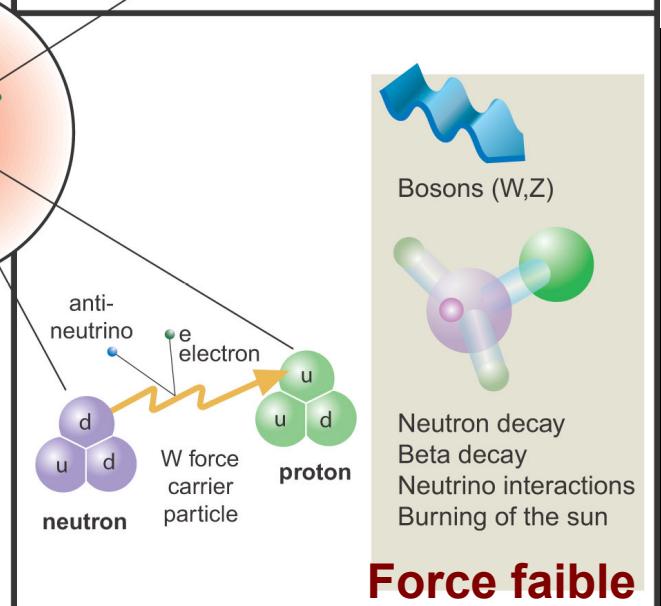
Force gravitationnelle



Force forte



Force électromagnétique



Force faible

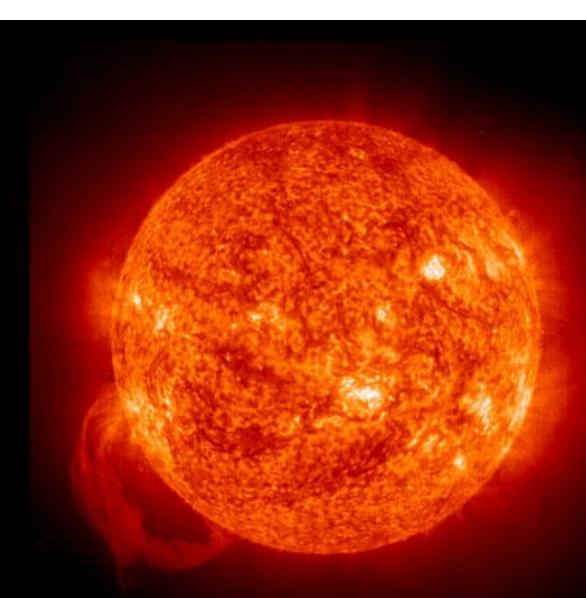
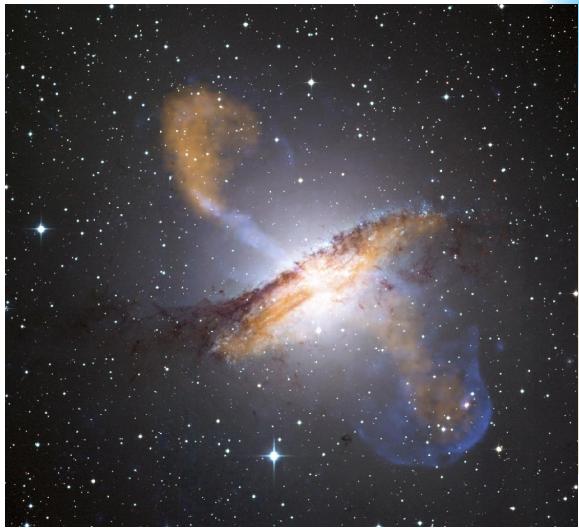


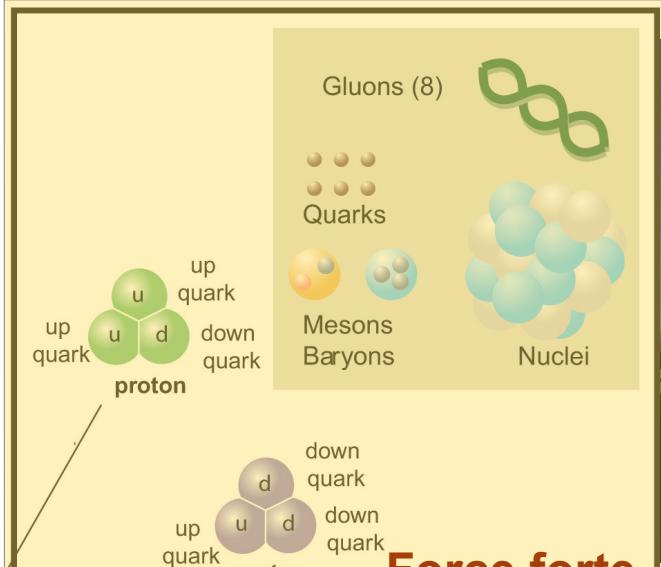
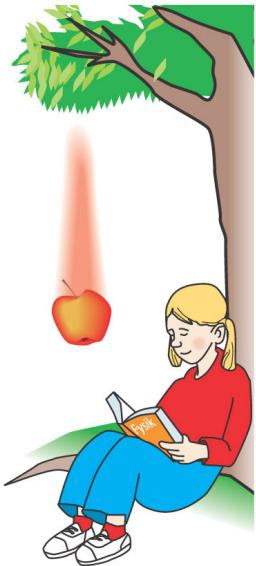


Illustration: Typoform

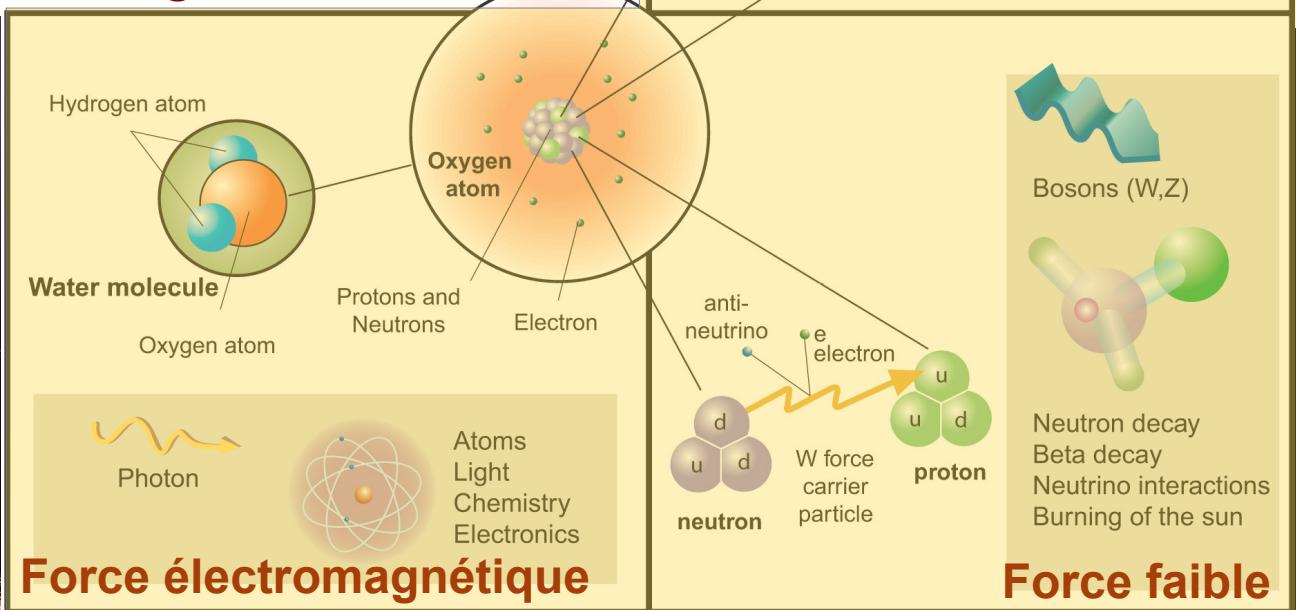
Les forces



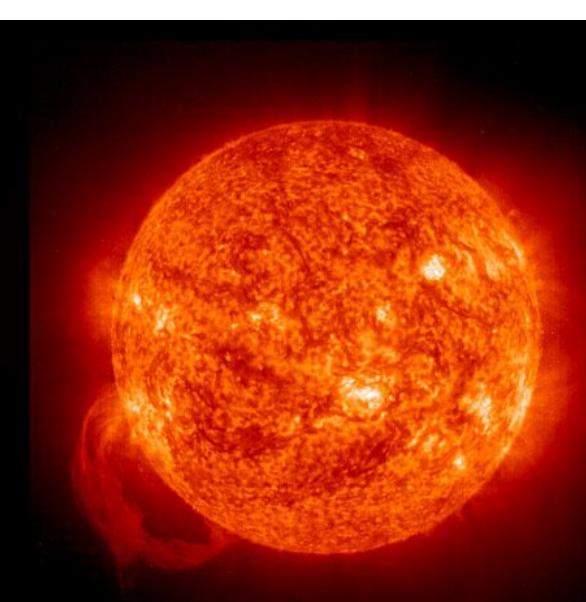
Force gravitationnelle



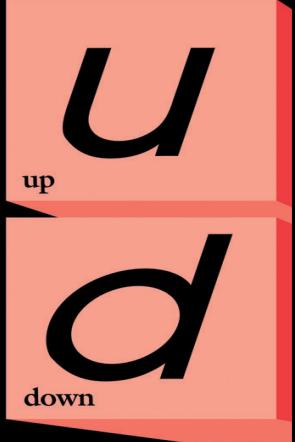
Force forte



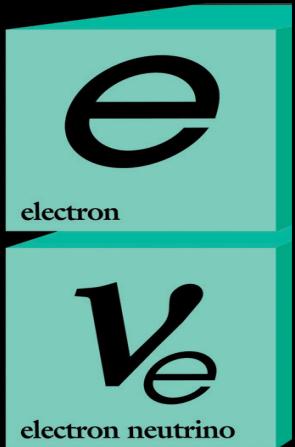
Force faible



Quarks



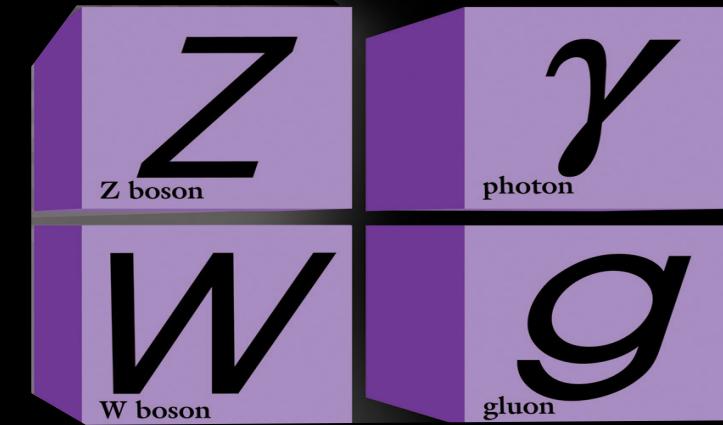
+ anti-matière



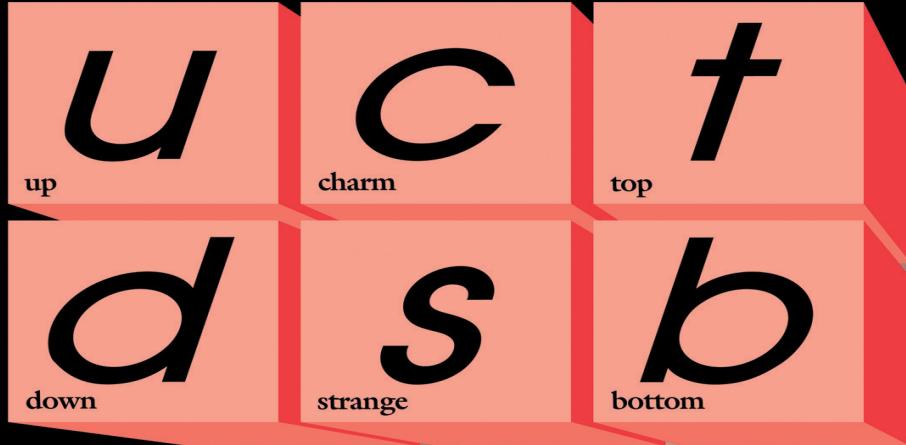
Leptons

Le modèle standard
de la physique des particules

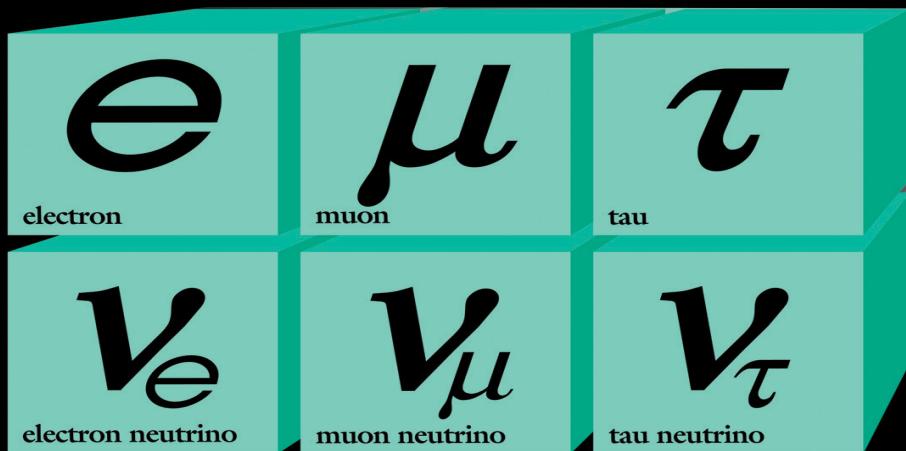
Forces



Quarks



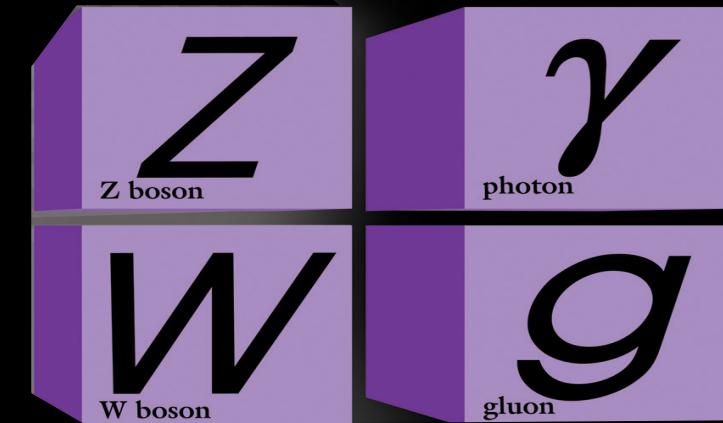
+ anti-matière



Leptons

Le modèle standard
de la physique des particules

Forces



Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom

+ anti-matière

e electron	μ muon	τ tau
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

Leptons

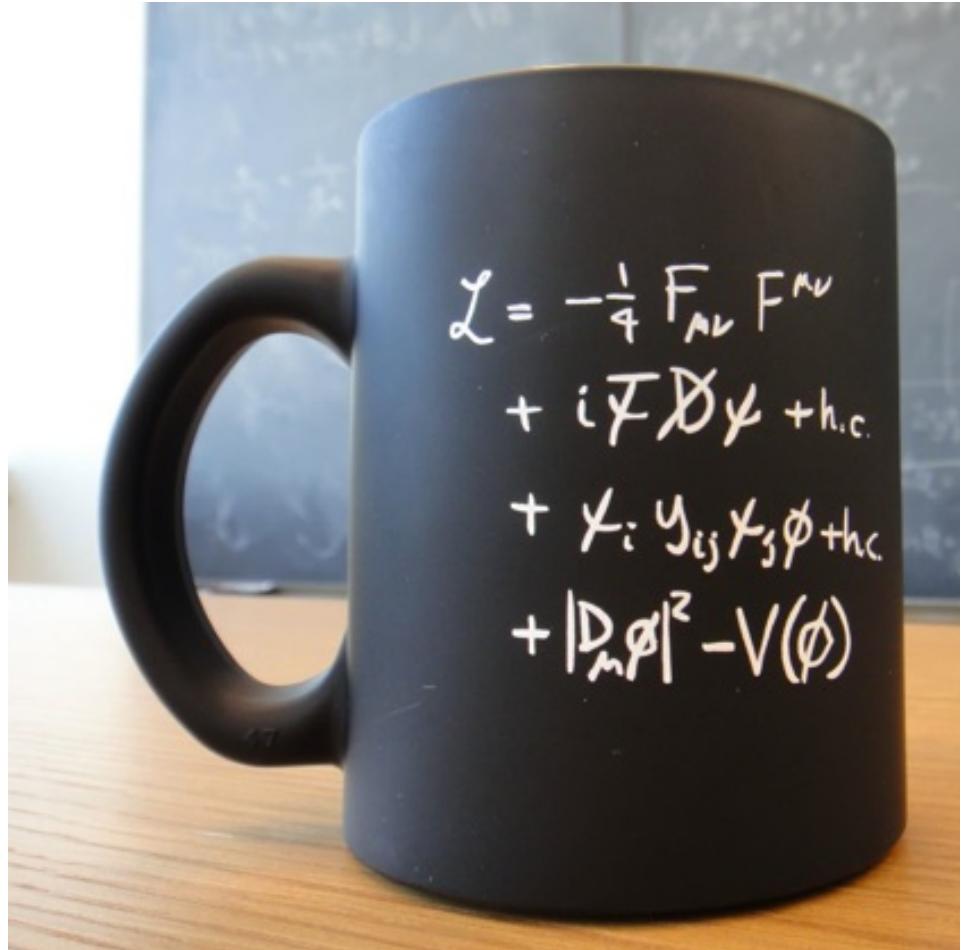
Le modèle standard
de la physique des particules

Forces

Z Z boson	γ photon
W W boson	g gluon

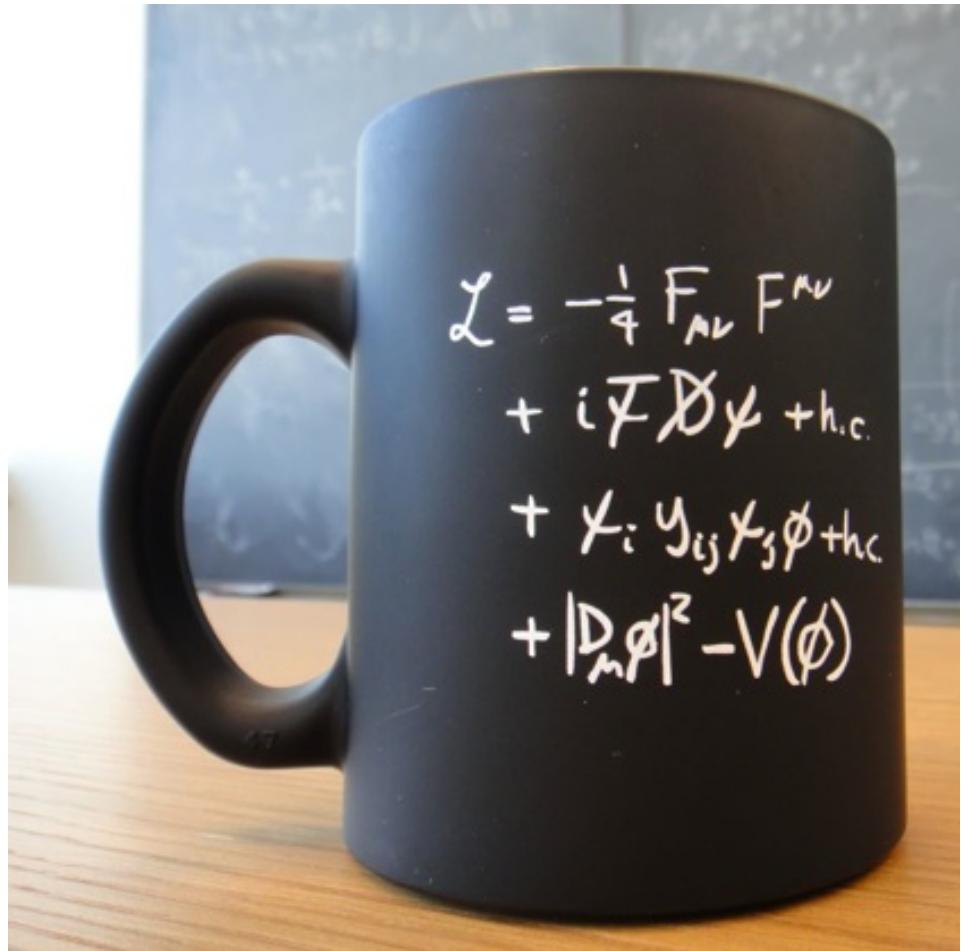


Le modèle standard





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

Sources de particules



The background of the slide features a composite image. On the left side, there is a photograph of a large-scale particle accelerator, likely the Large Hadron Collider, showing its complex blue and grey infrastructure. The right side of the image transitions into a deep space scene, featuring a bright central galaxy with a visible black hole and surrounding nebulae and star clusters.

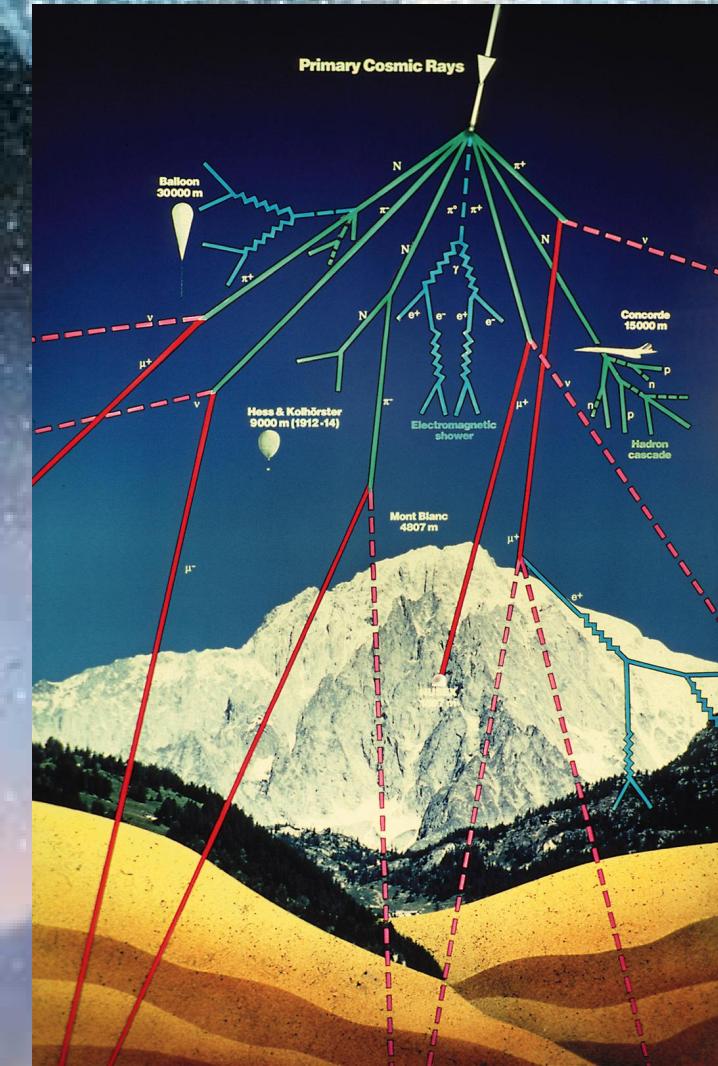
Sources de particules

L'Univers et les rayons cosmiques

(protons, photons, neutrinos, muons)

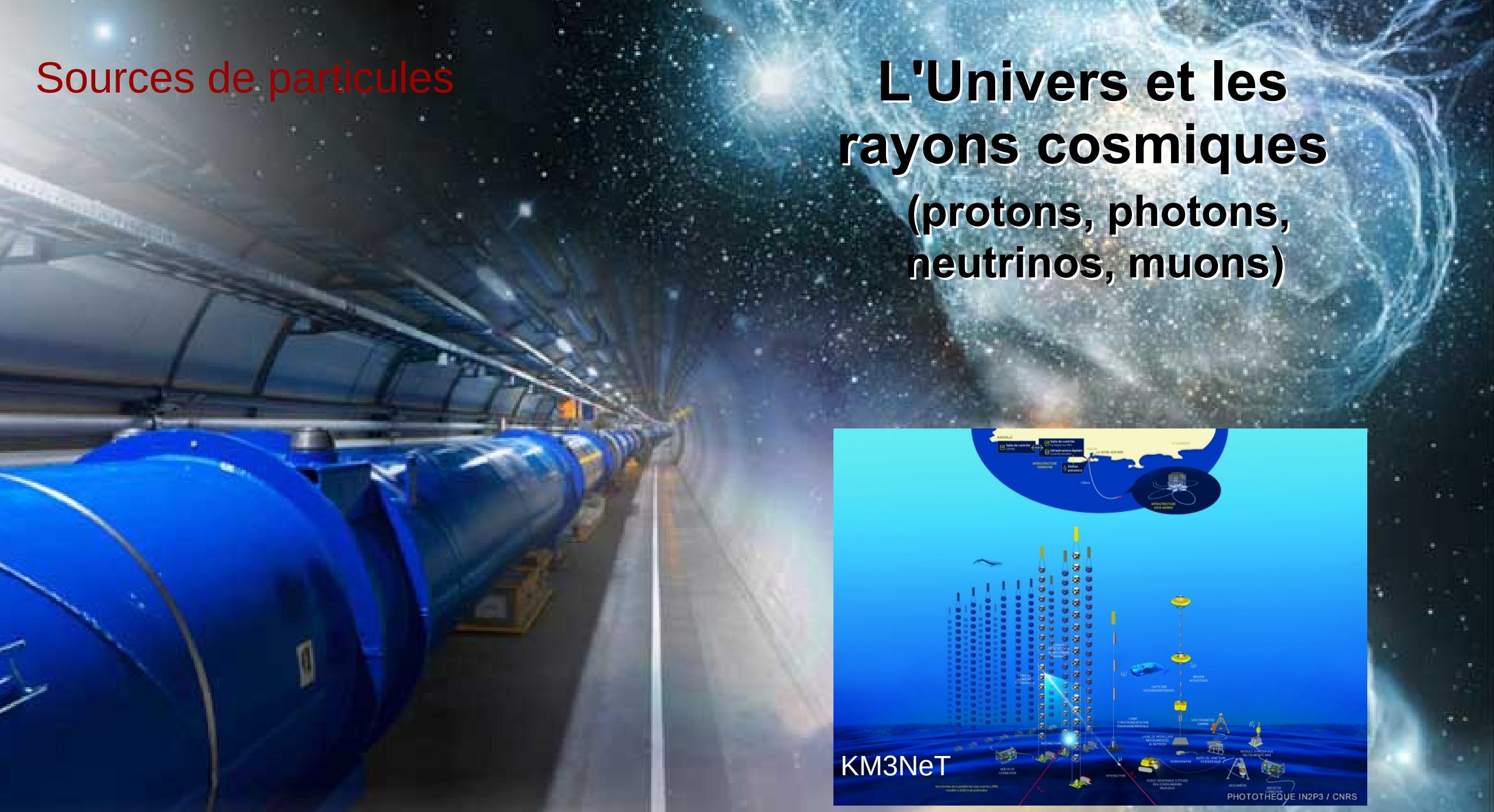
Sources de particules

L'Univers et les rayons cosmiques



Sources de particules

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



The background of the slide features a composite image. On the left, a large blue cylindrical particle accelerator component, likely a magnet, is shown within a tunnel structure. On the right, a vibrant, multi-colored galaxy with a bright central star and swirling nebulae is visible against a dark space background.

Sources de particules

L'Univers et les rayons cosmiques

(protons, photons, neutrinos, muons)

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

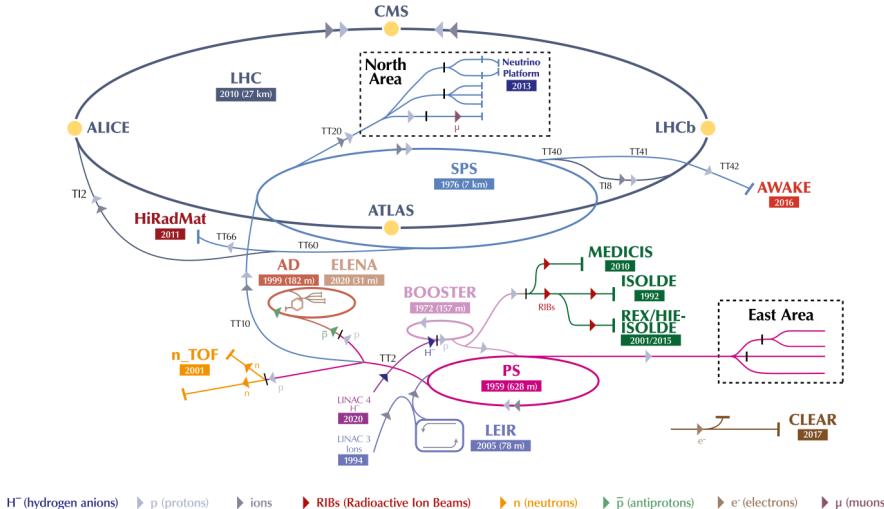


YEARS/ANS CERN
1954-2024





Le LHC (grand collisionneur de hadrons)

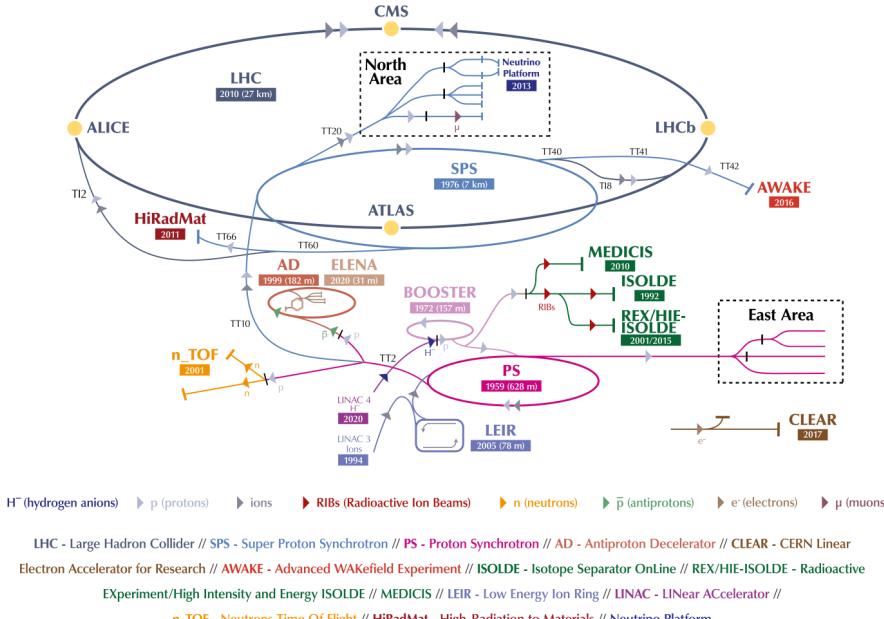


LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High 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

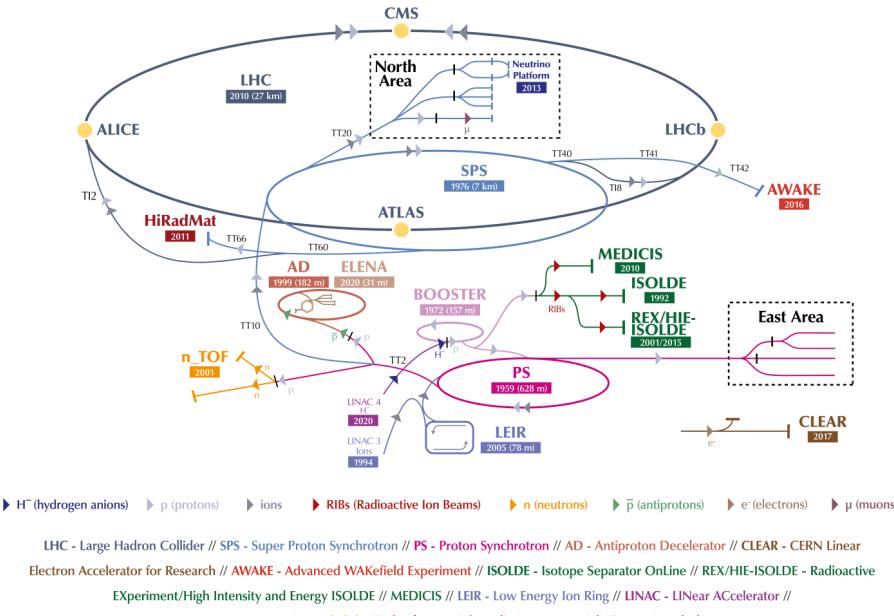
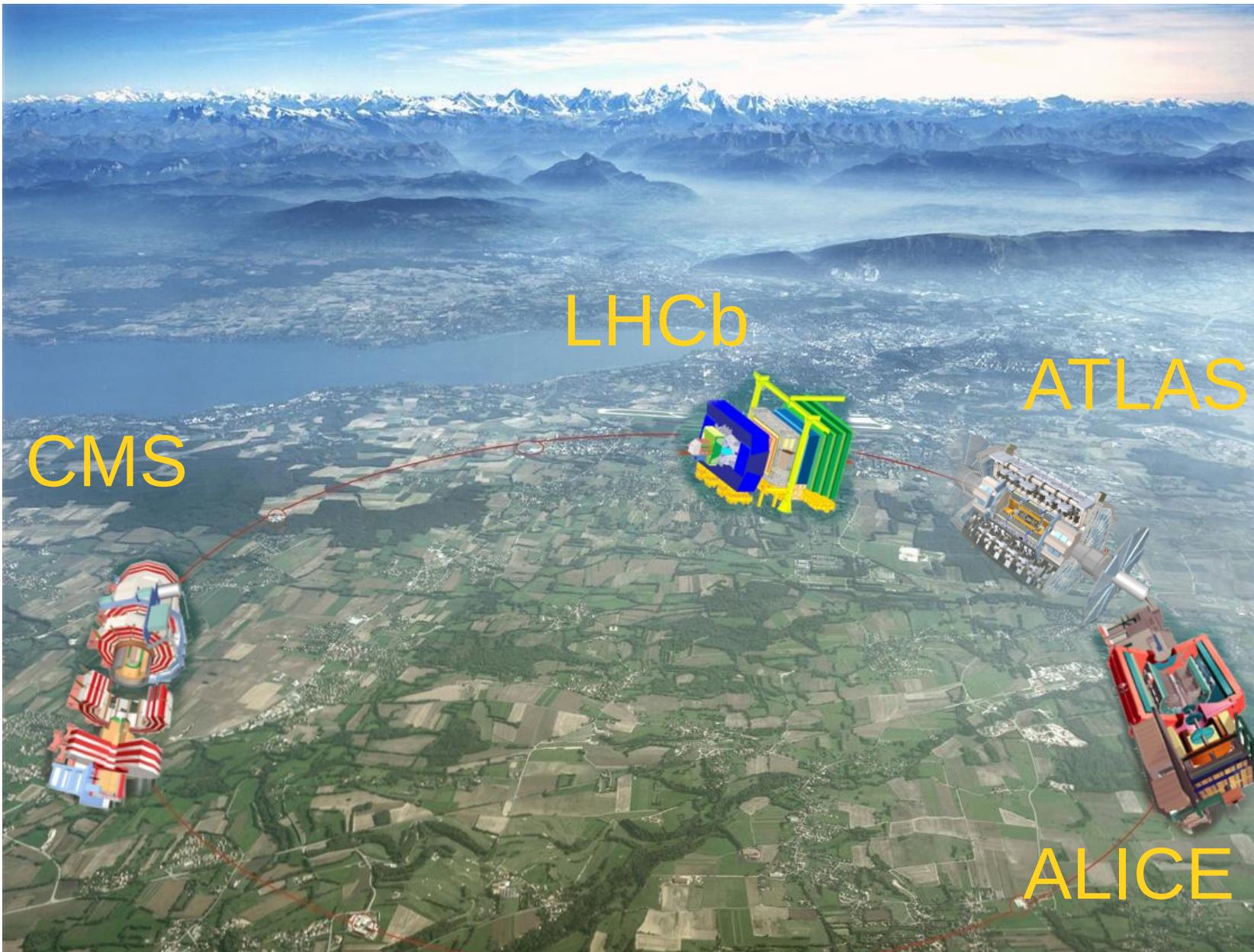


Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



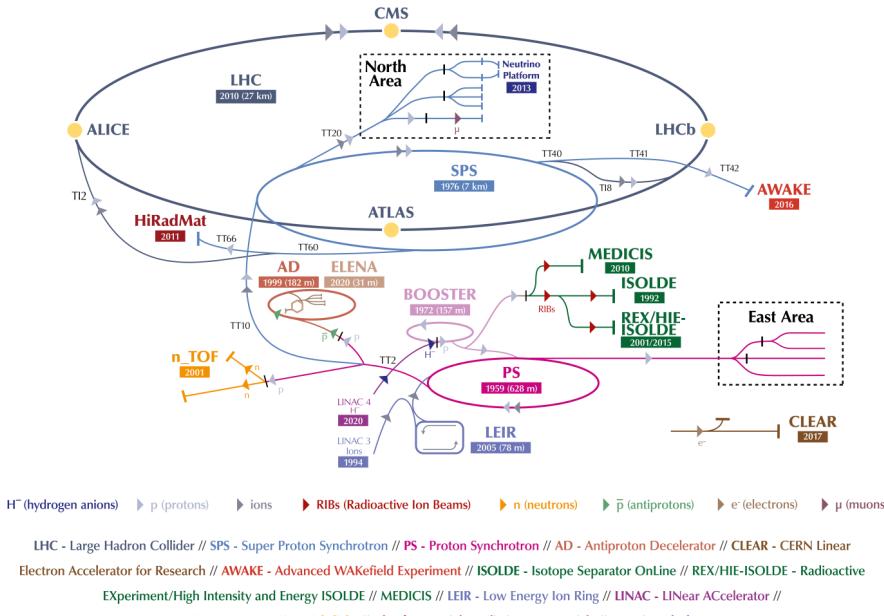


Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



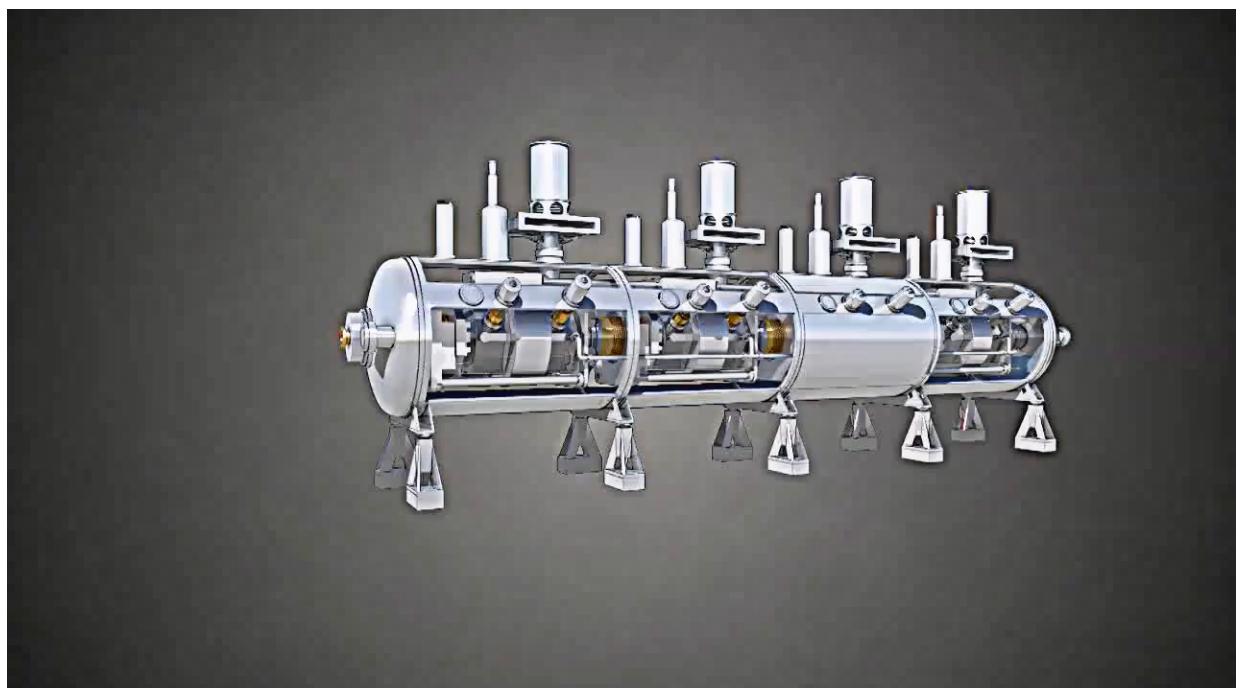
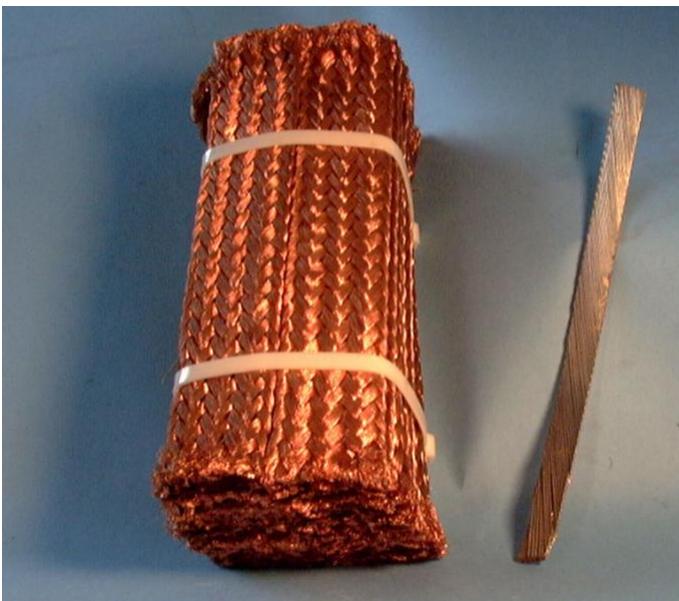
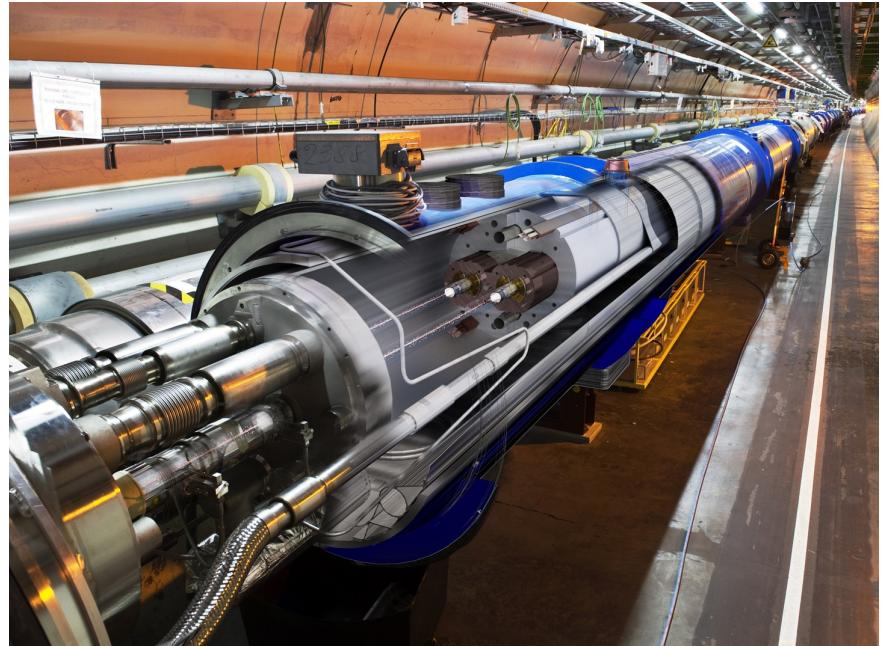


Le LHC (grand collisionneur de hadrons)





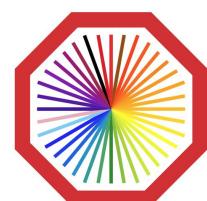
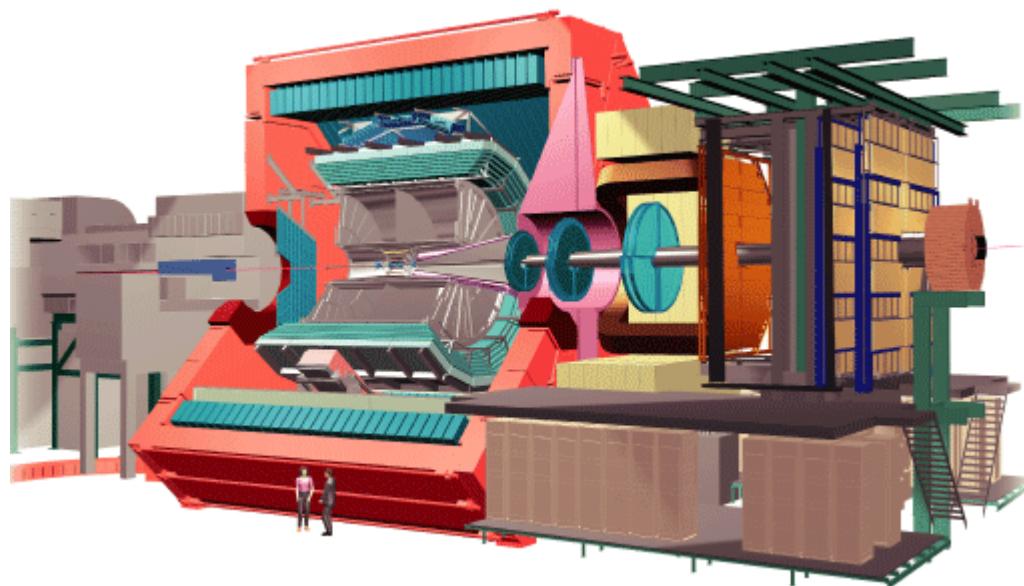
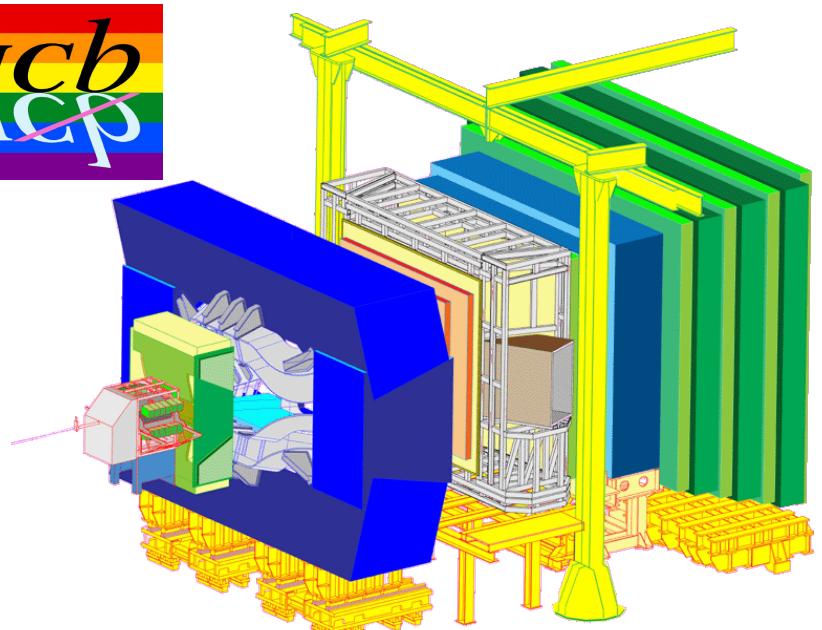
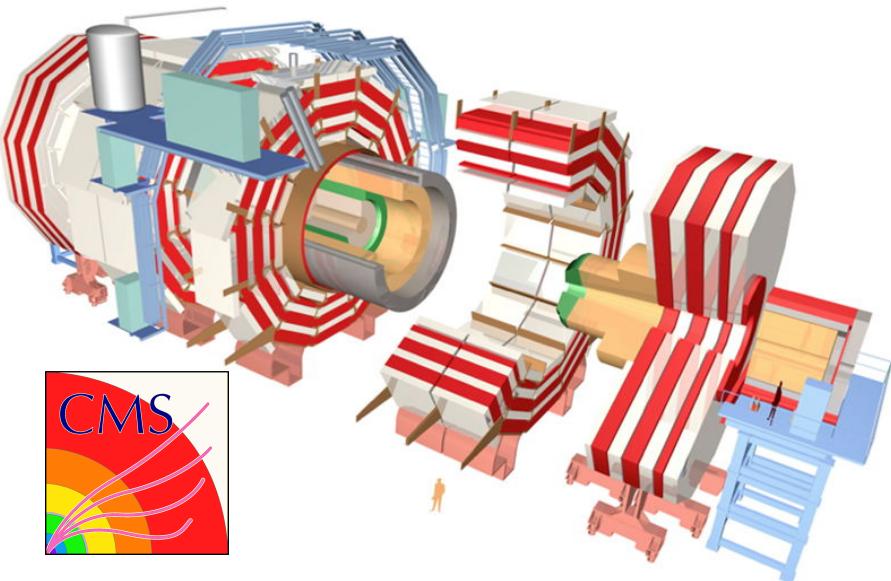
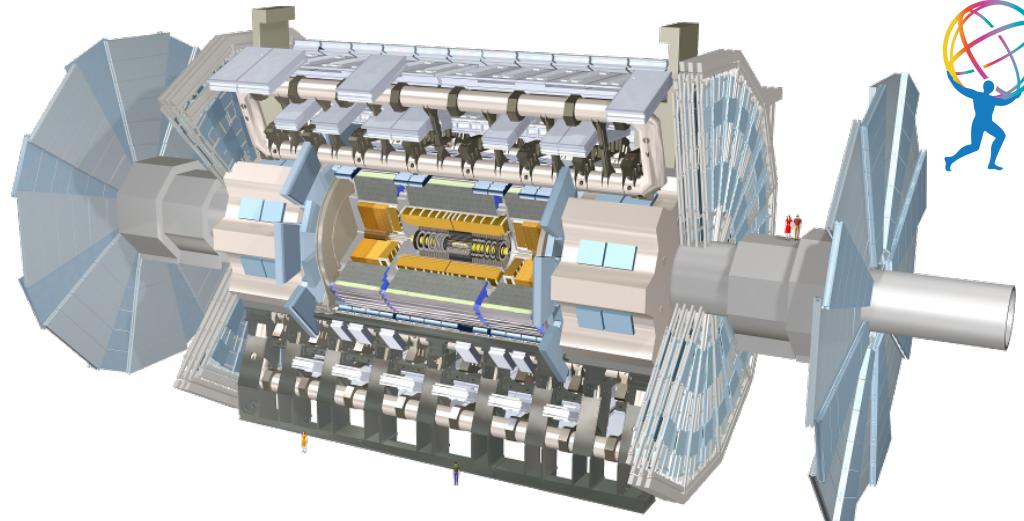
Aimants et cavités accélératrices



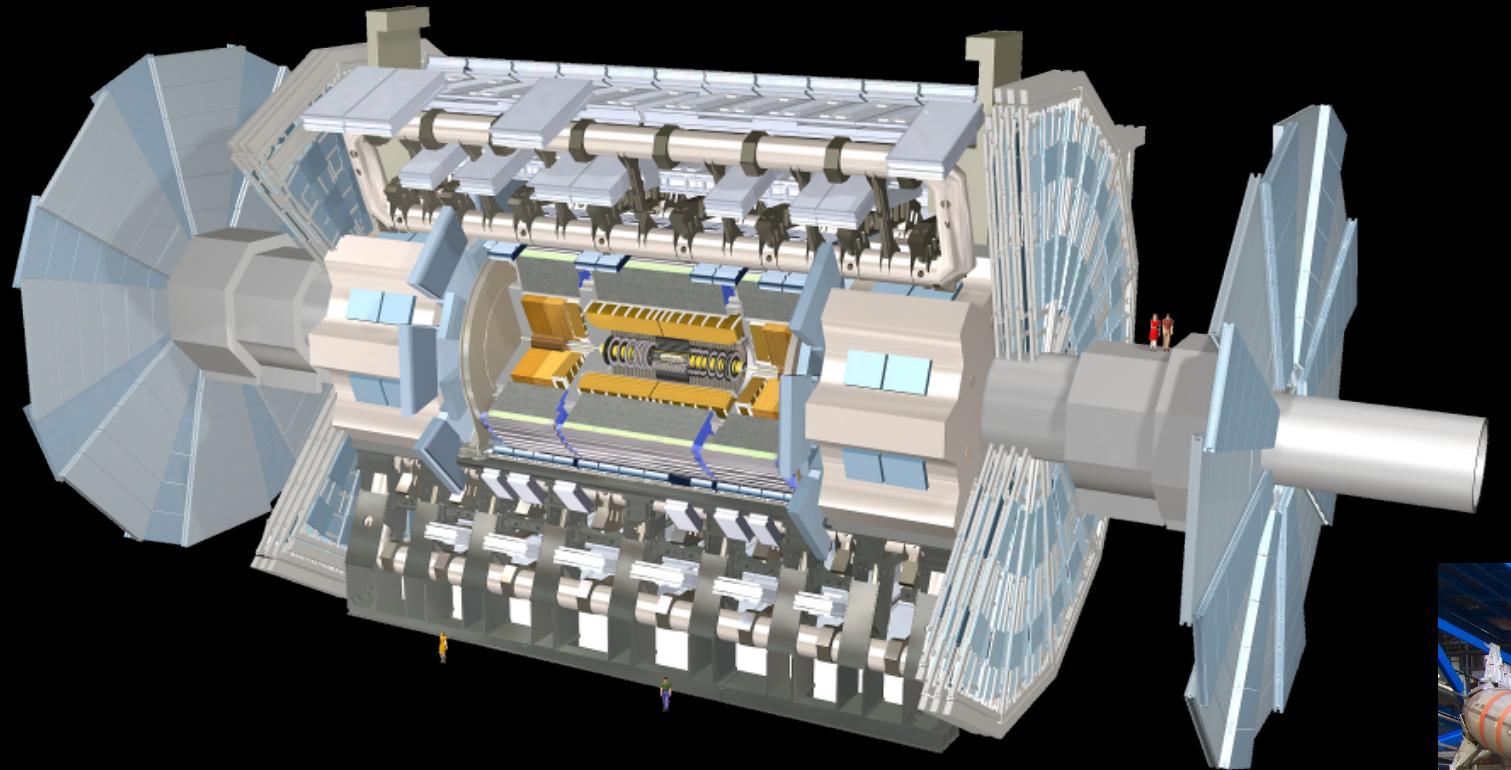
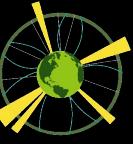
© CERN



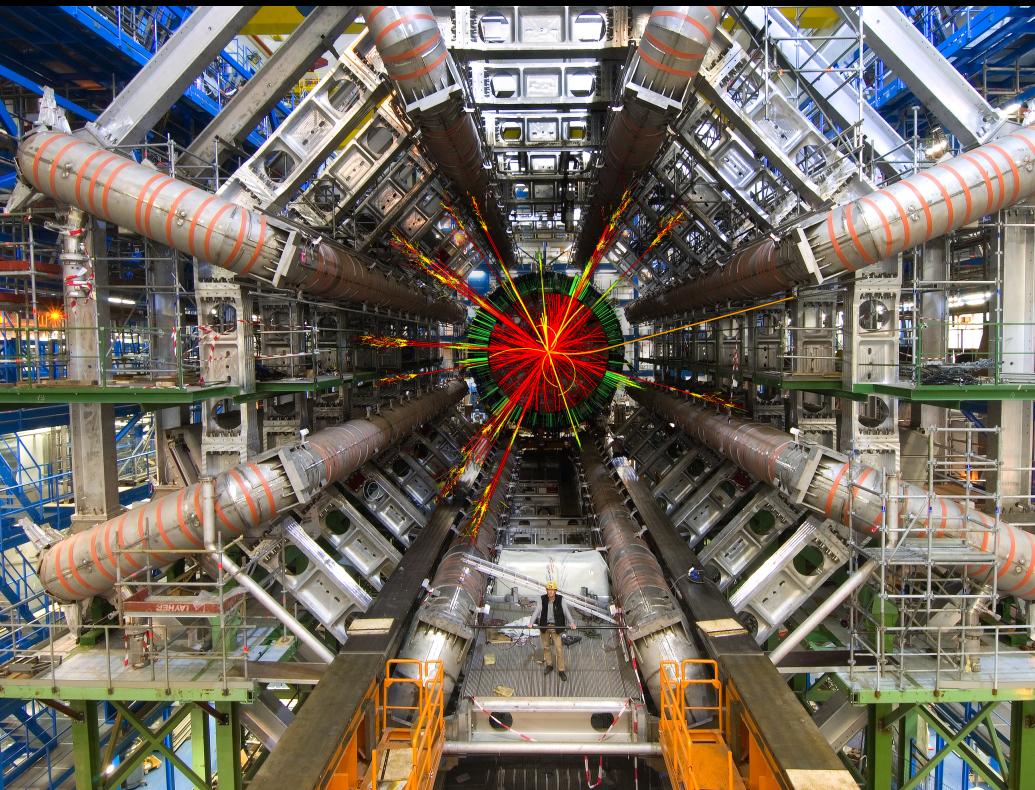
Les détecteurs géants du LHC



ALICE



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

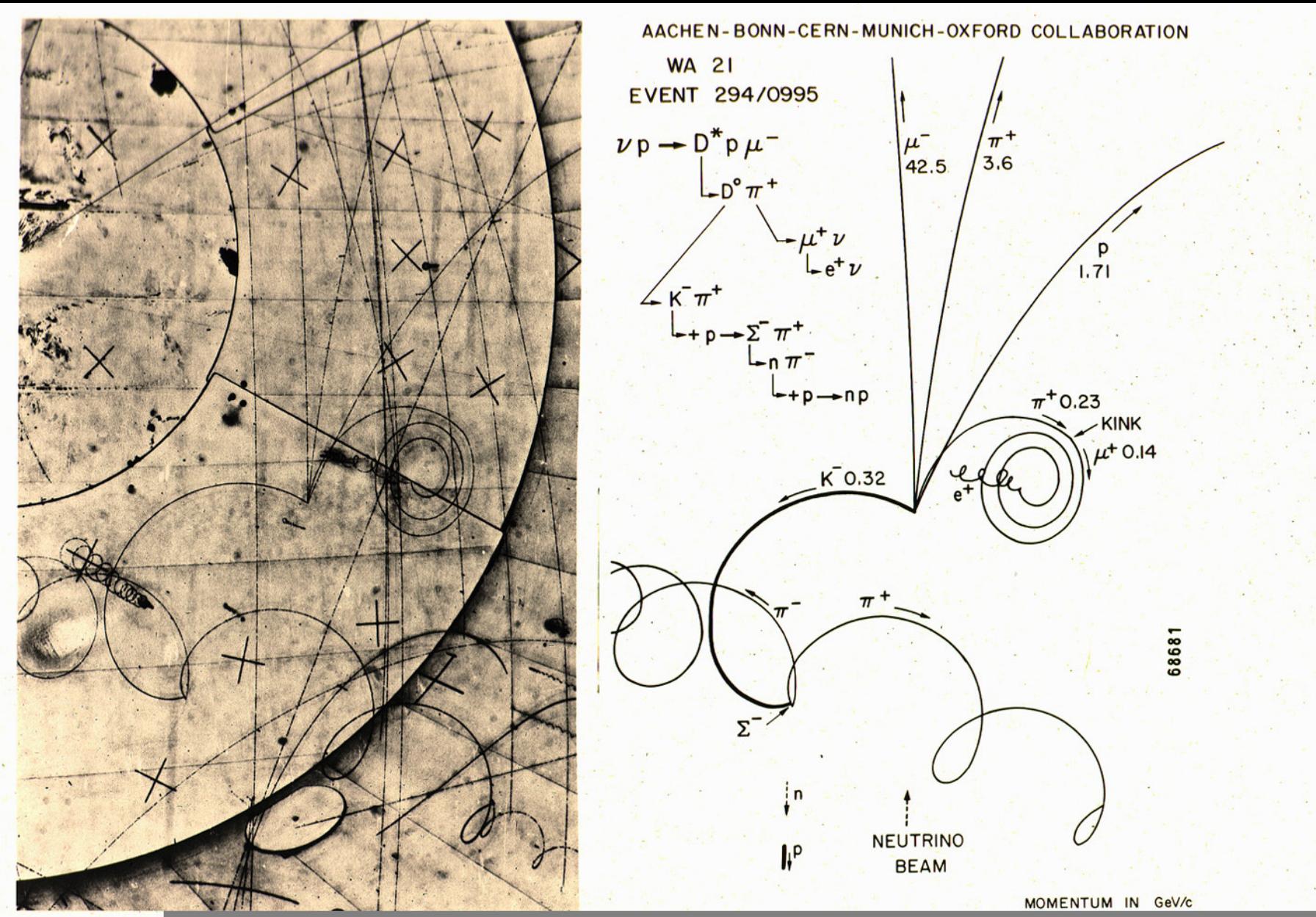


Anciennes photographies



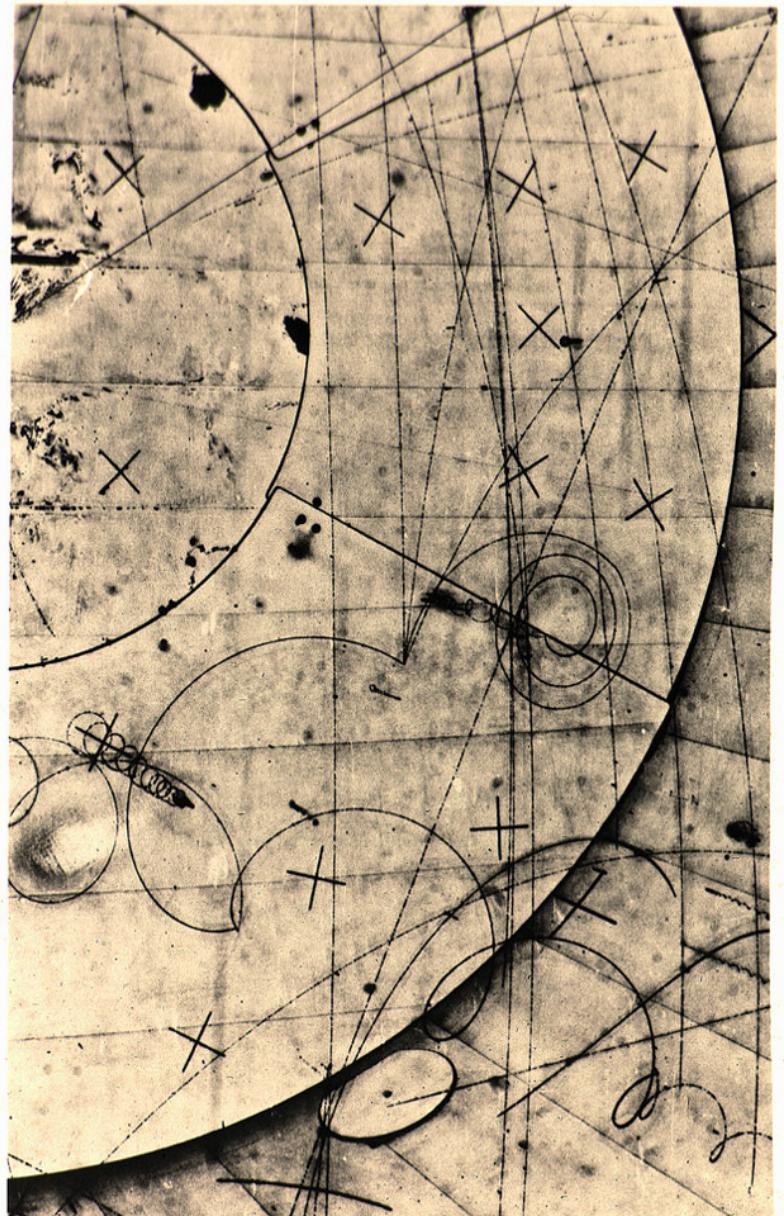


Anciennes photographies





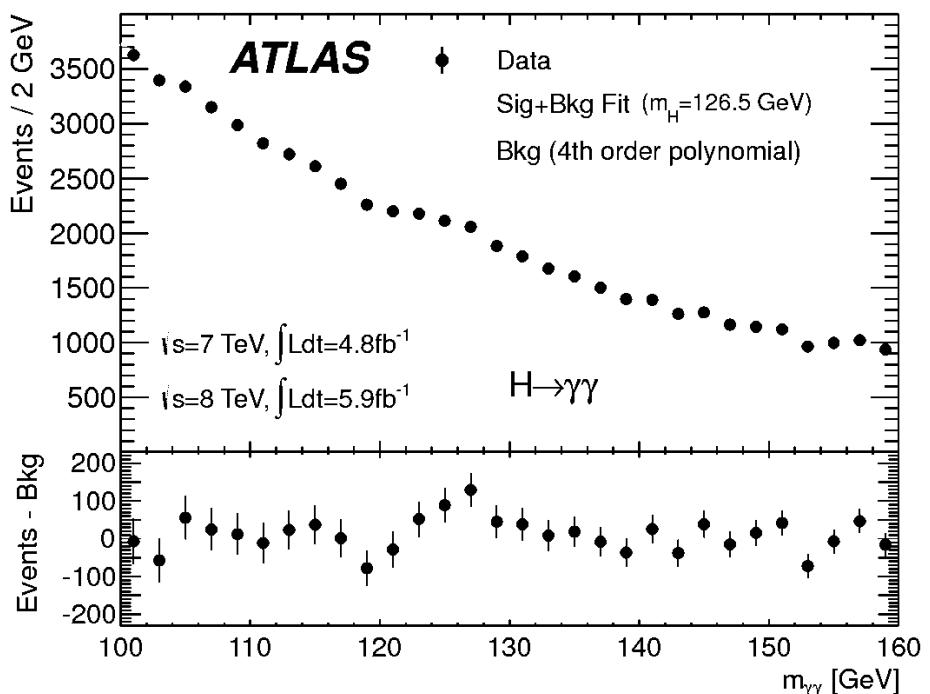
Anciennes photographies





Mesure

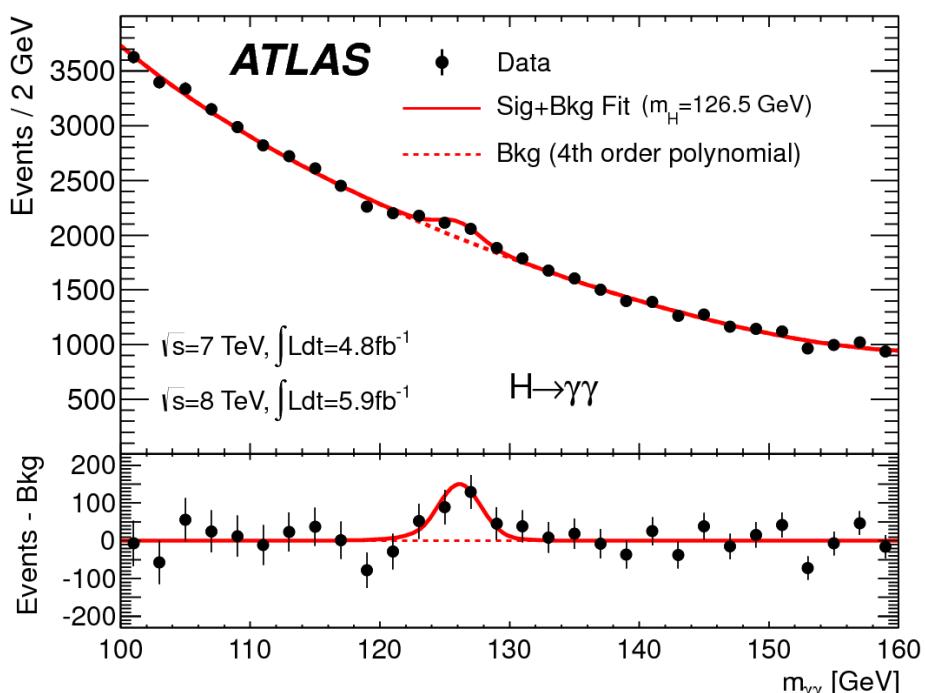
- Higgs en 2 photons
 - ▶ Bruit de fond important
 - ▶ Petit pic avec « beaucoup » de signal





Mesure

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

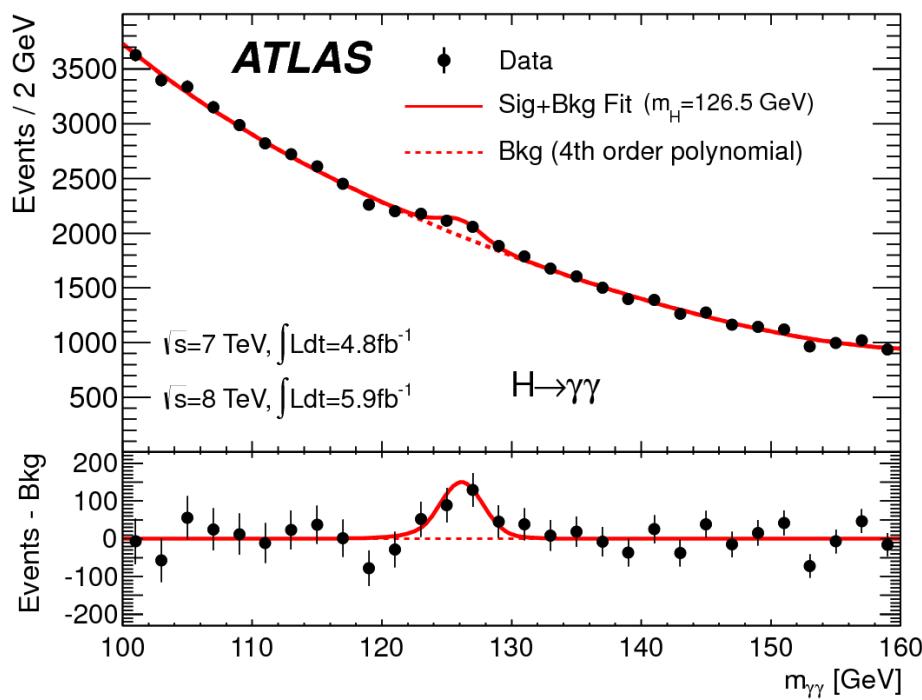




Mesure

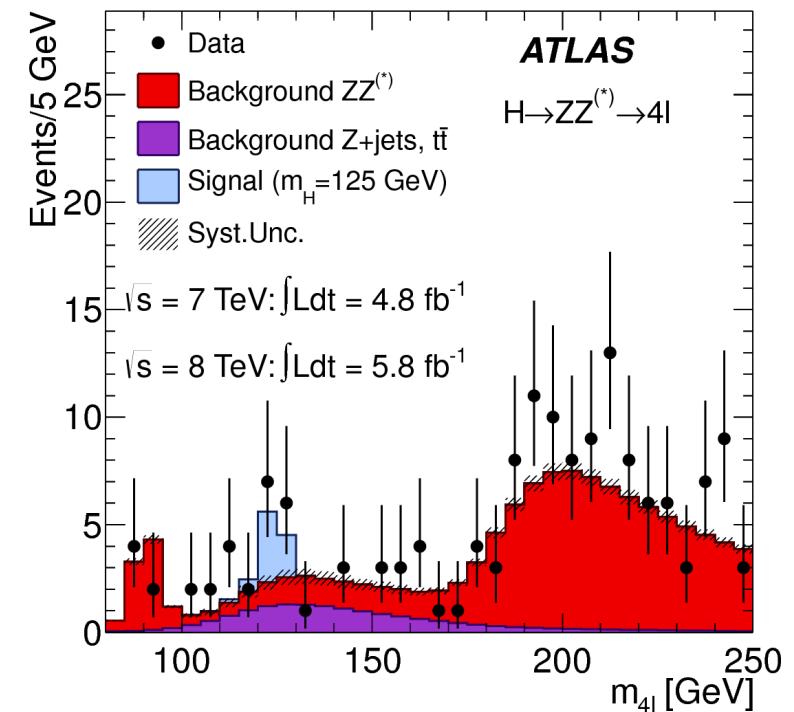
■ Higgs en 2 photons

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



■ Higgs en ZZ

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

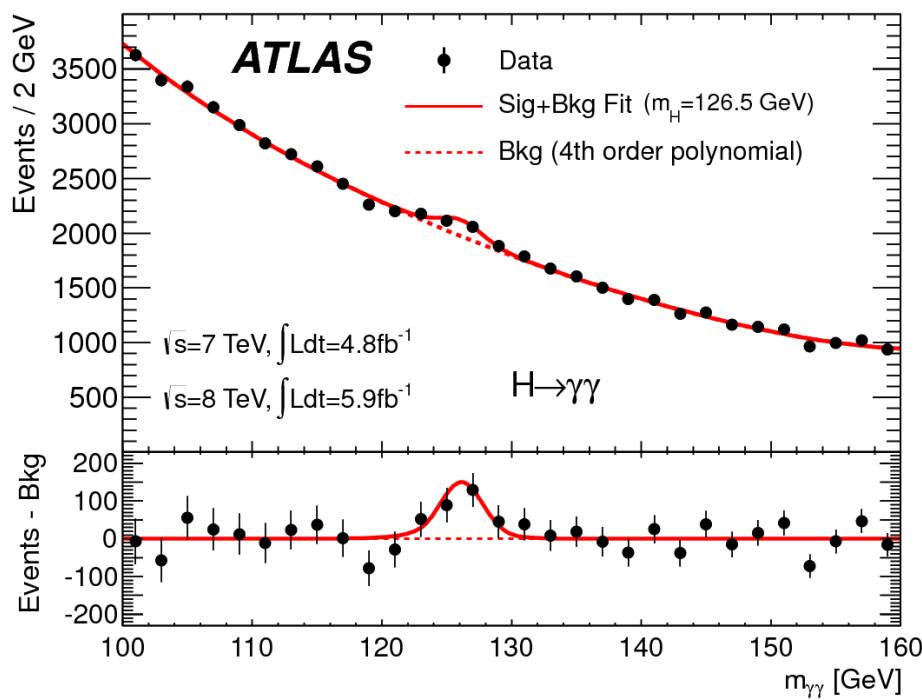




Mesure

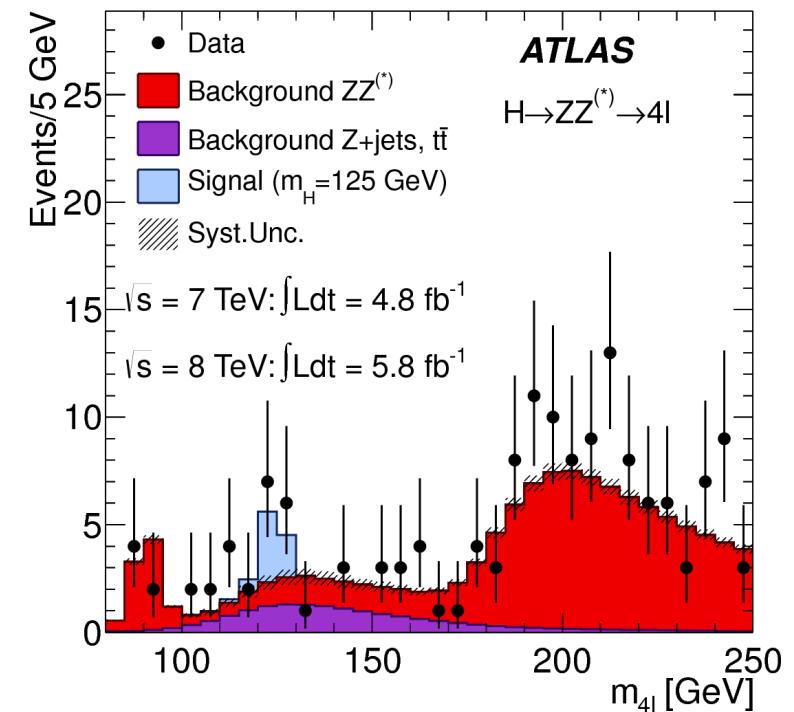
■ Higgs en 2 photons

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



■ Higgs en ZZ

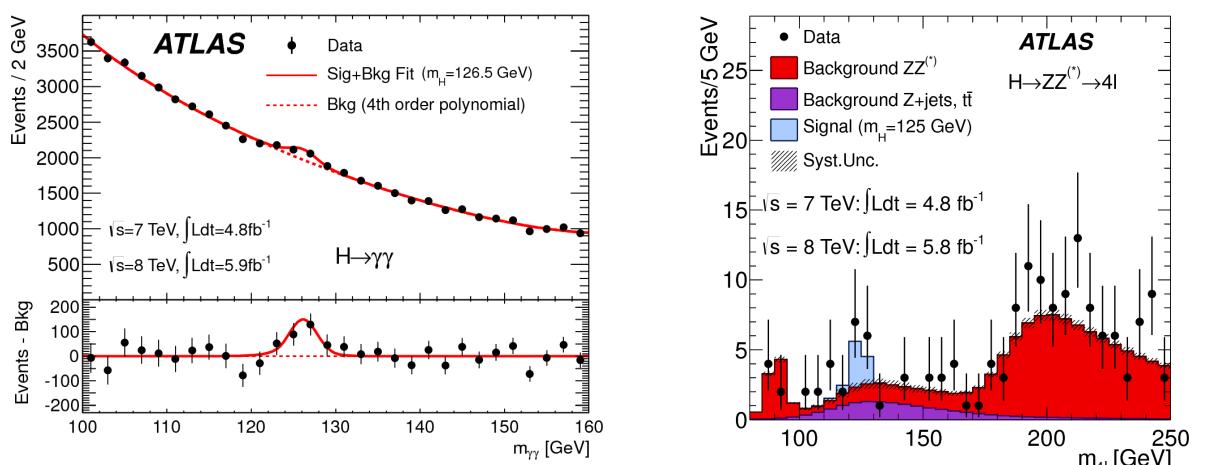
- ▶ Très peu de bruit de fond
- ▶ Très peu d'événements



Est-ce significatif ? Outils statistiques pour répondre

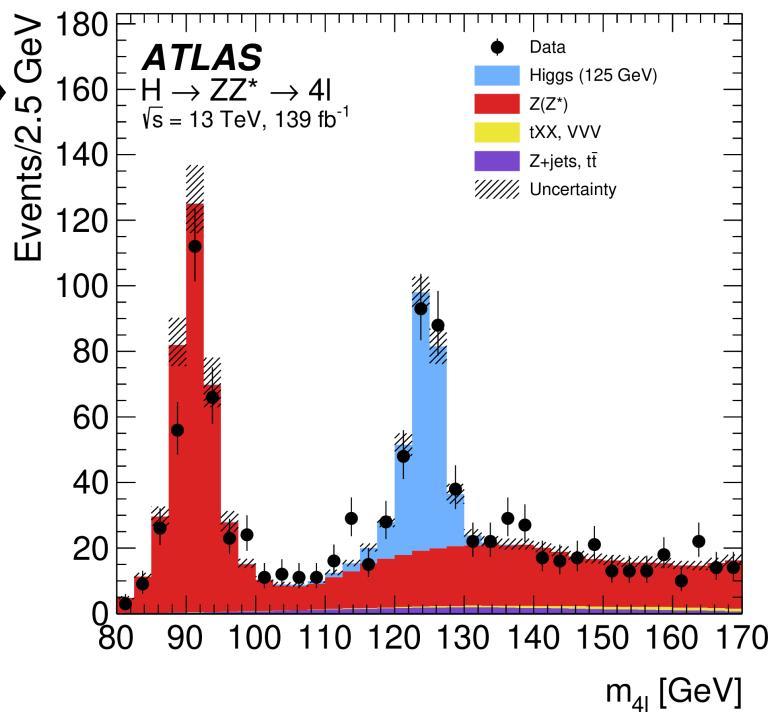
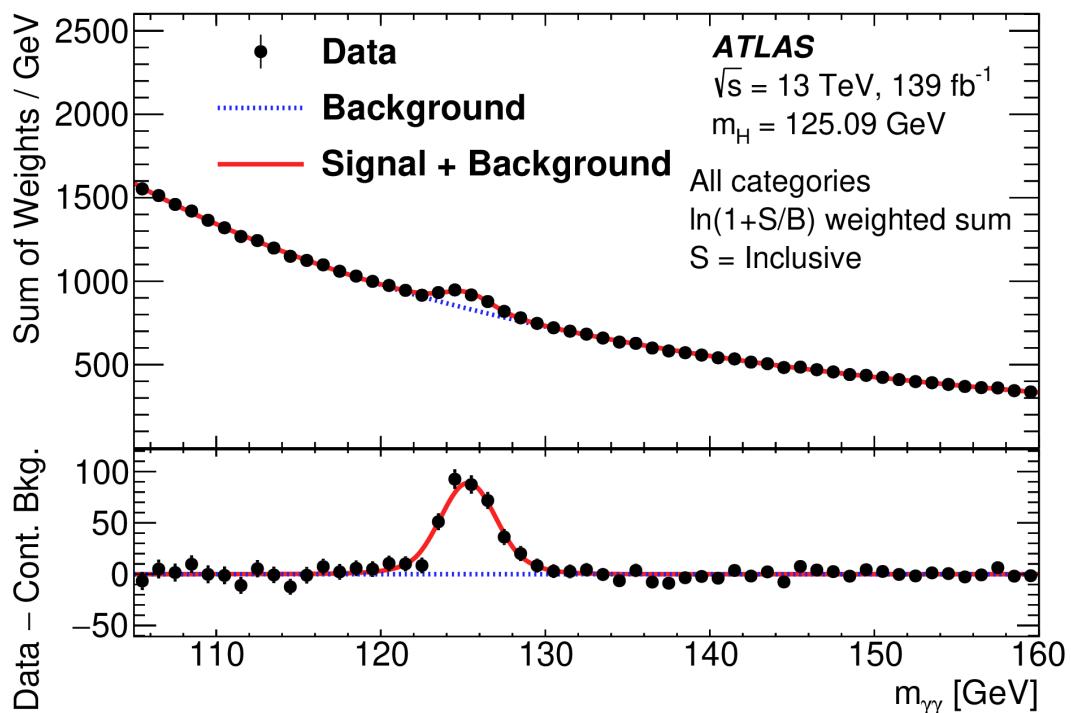
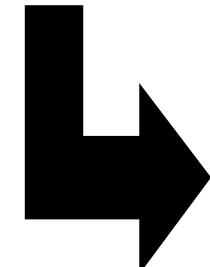
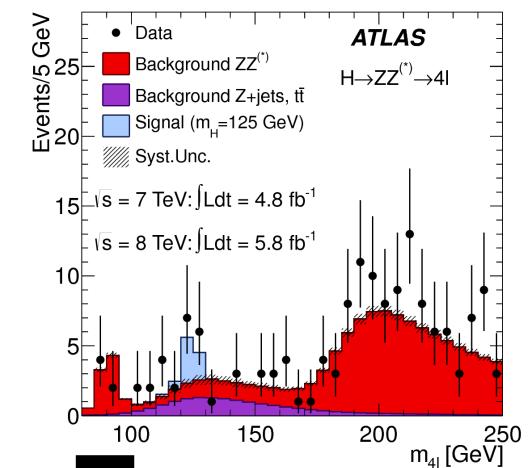
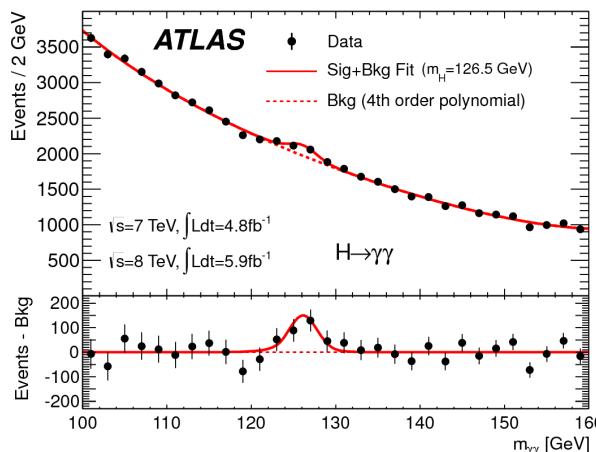
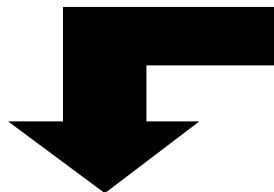


Hier...



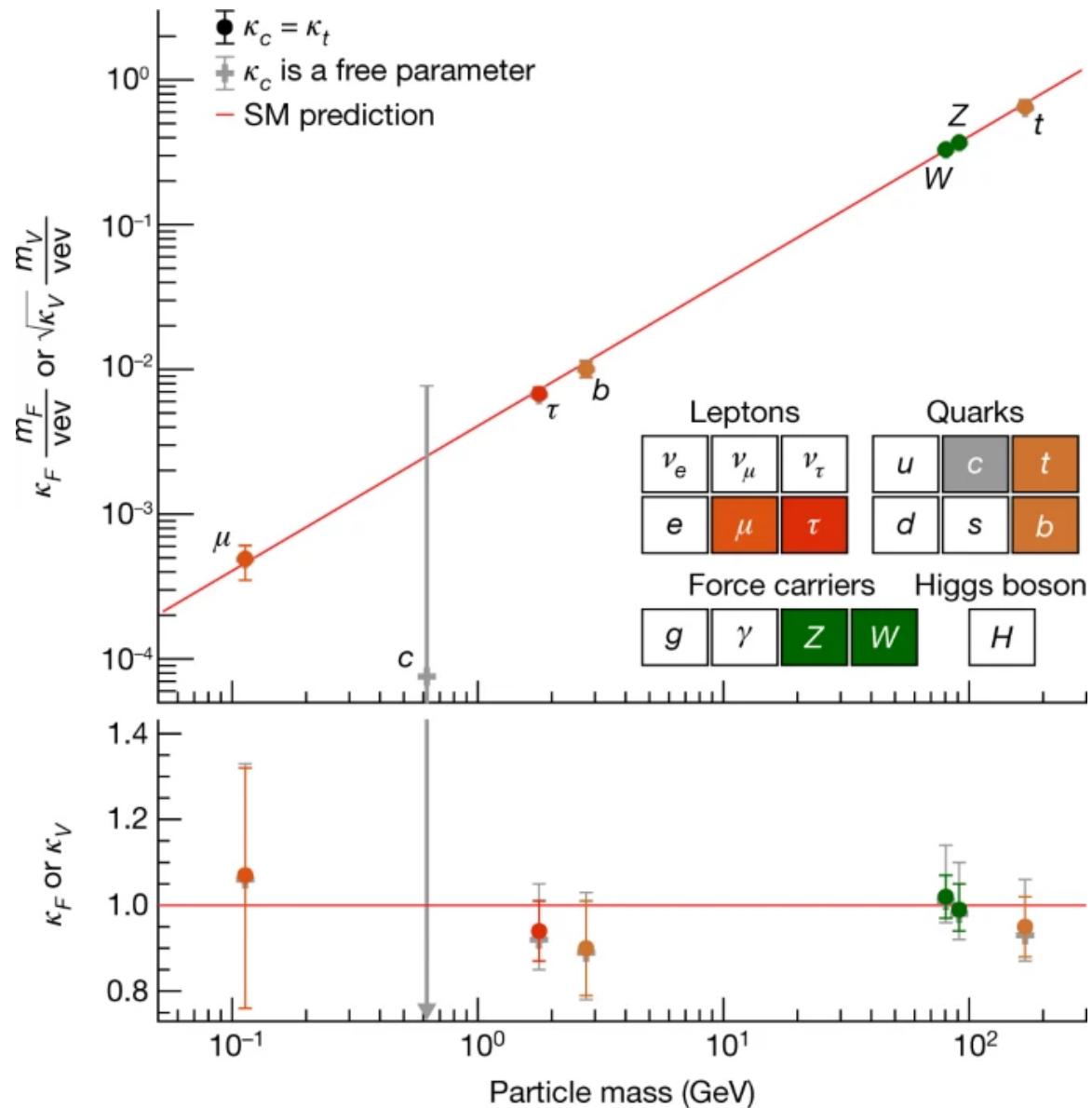


Hier... et aujourd'hui





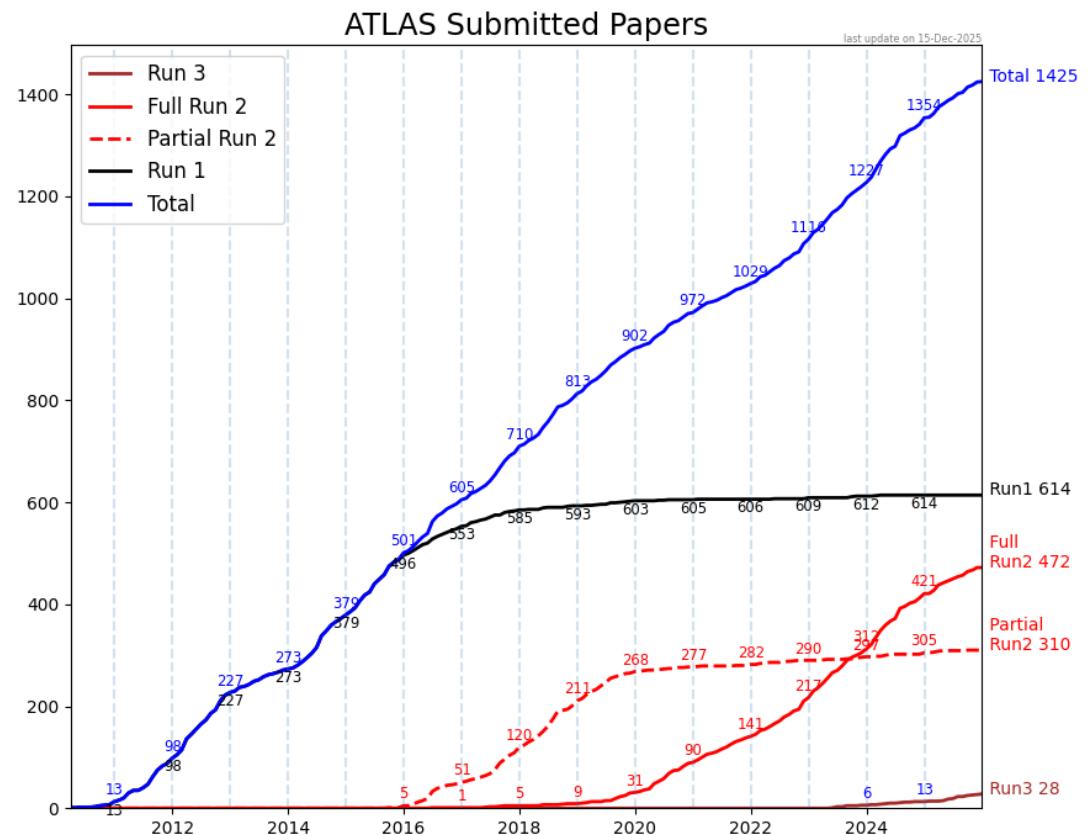
Masses des particules et couplage au boson de Higgs





Publications

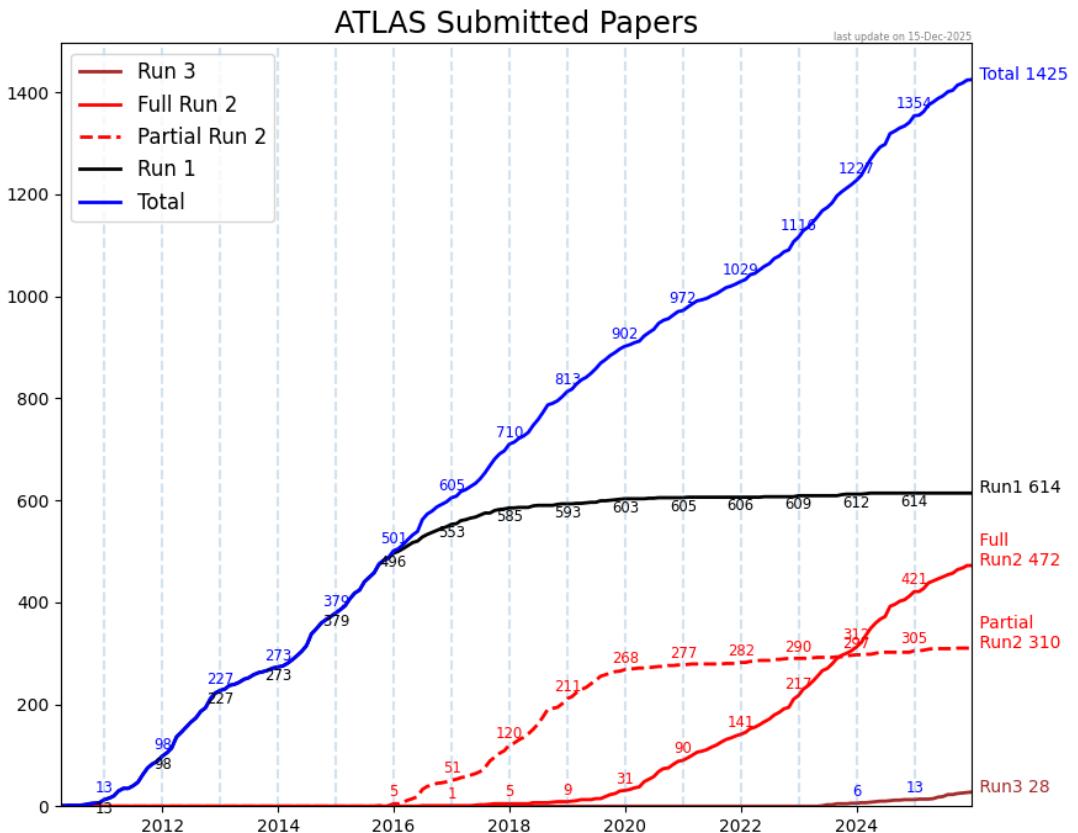
- ATLAS :
 - ▶ >1400 publications
 - ▶ >1200 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
 - ▶ > 800 publications
- ALICE :
 - ▶ > 500 publications





Publications

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



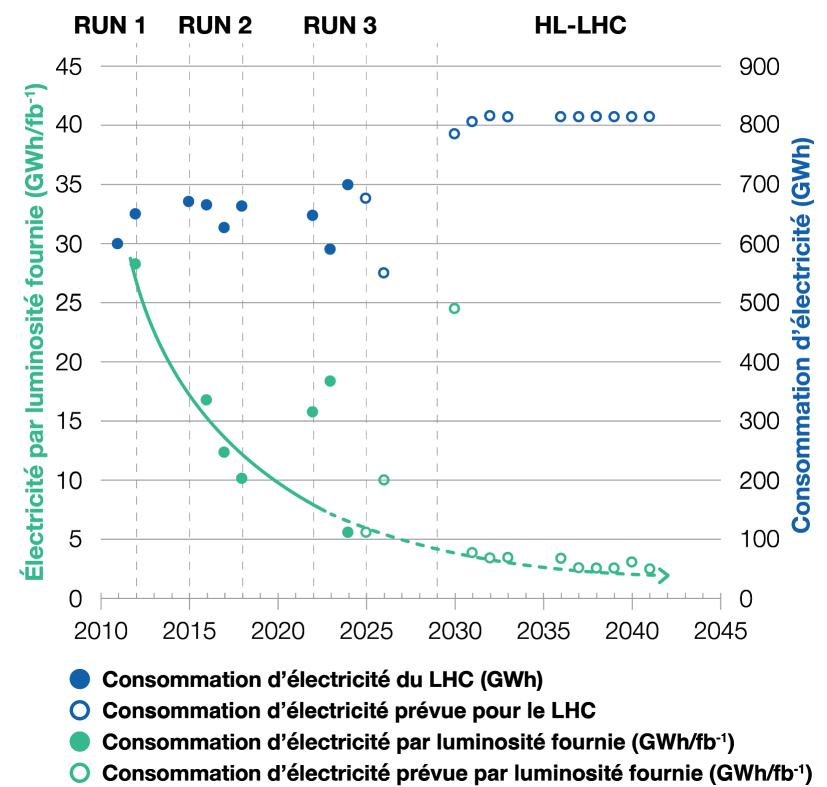
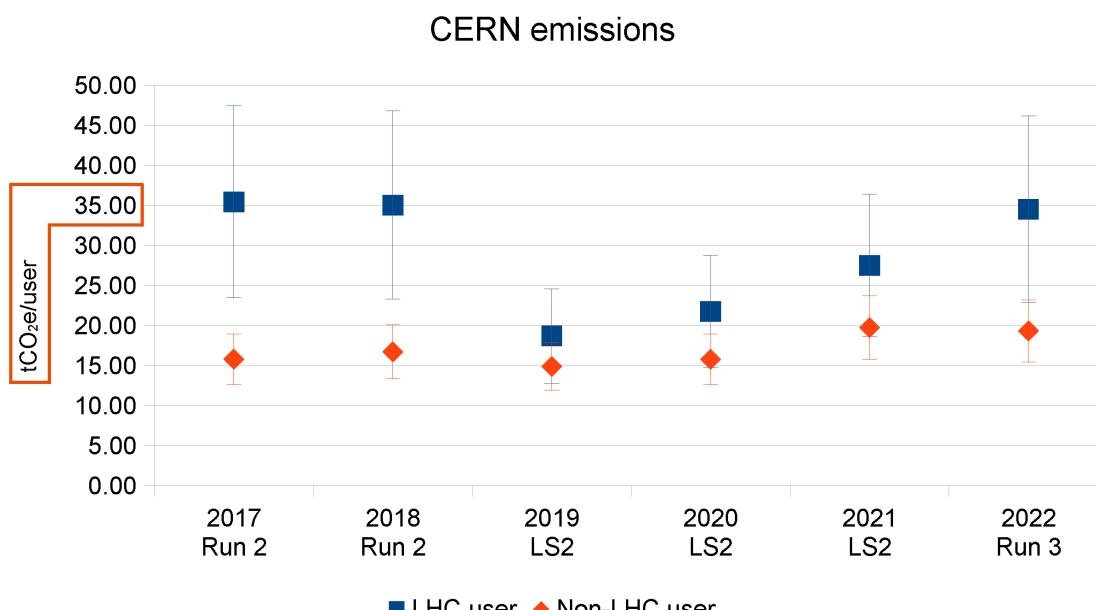
Toutes les publications du LHC sont accessibles gratuitement par tous les

Forte pression du CERN sur les journaux :
Open Access



Durabilité du CERN et du LHC

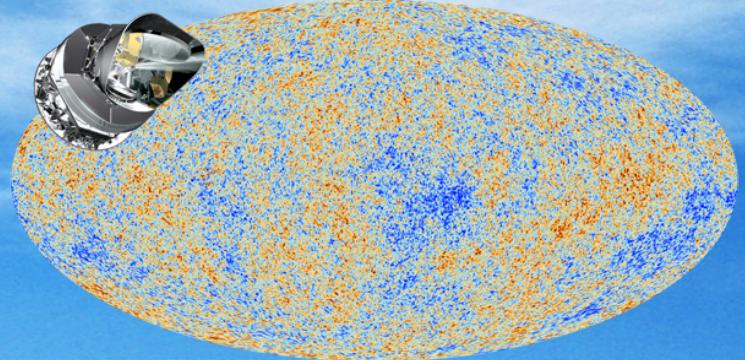
- Très grande infrastructure ► grande empreinte environnementale
- Consommation électrique importante
 - ▶ Accélération des particules, aimants, cryogénie
- Première source d'émissions :
 - ▶ Gaz à très fort pouvoir de réchauffement utilisés pour le refroidissement et la détection de particules
- Construction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







Ce que l'on connaît (5%)



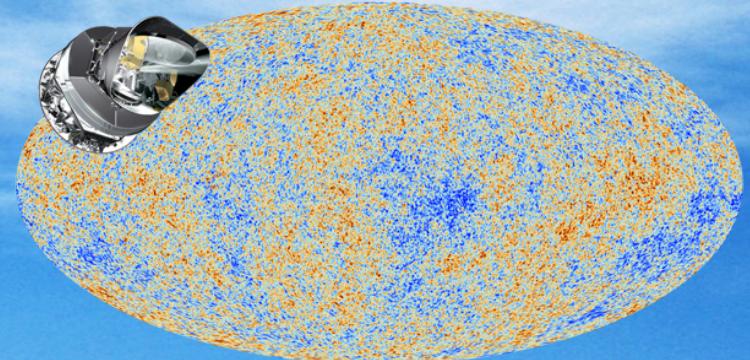
Ce que l'on connaît (5%)

Reste à
découvrir !

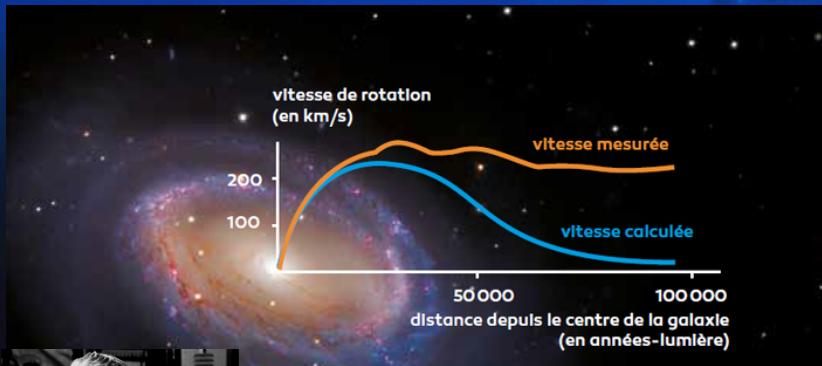
27% Matière noire

68% Énergie noire





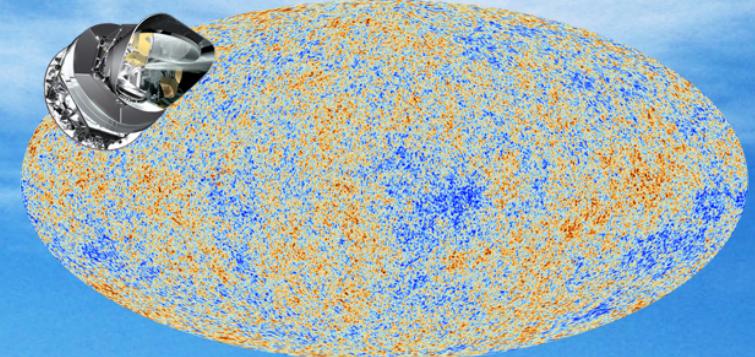
Ce que l'on connaît (5%)



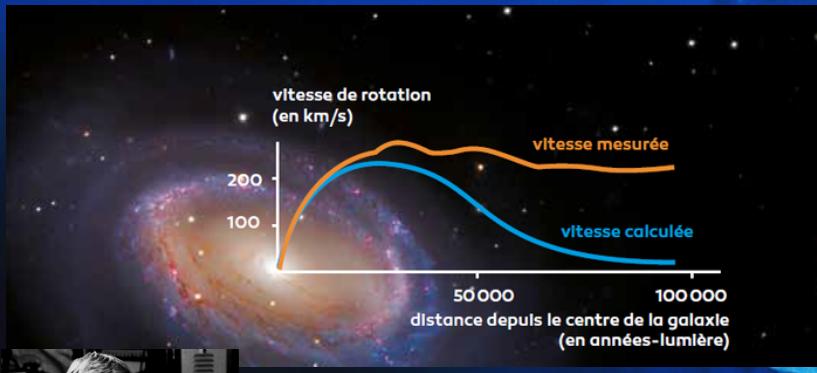
Vera Rubin

27% Matière noire

68% Énergie noire



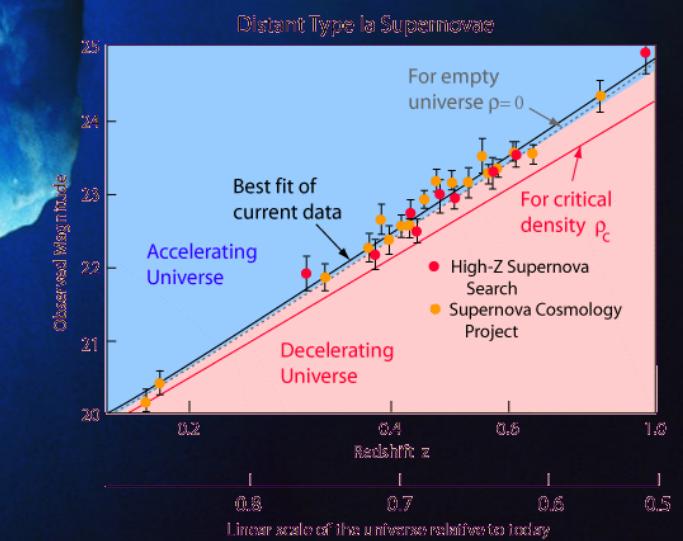
Ce que l'on connaît (5%)



Vera Rubin

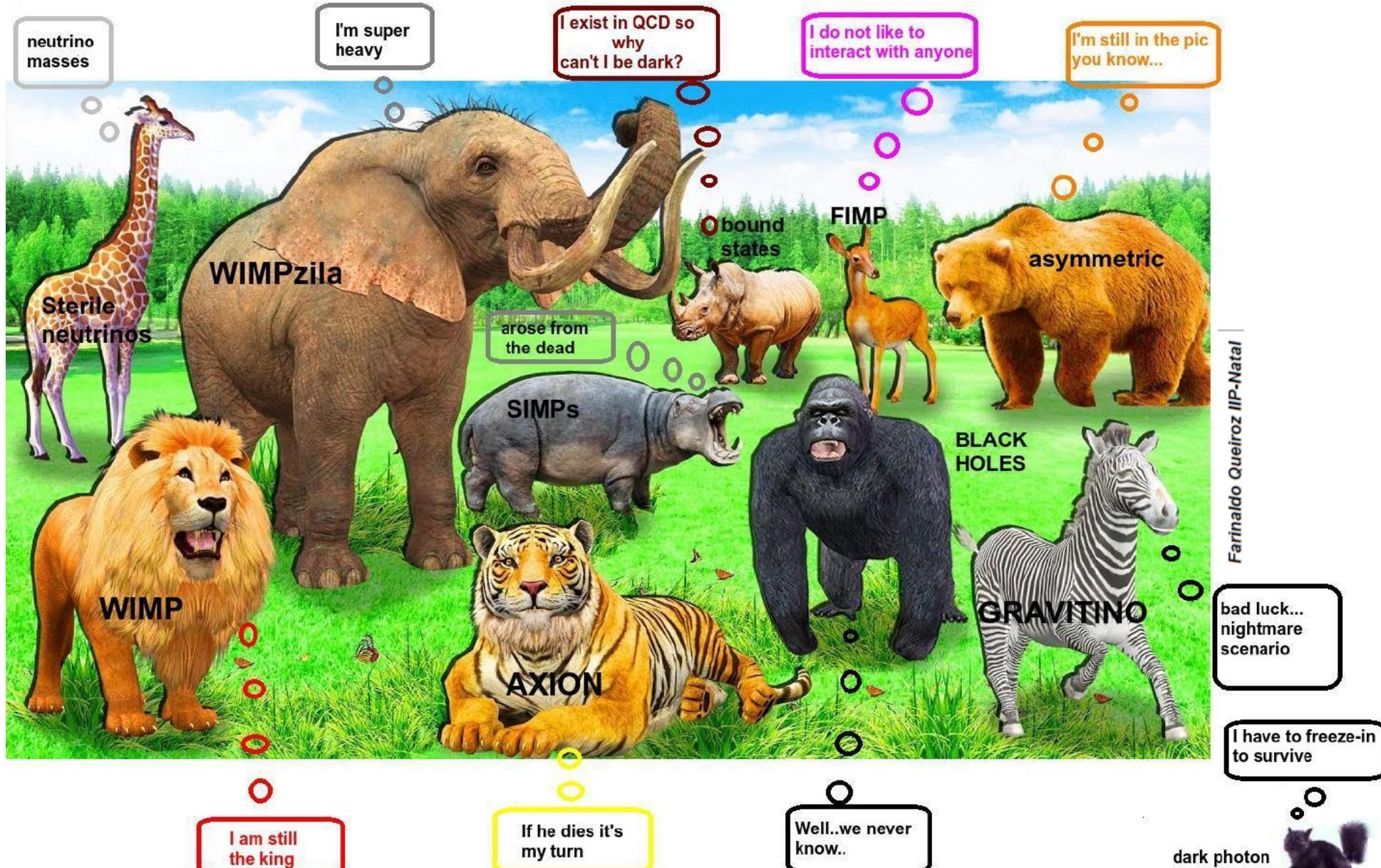
27% Matière noire

68% Énergie noire



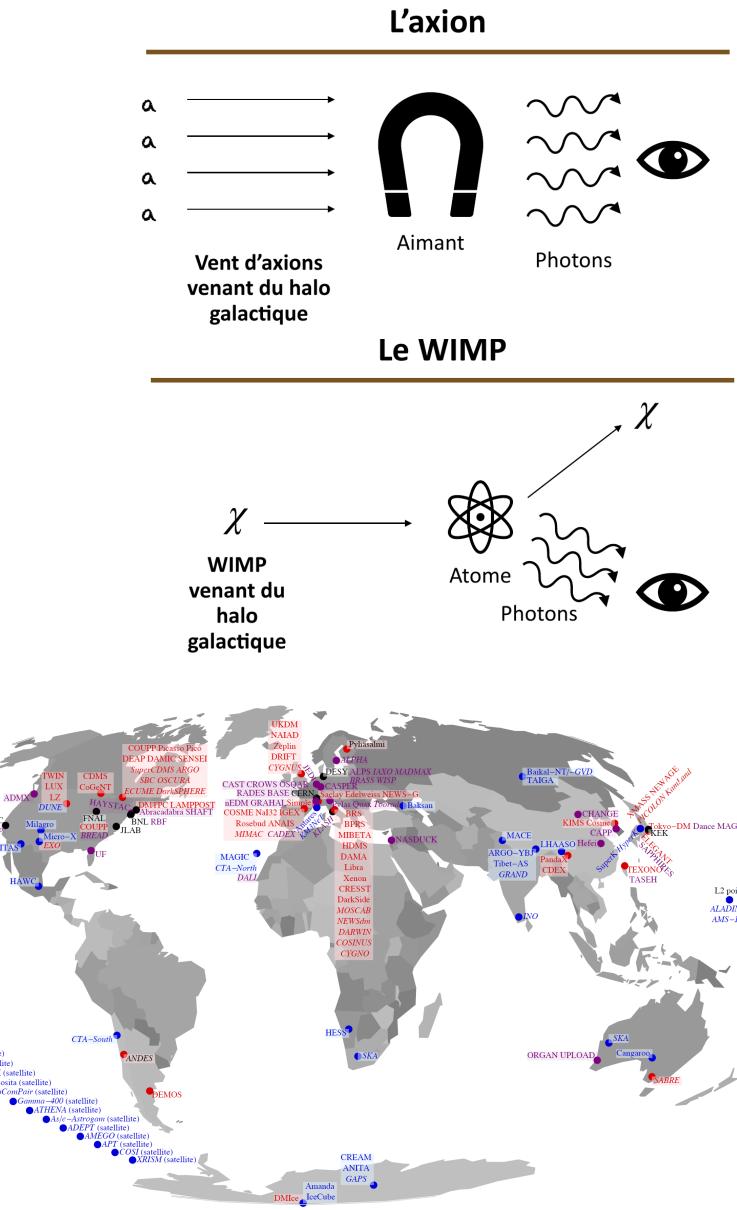
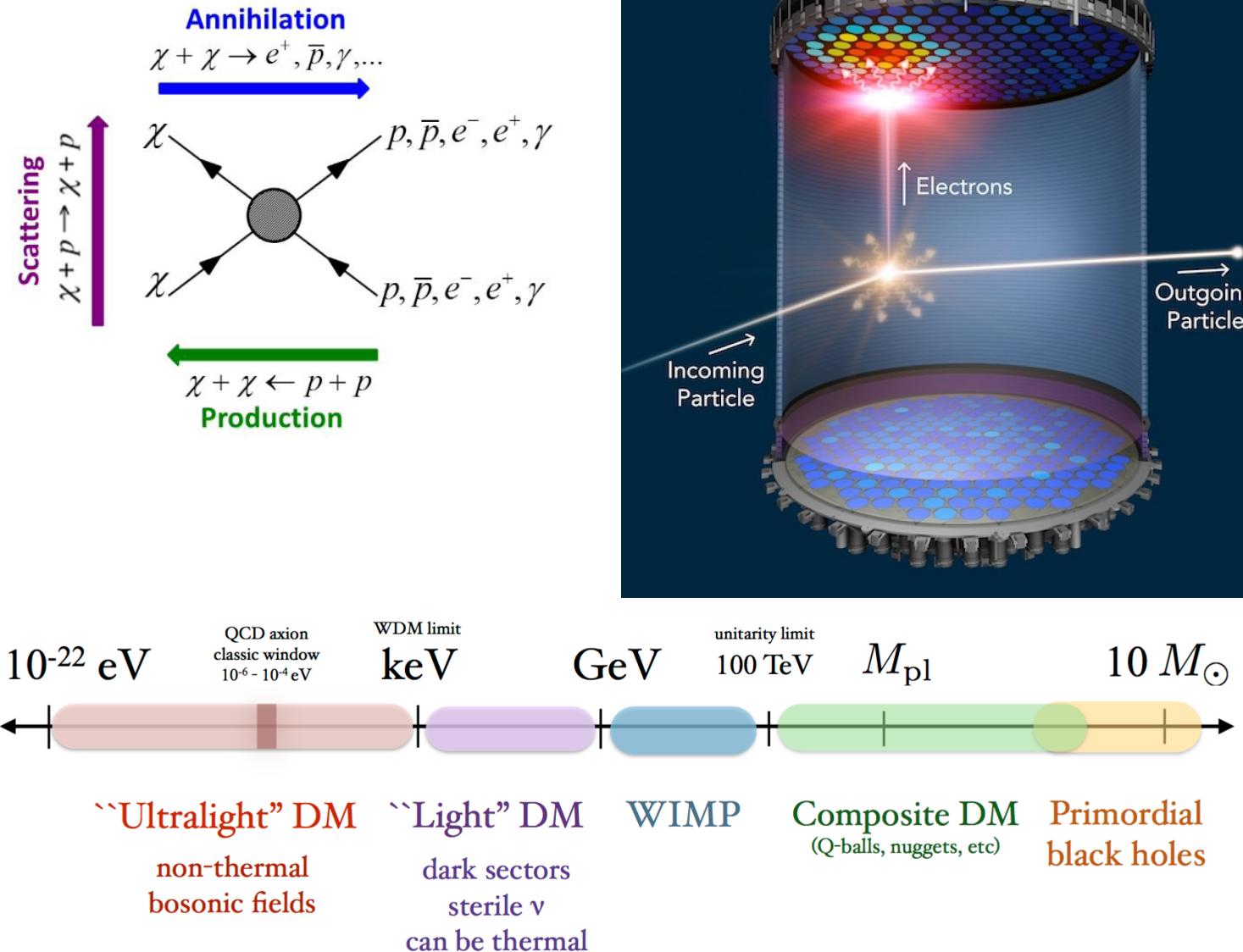


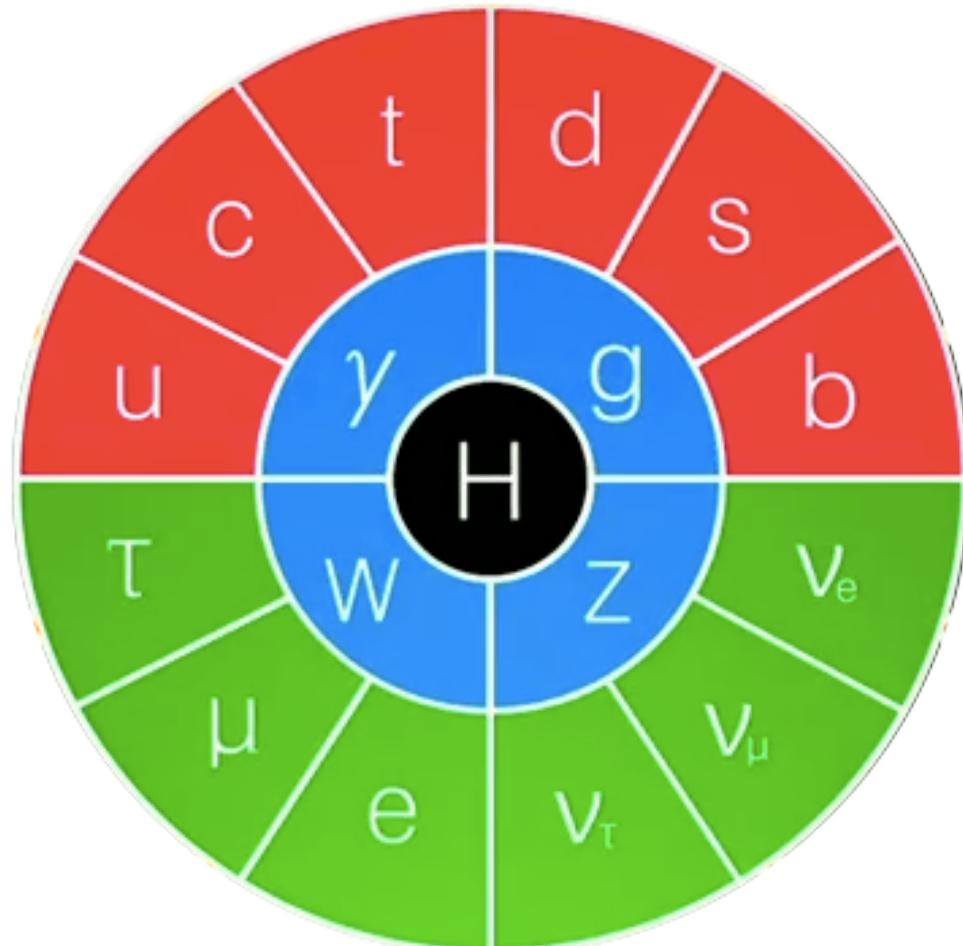
Candidats matière noire

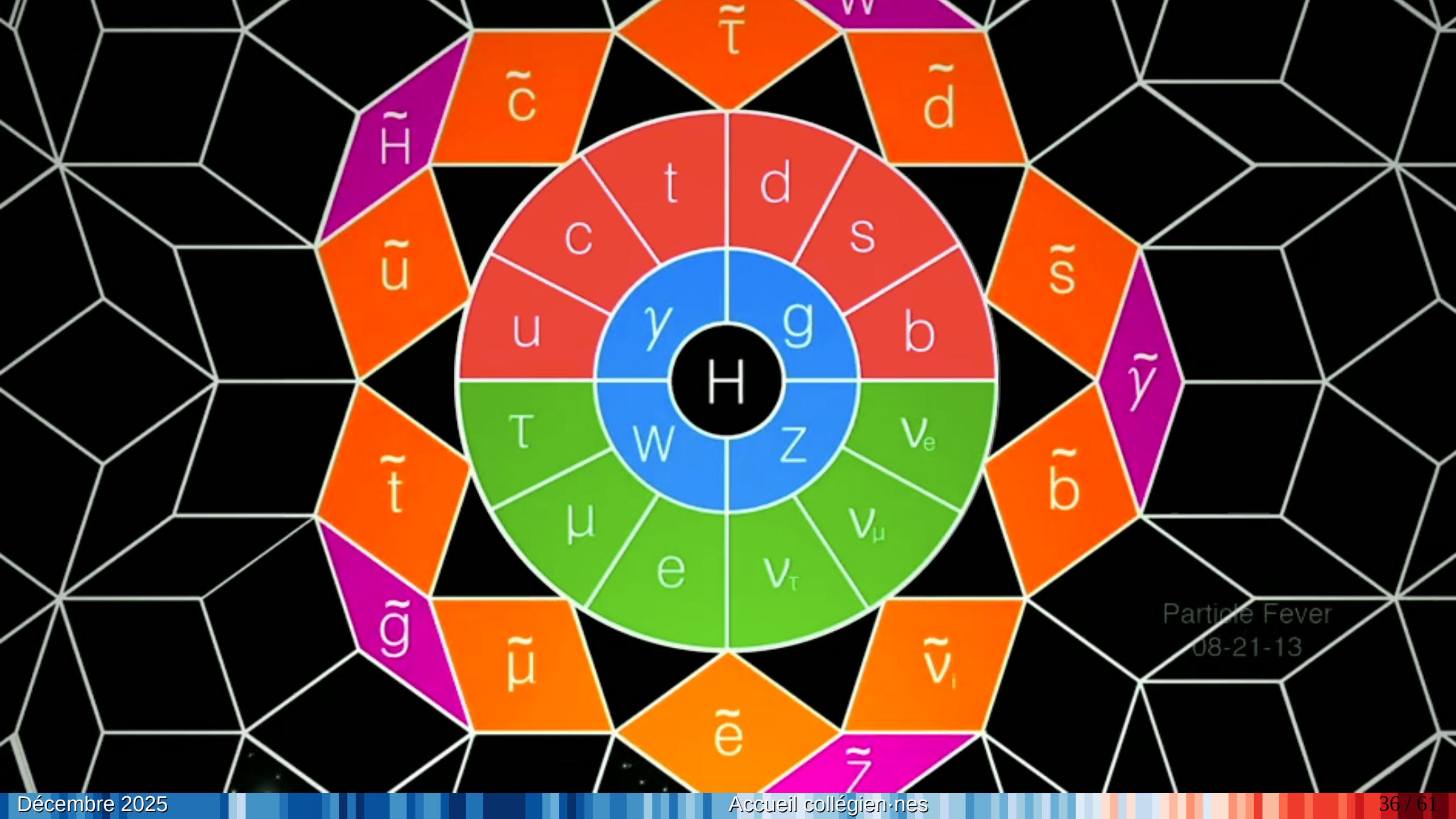




Candidats matière noire







Particle Fever
08-21-13

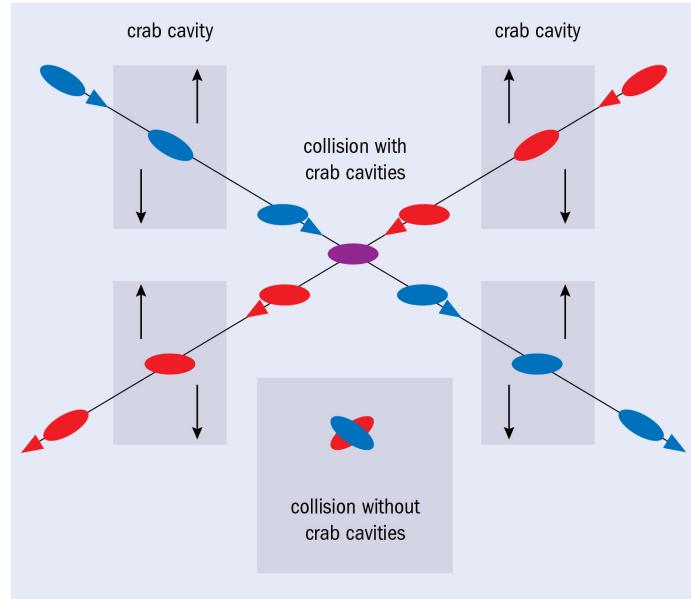
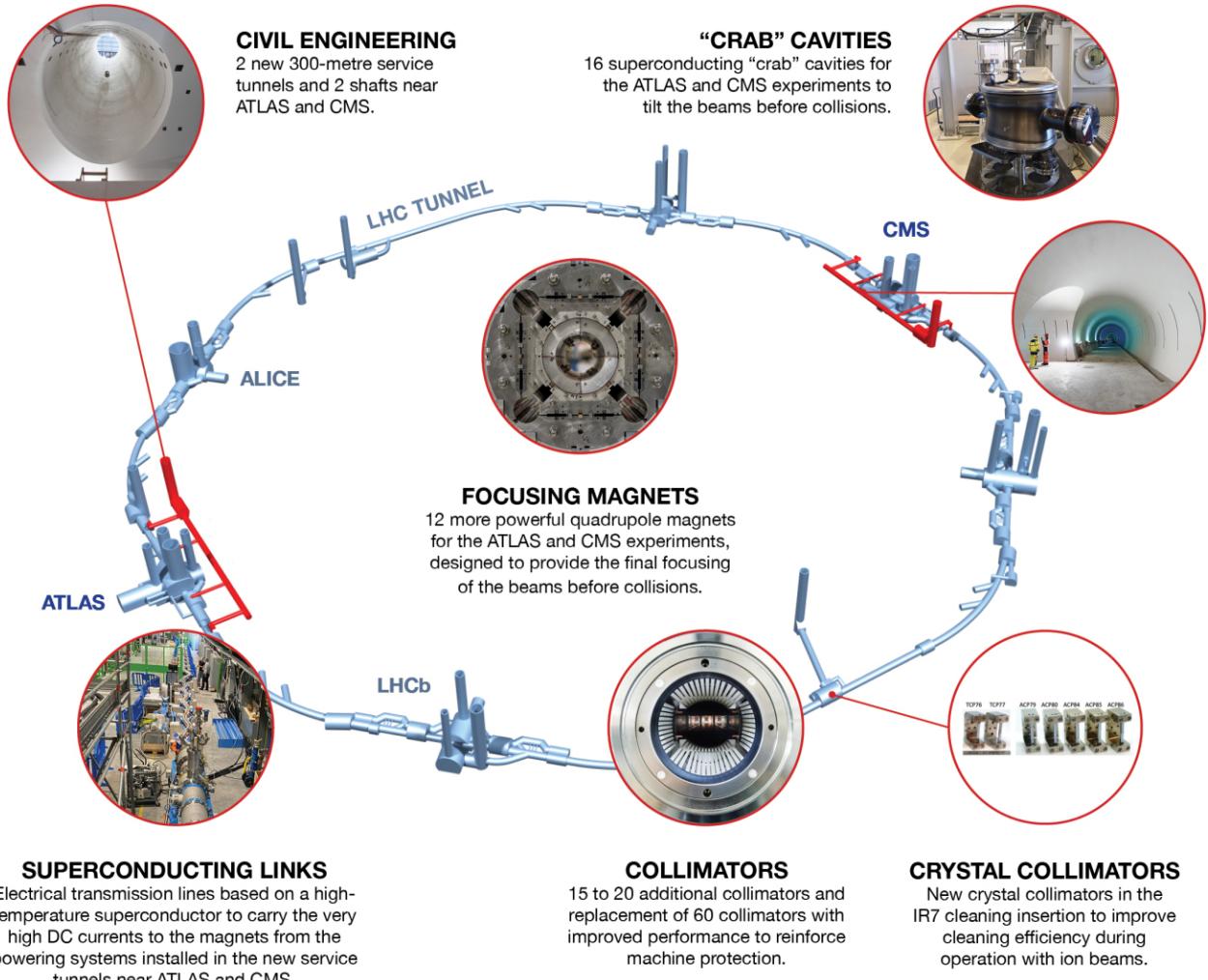
Accélérateur du futur : 2030-2041



LHC à haute luminosité (HL-LHC)



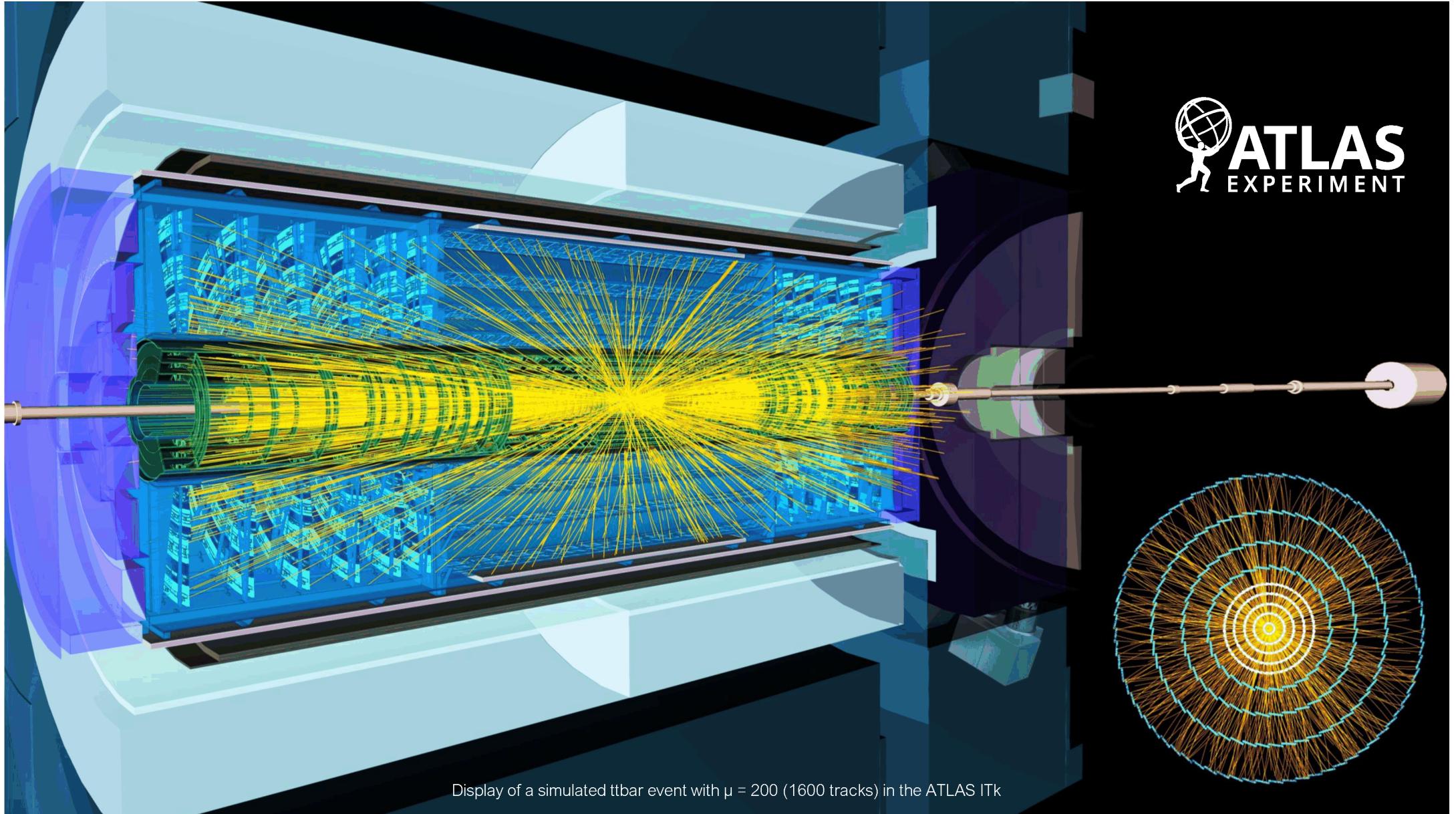
NEW TECHNOLOGIES FOR THE HIGH-LUMINOSITY LHC





Haute luminosité ?

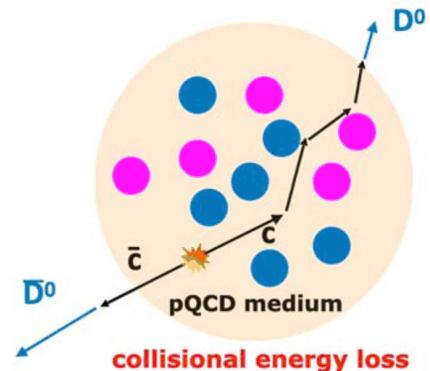
ATLAS
EXPERIMENT



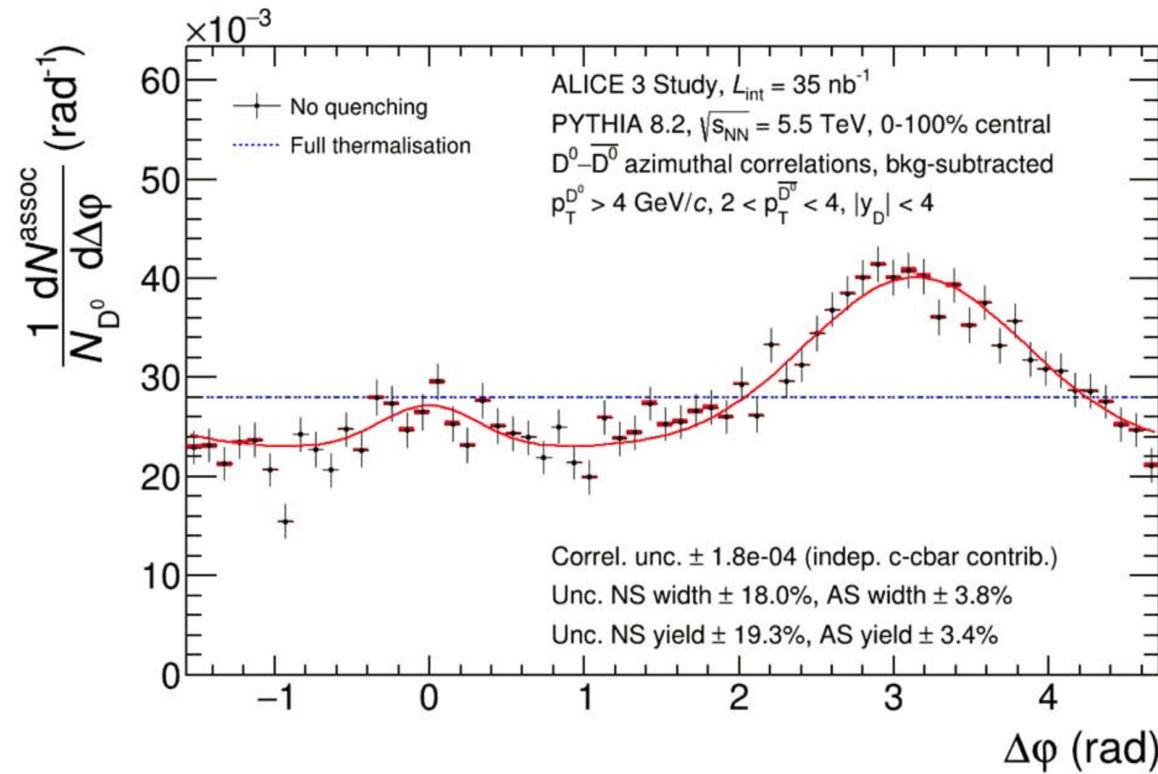
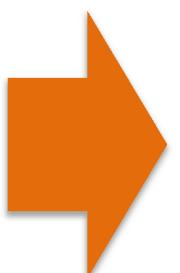
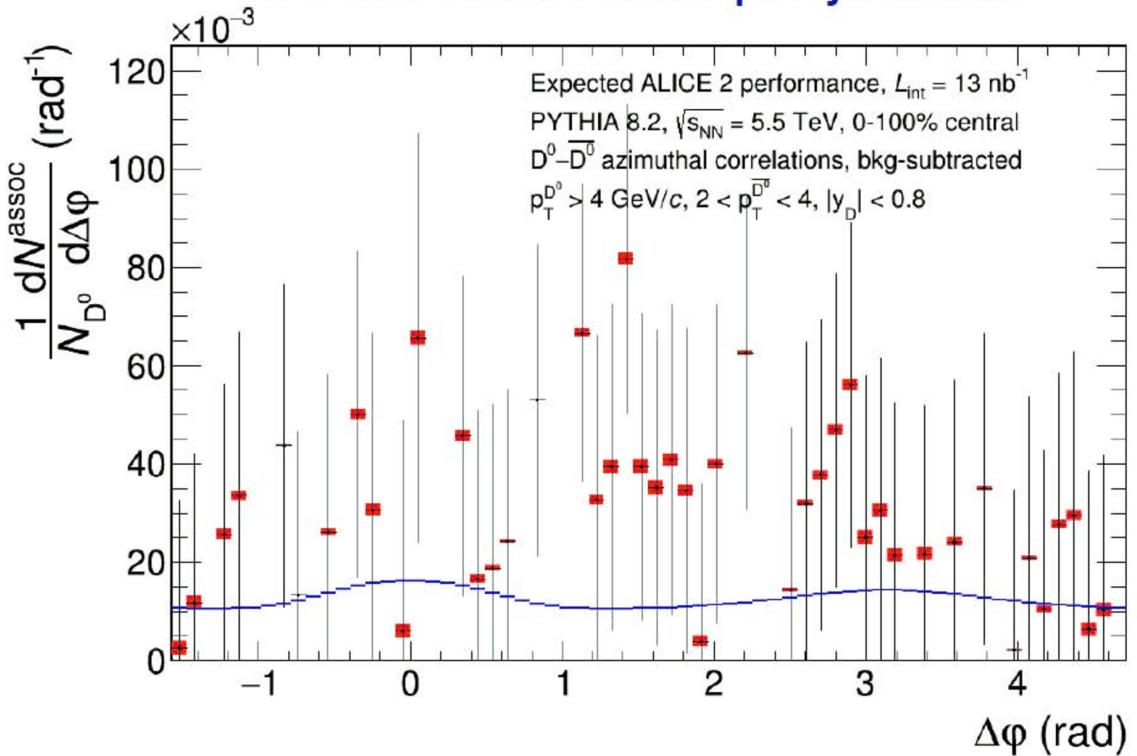
Pourquoi toutes ces données ?



La puissance des statistiques et d'un meilleur détecteur



ALICE Run 3&4 projection





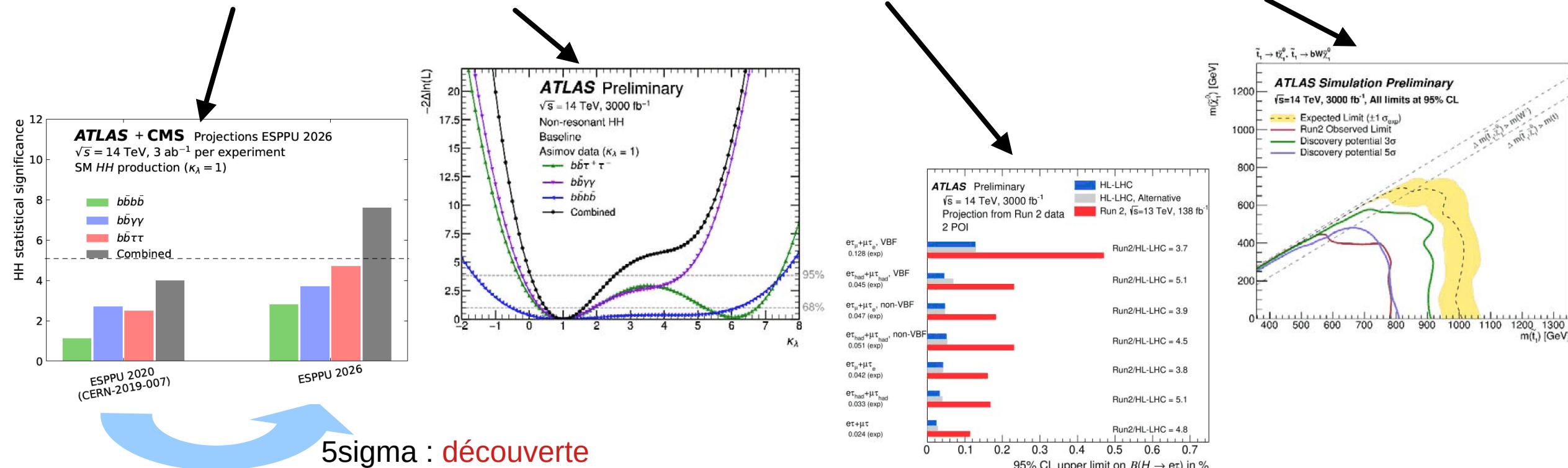
Le HL-LHC pour faire quoi ?

■ 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, ...



Pourquoi envisage-t-on de nouveaux accélérateurs ?

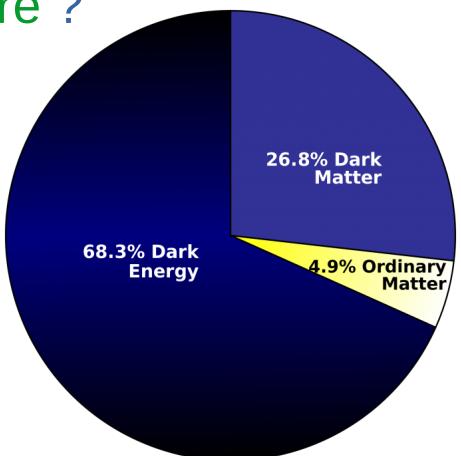


■ Pour la physique !

- ▶ 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

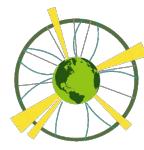
- ▶ Pourquoi trois familles de particules de matière ?
- ▶ Pourquoi une telle variété de masses ?
- ▶ Que sont la **matière noire** et l'**énergie noire** ?
- ▶ Pourquoi n'y a-t-il **presque pas d'antimatière** ?



Possibles futurs collisionneurs après le HL-LHC

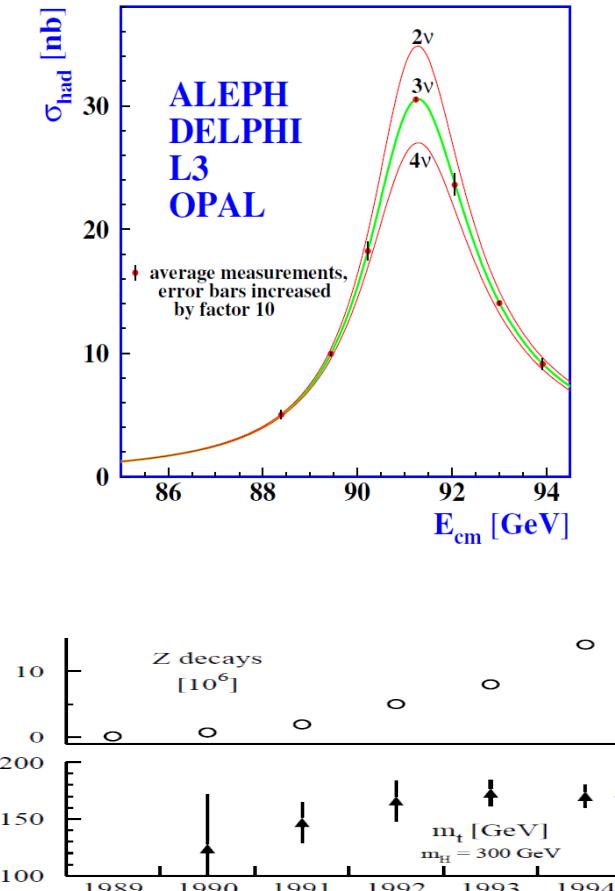


- **Future Circular Collider (FCC)**
Circumference: 90 -100 km
Energy: 100 TeV (pp) 90-350 GeV (e^+e^-)
- **Circular Electron Positron Collider (CEPC), China**
- **Large Hadron Collider (LHC)**
Large Electron-Positron Collider (LEP)
Circumference: 27 km
Energy: 14 TeV (pp) 209 GeV (e^+e^-)
- **Tevatron**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

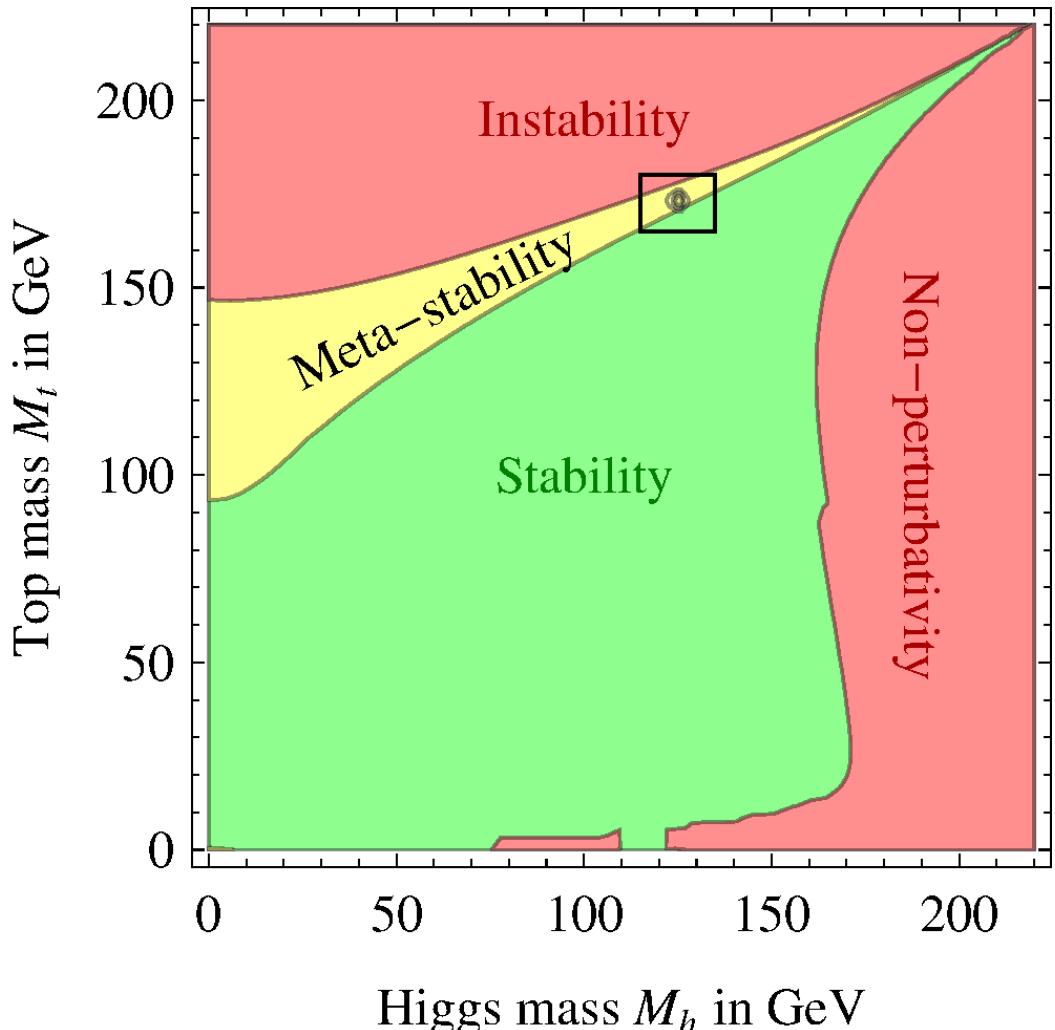


Prédiction du LEP
 $170 \pm 10^{+17}_{-19} \text{ GeV}$

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

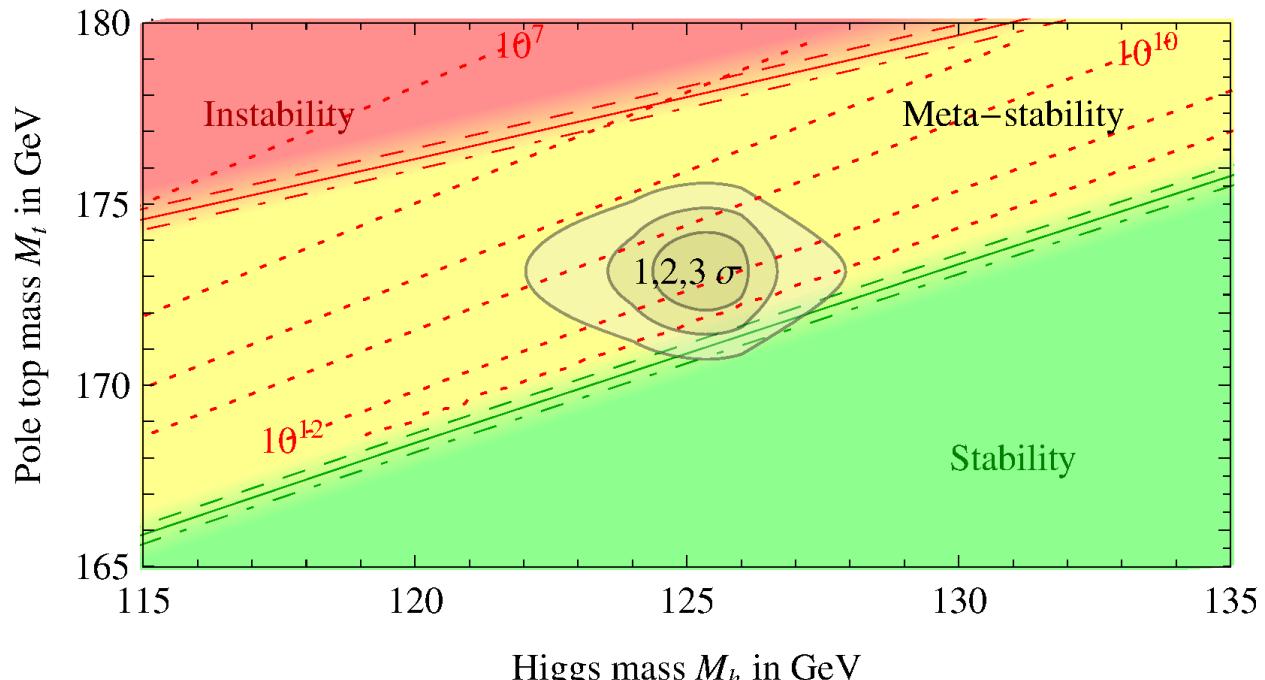


Un univers instable ?



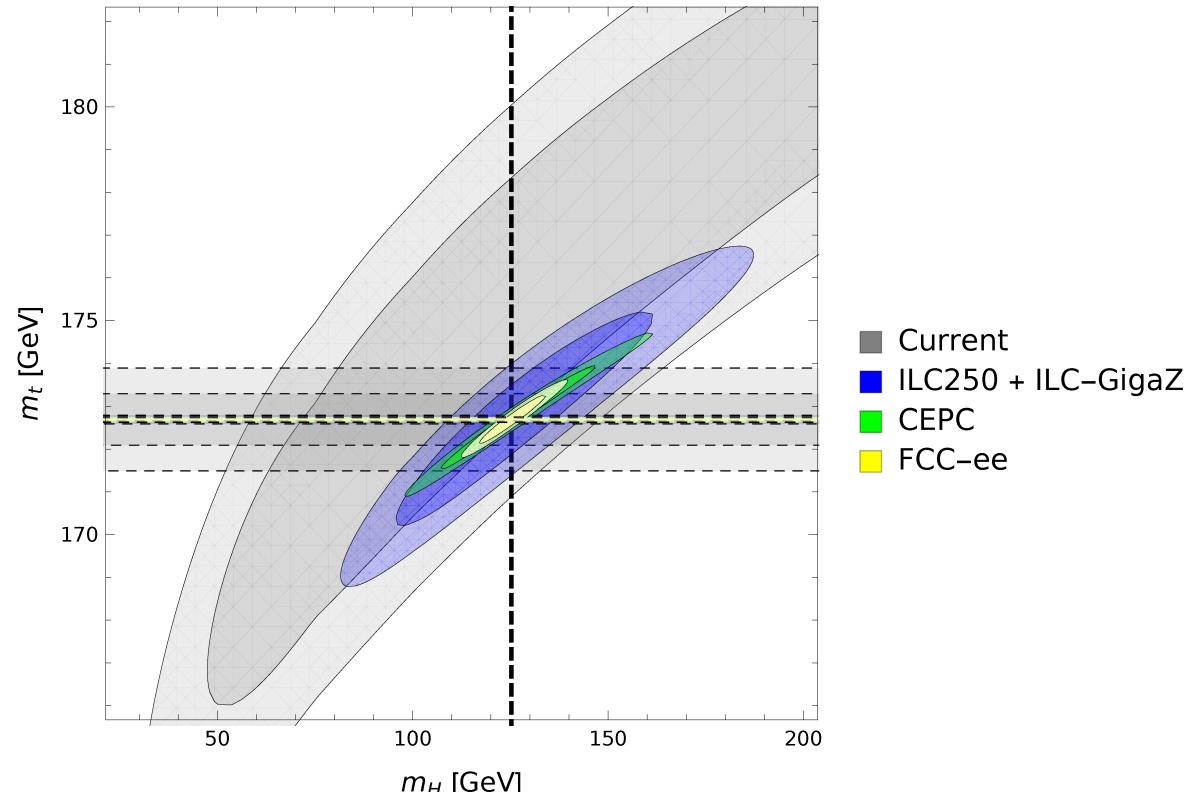
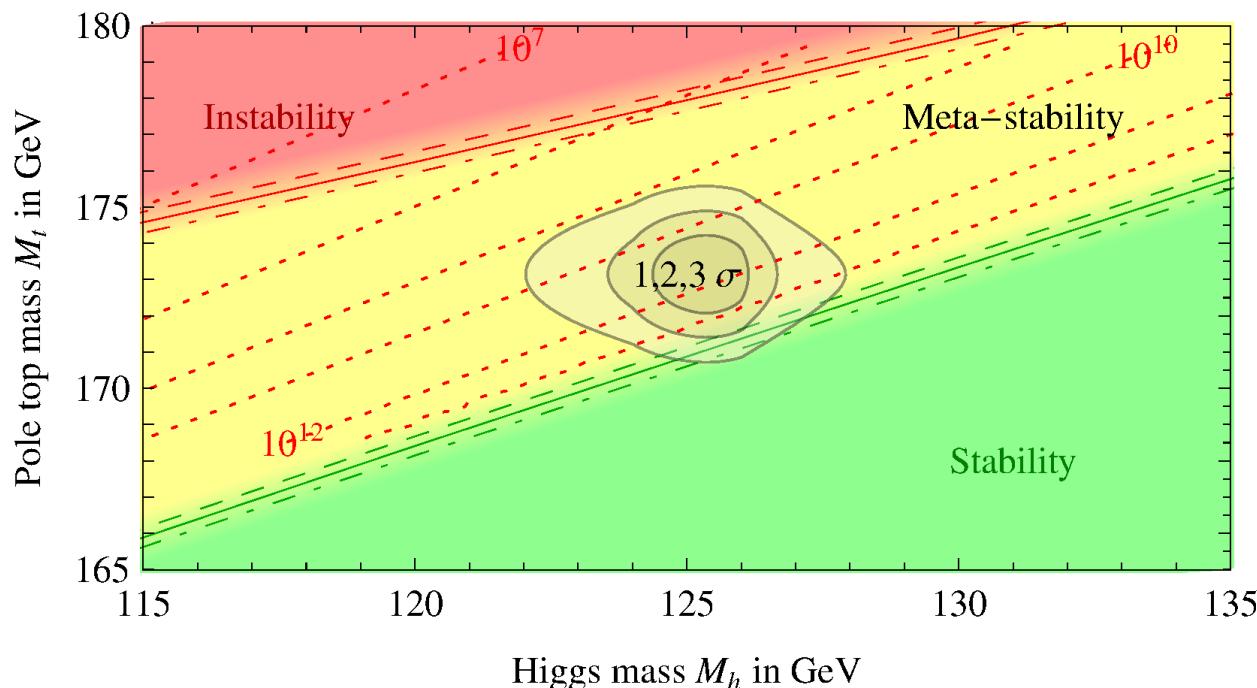


Un univers instable ?





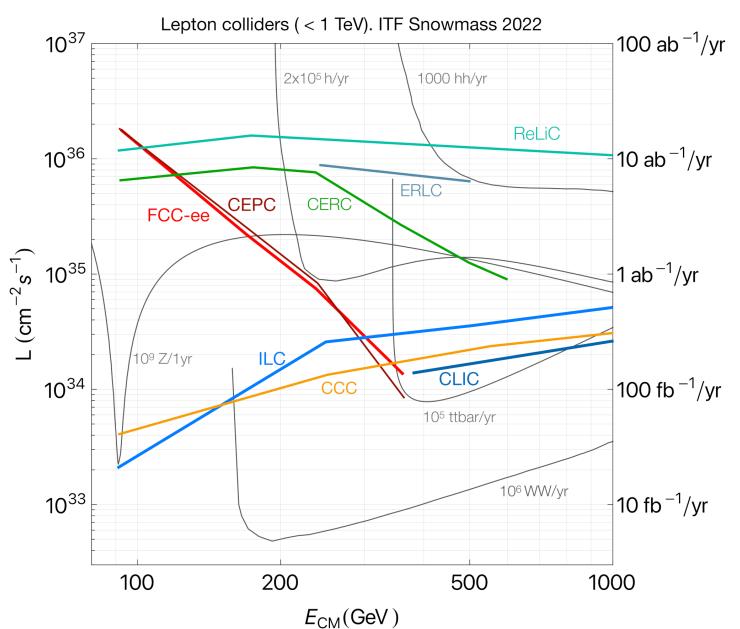
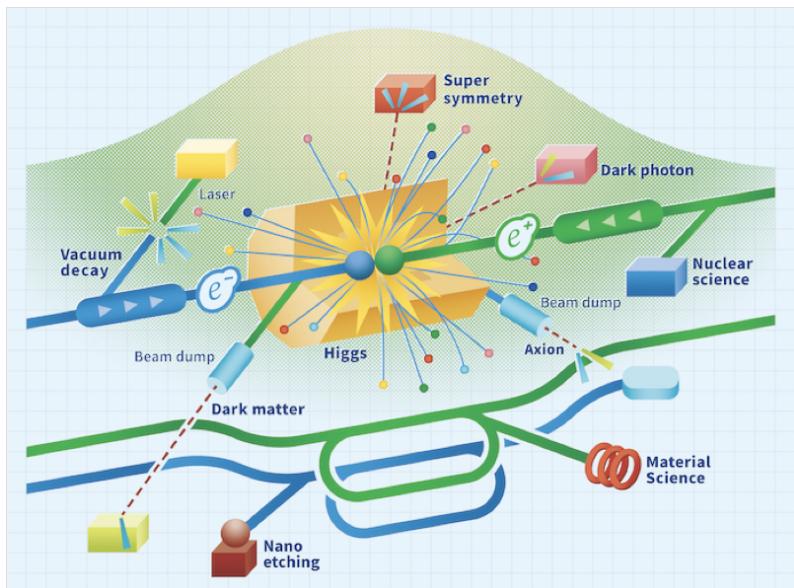
Un univers instable ?





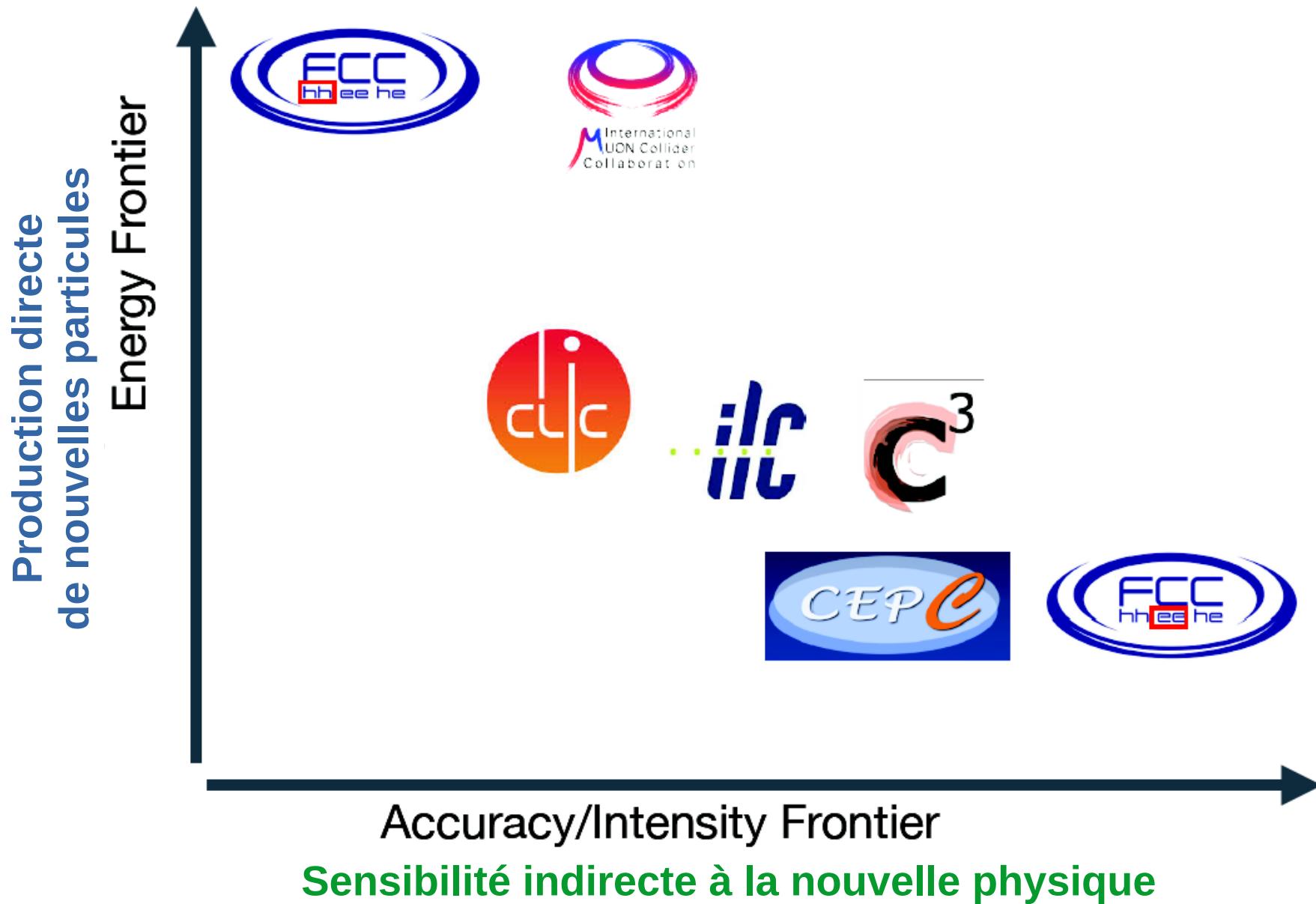
Principaux projets envisagés

- 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-eh: 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



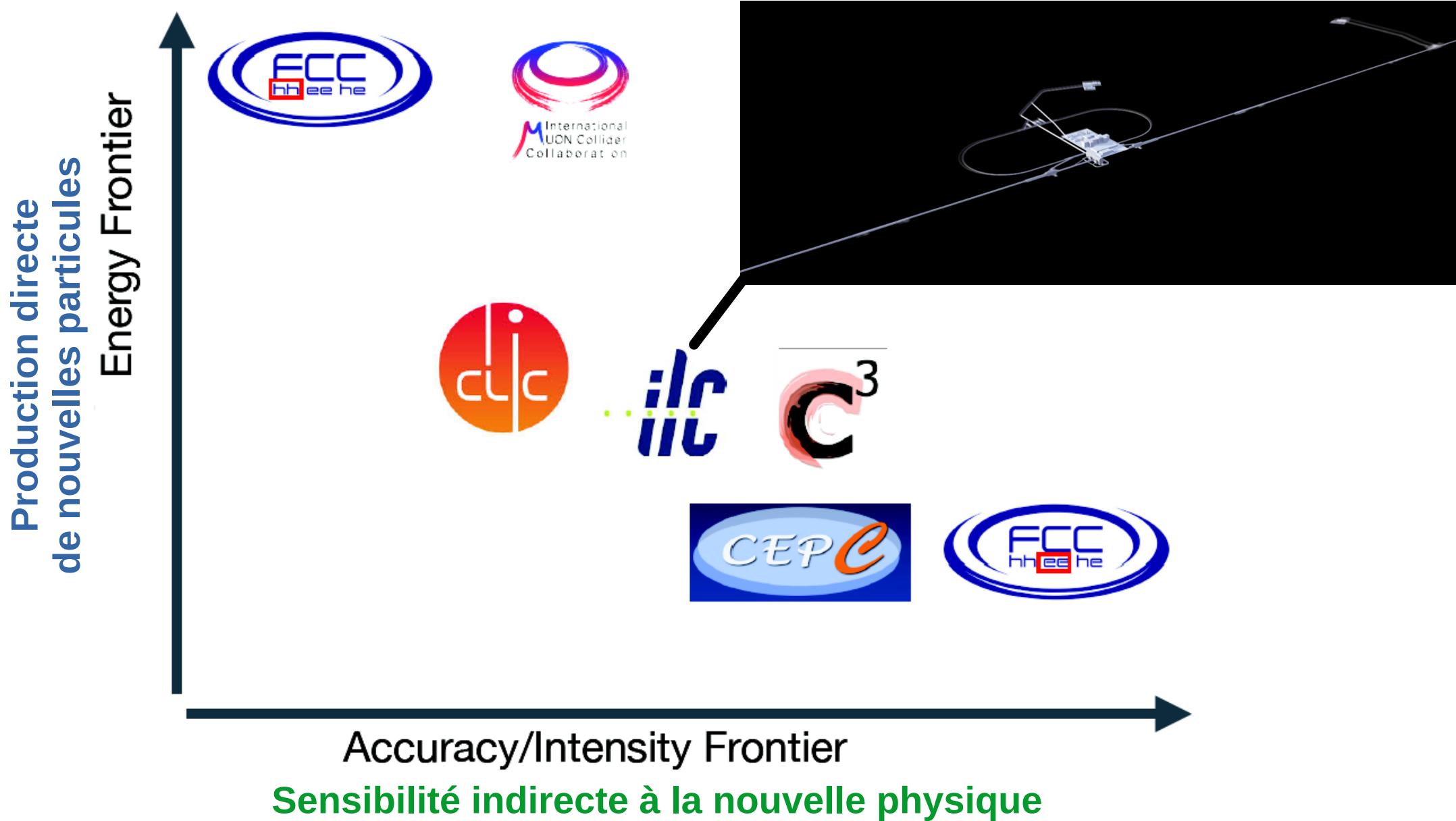


Frontière en énergie et en intensité



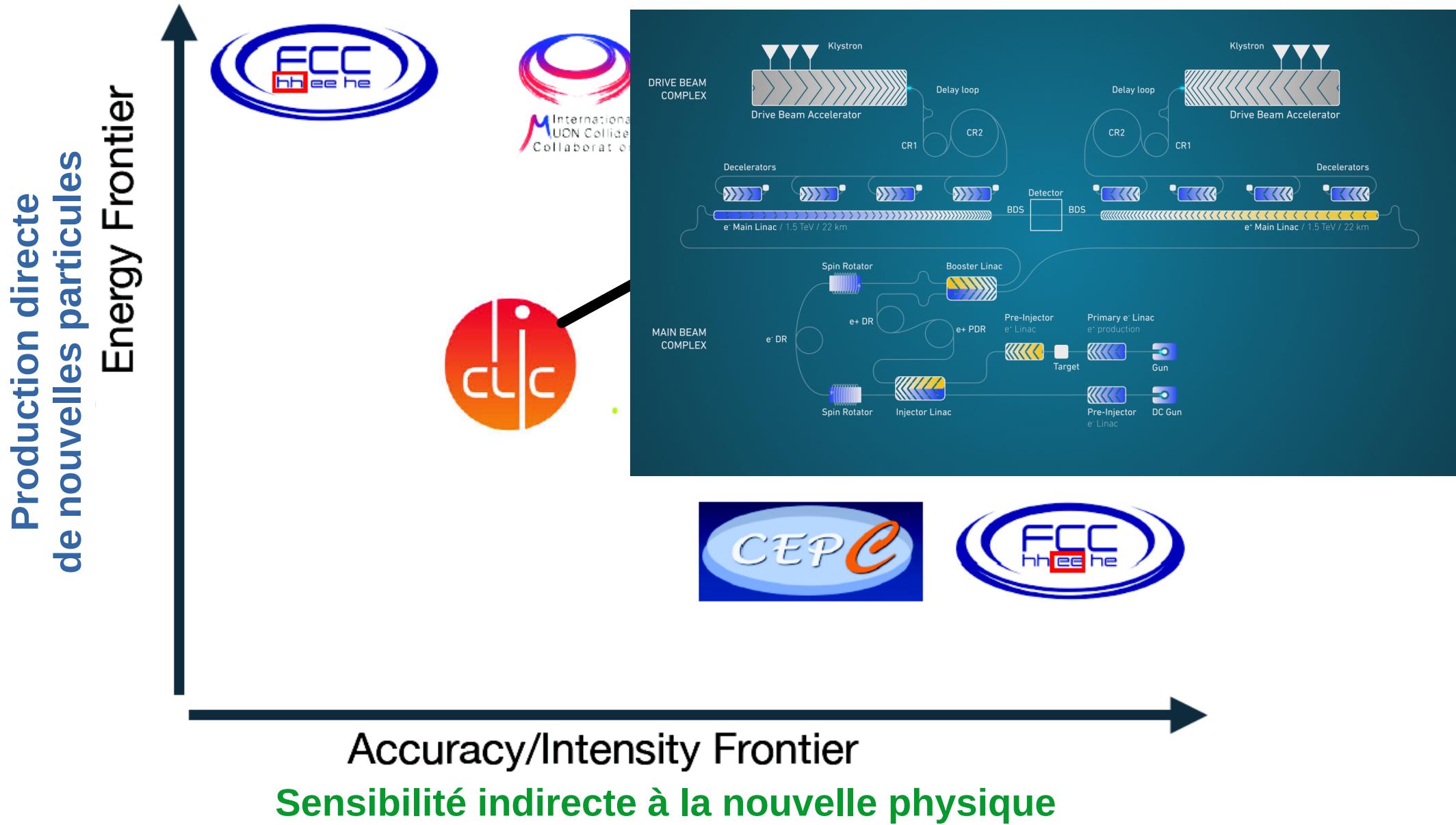


Frontière en énergie et en intensité



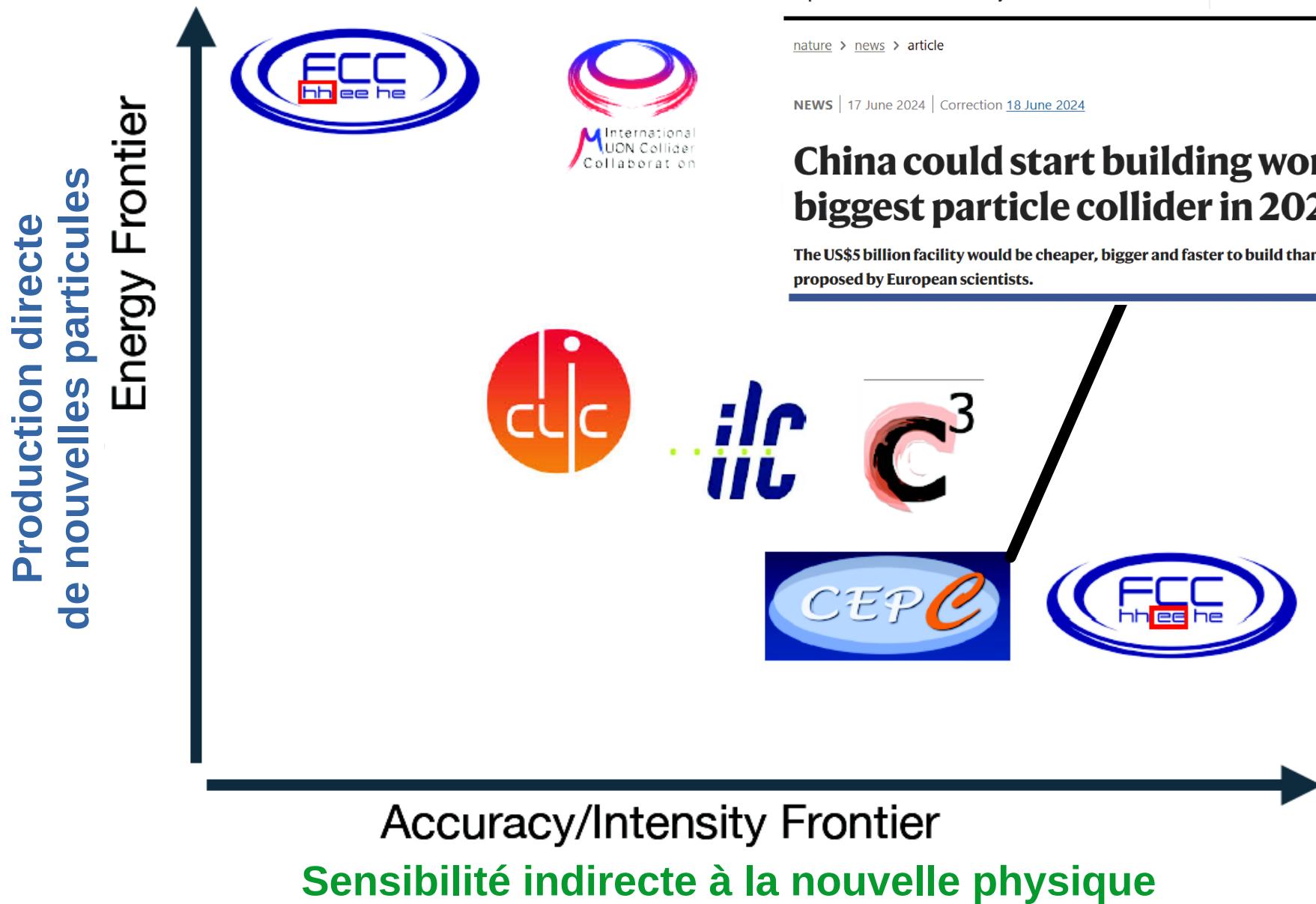


Frontière en énergie et en intensité





Frontière en énergie et en intensité



nature

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

nature > news > article

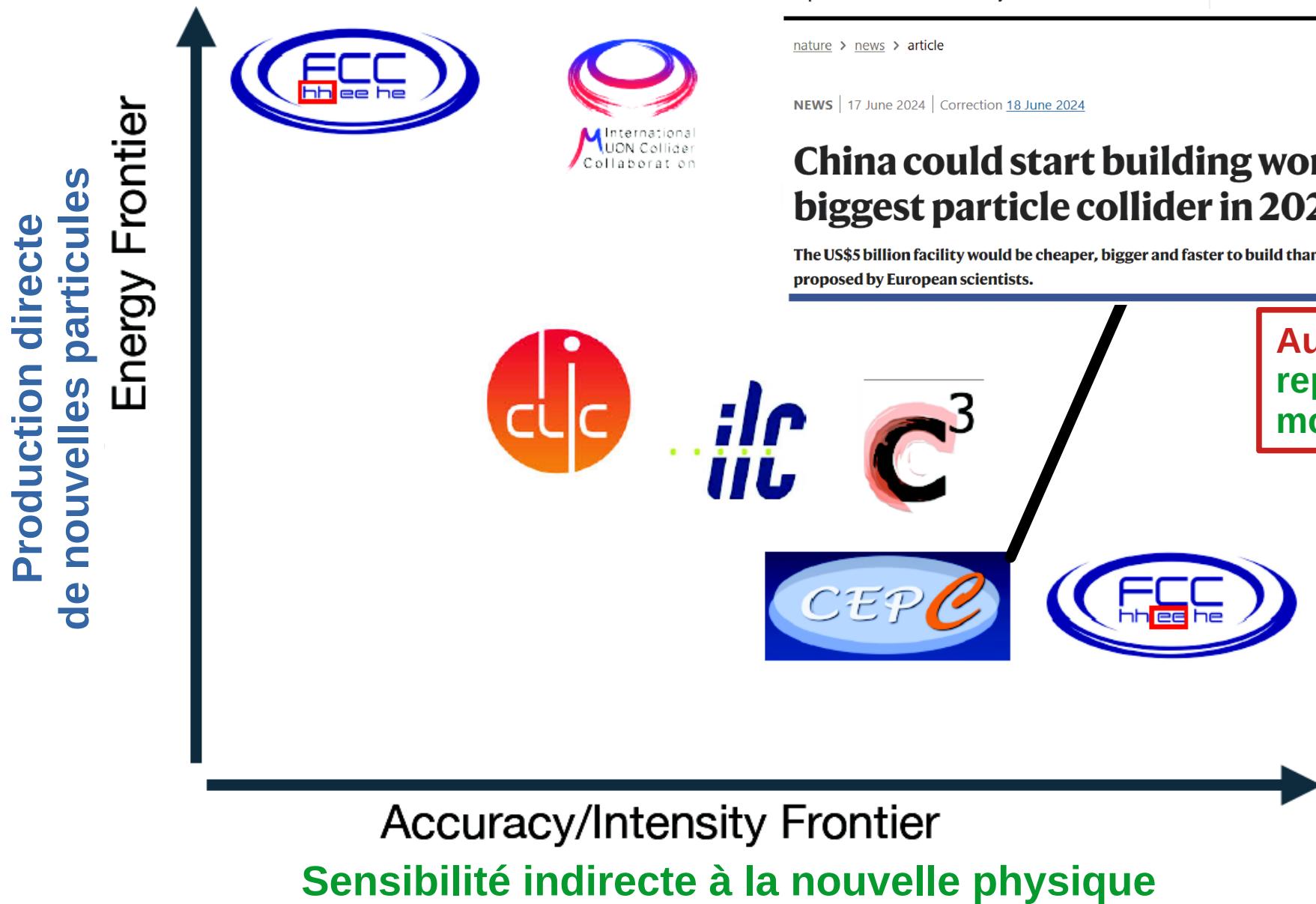
NEWS | 17 June 2024 | Correction [18 June 2024](#)

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.



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

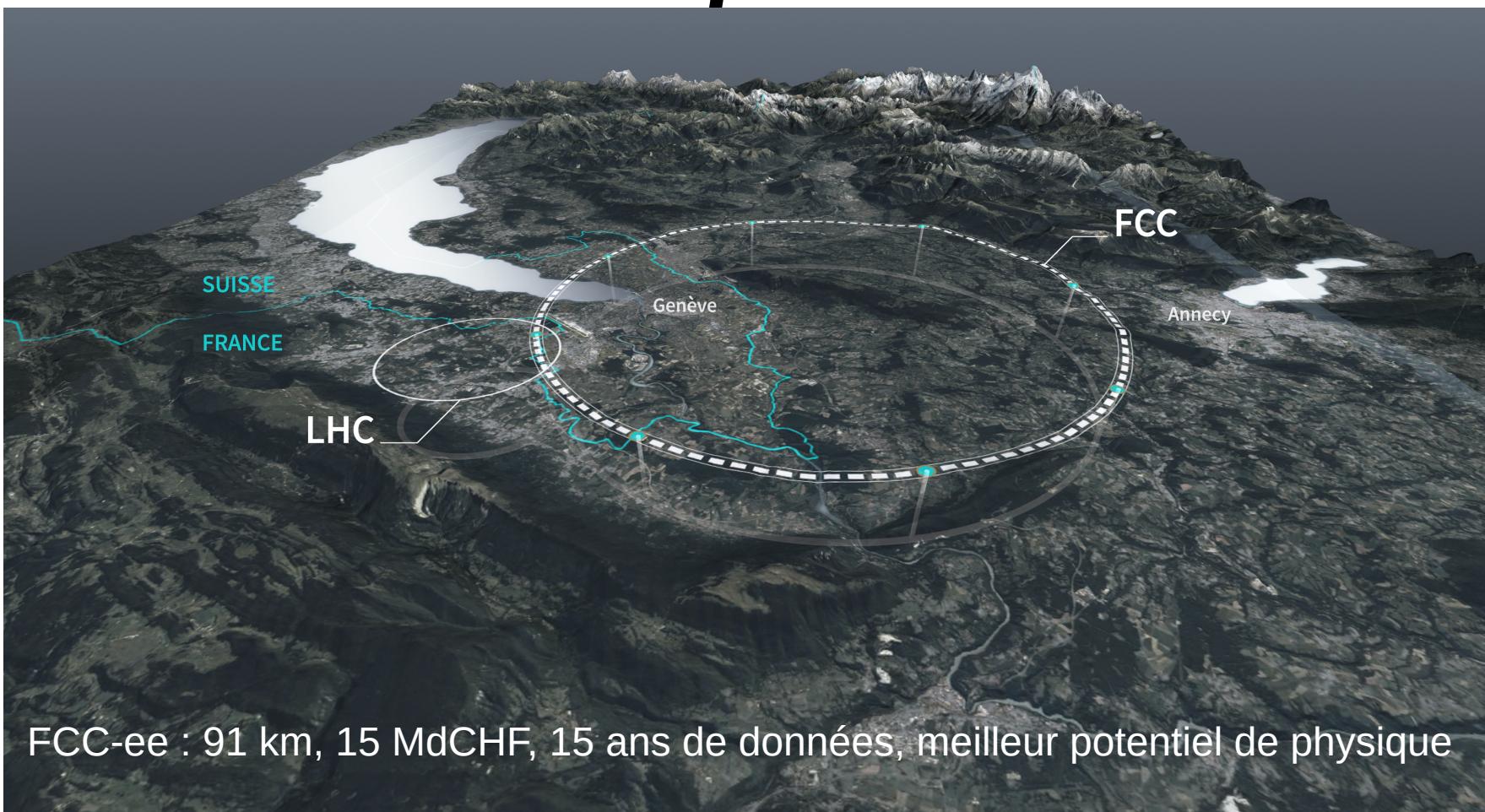
China could start building world's biggest particle collider in 2027

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



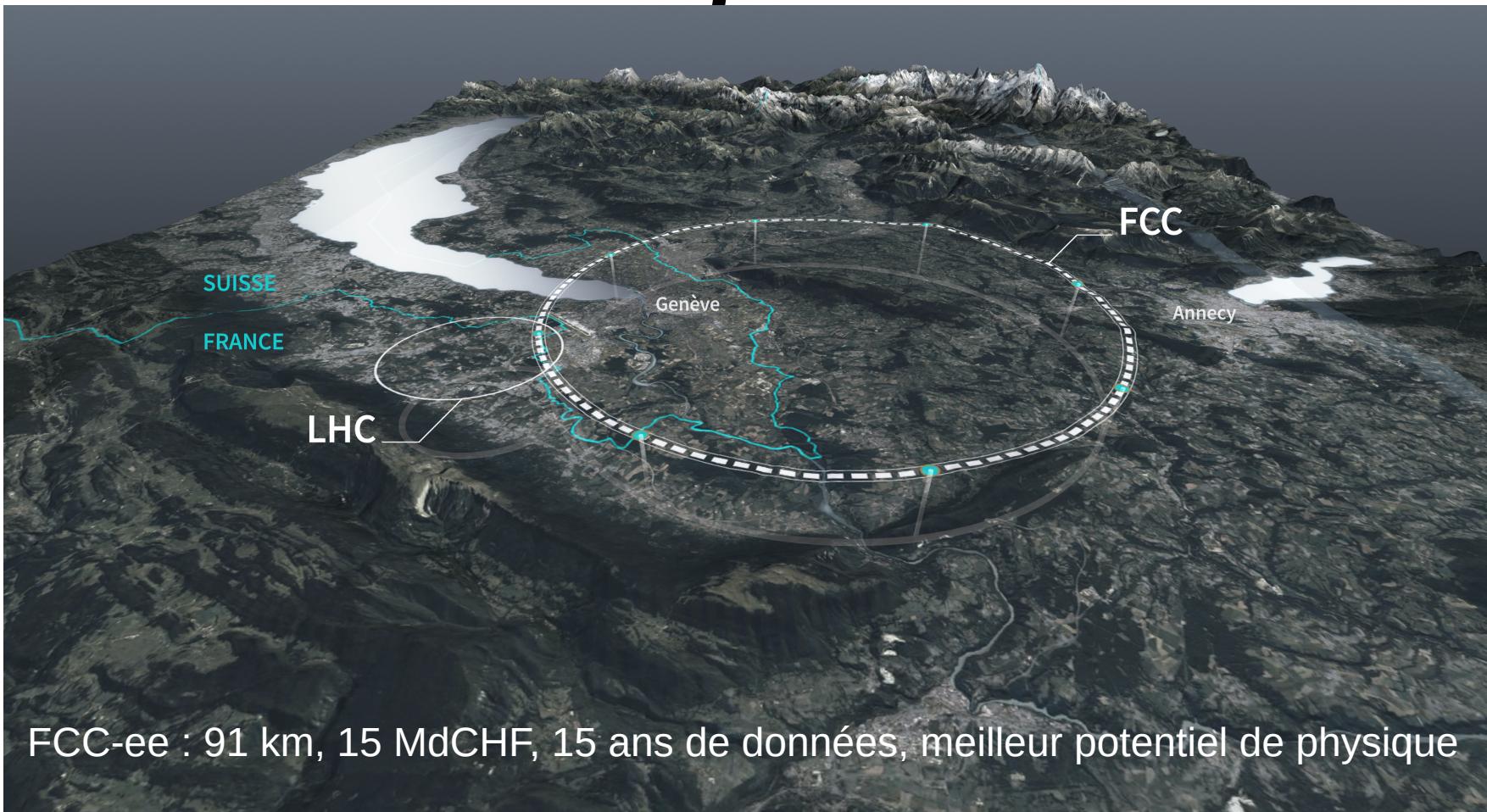
Frontière en énergie et en intensité



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



Frontière en énergie et en intensité



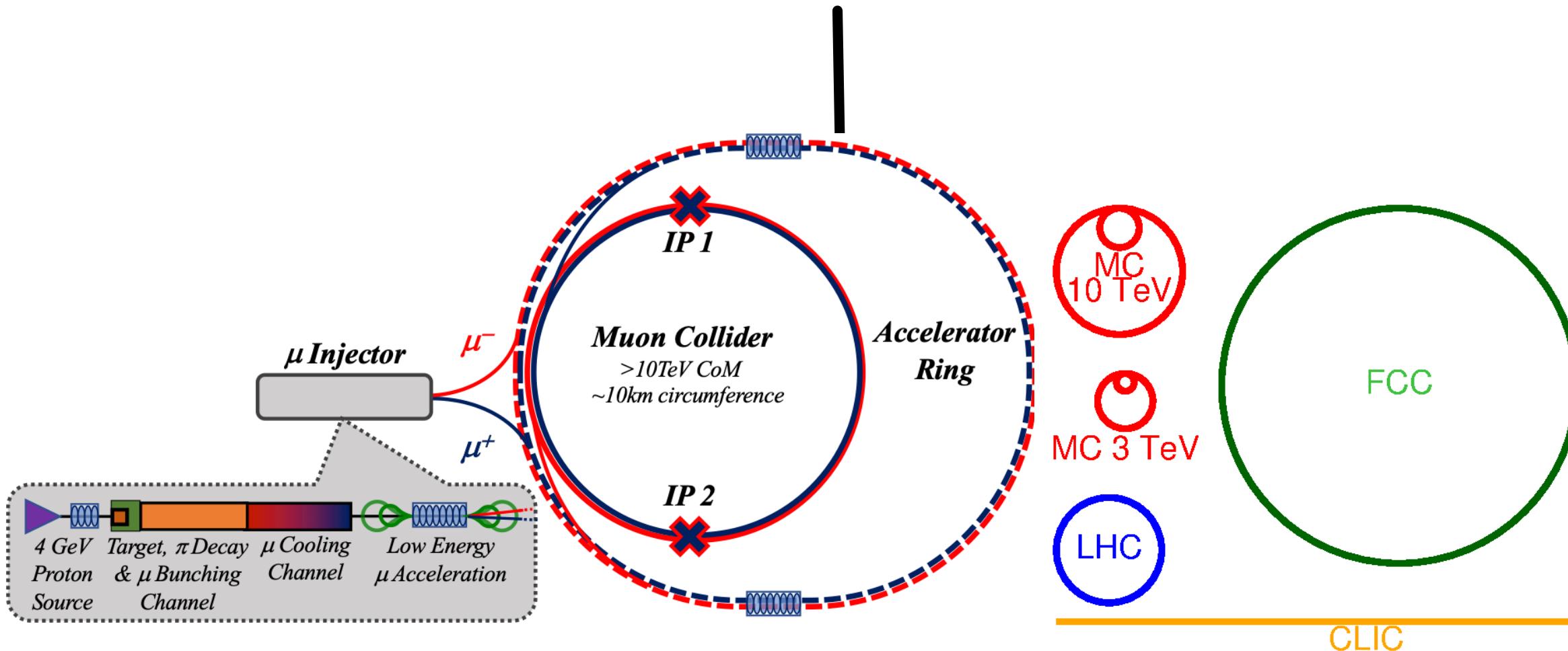
HOT OFF THE PRESS

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

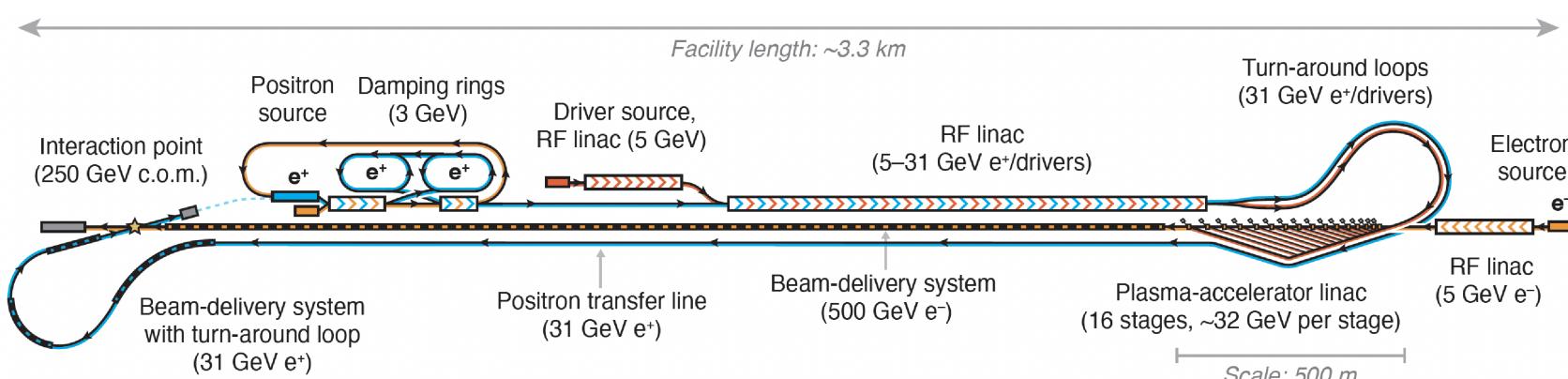
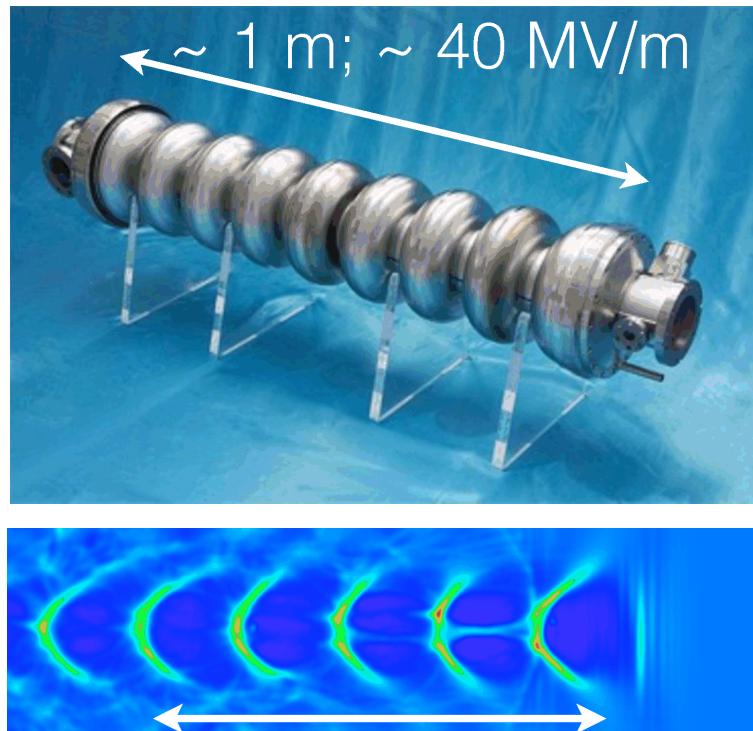
Frontière en énergie et en intensité





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



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



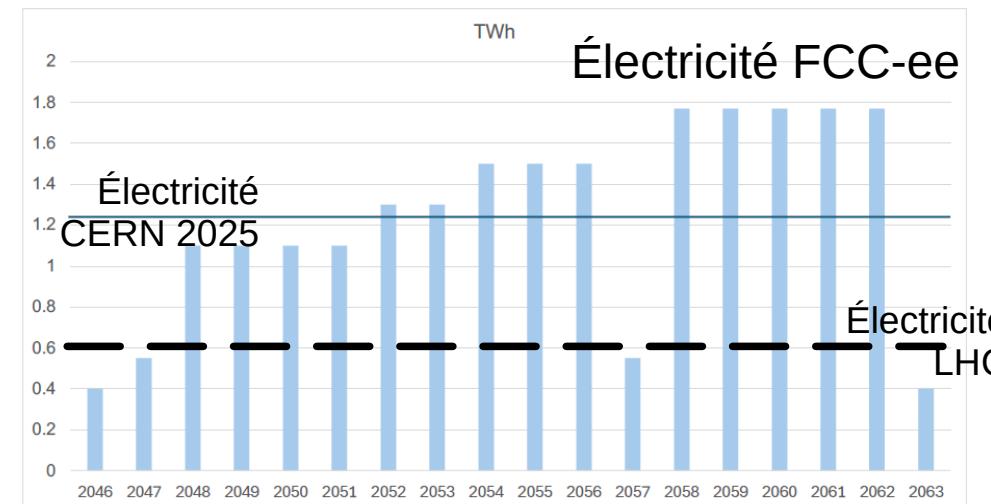
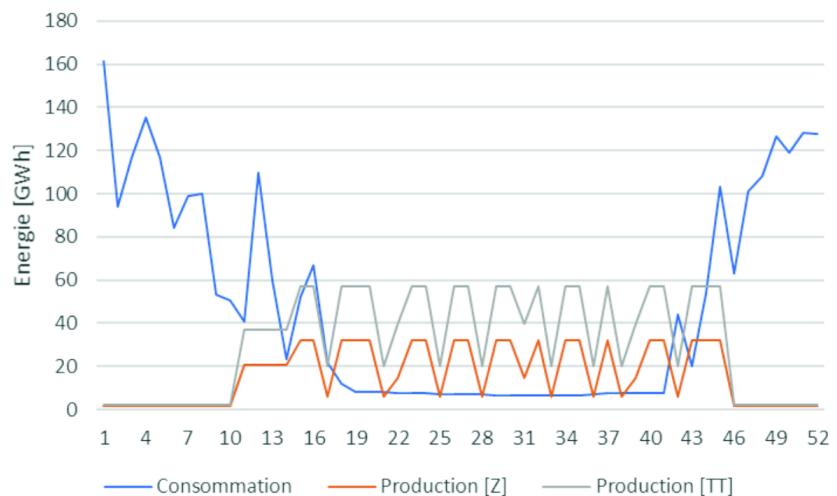
Durabilité des futures machines

- **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 sociaux 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

Labos 1^{point}5



- 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

Liberation

TRIBUNE 25/2/2025

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

LEXPRESS 1/3/2025

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

Liberation

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

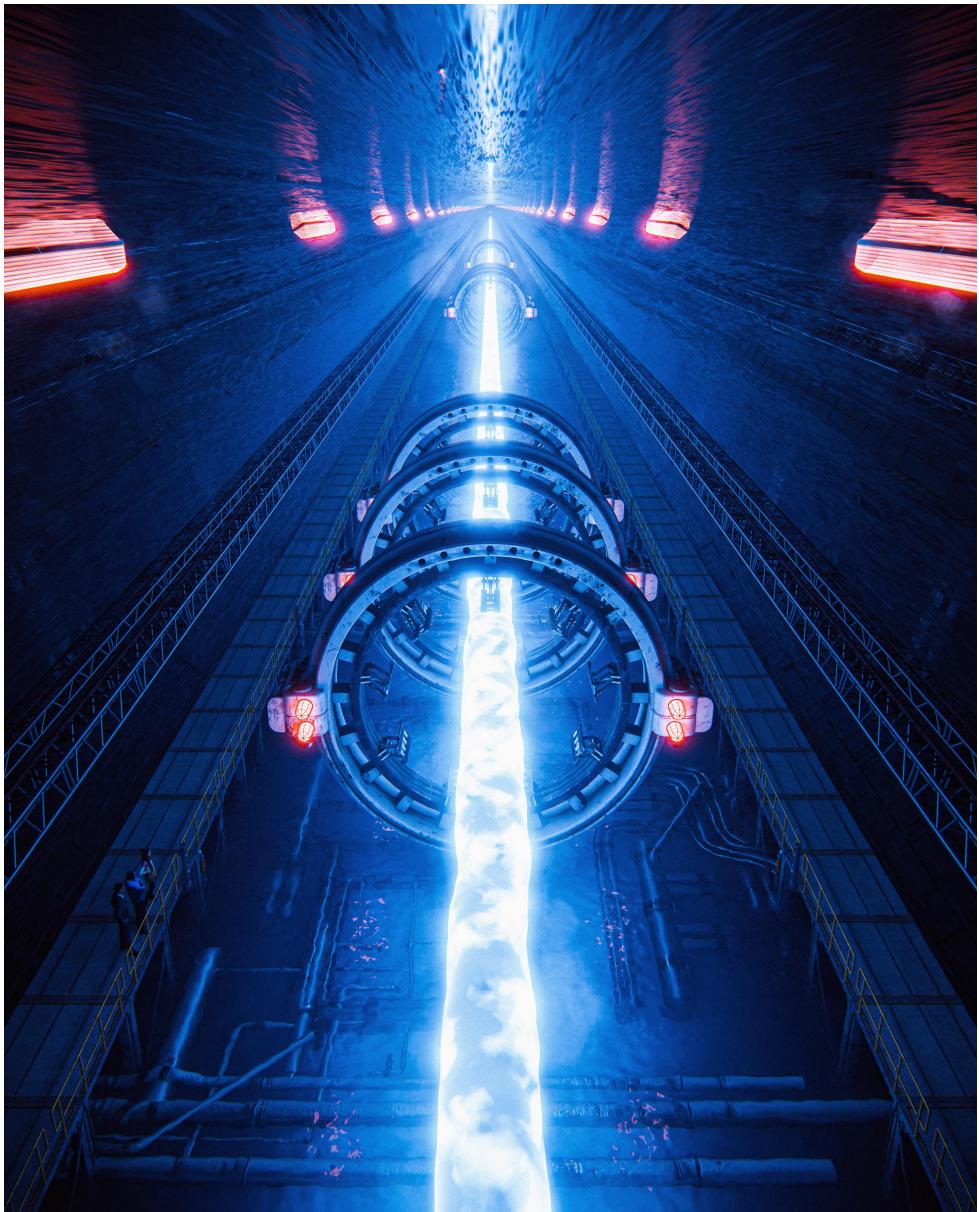
NEWS FEATURE | 19 March 2025 | Correction [19 March 2025](#)

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 ?

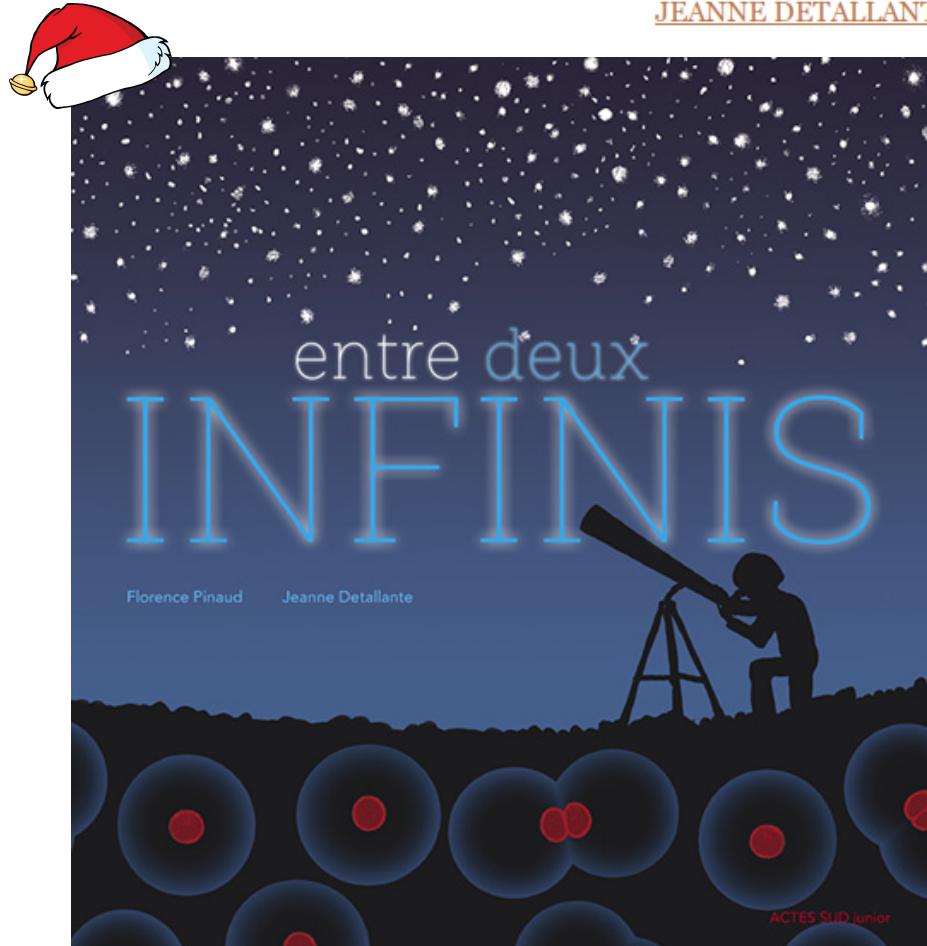




Livre à partir de 10 ans

Entre deux infinis

FLORENCE PINAUD
JEANNE DETALLANTE - ILLUSTREUR



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>