

Quel futur pour la physique sur accélérateur de particules ?

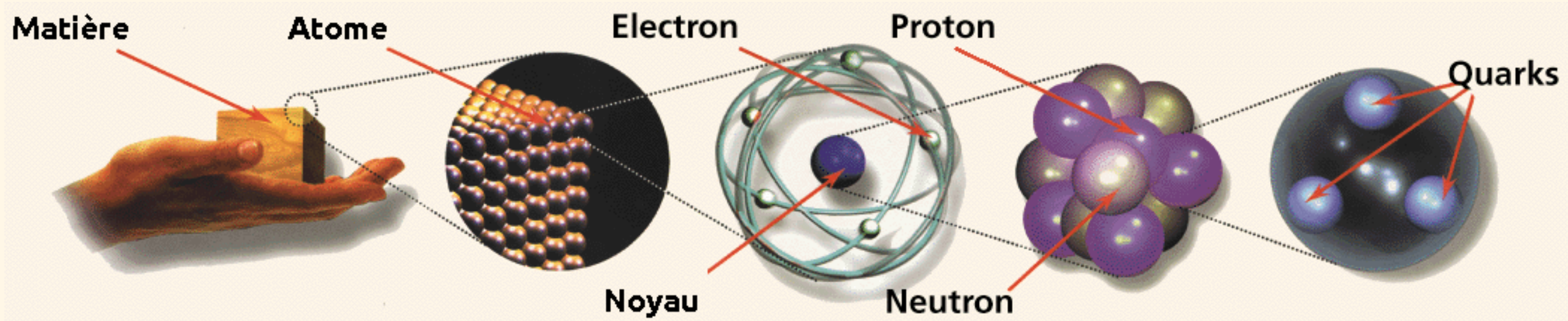
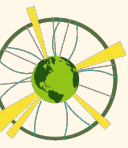
Yann Coadou

CPPM Marseille

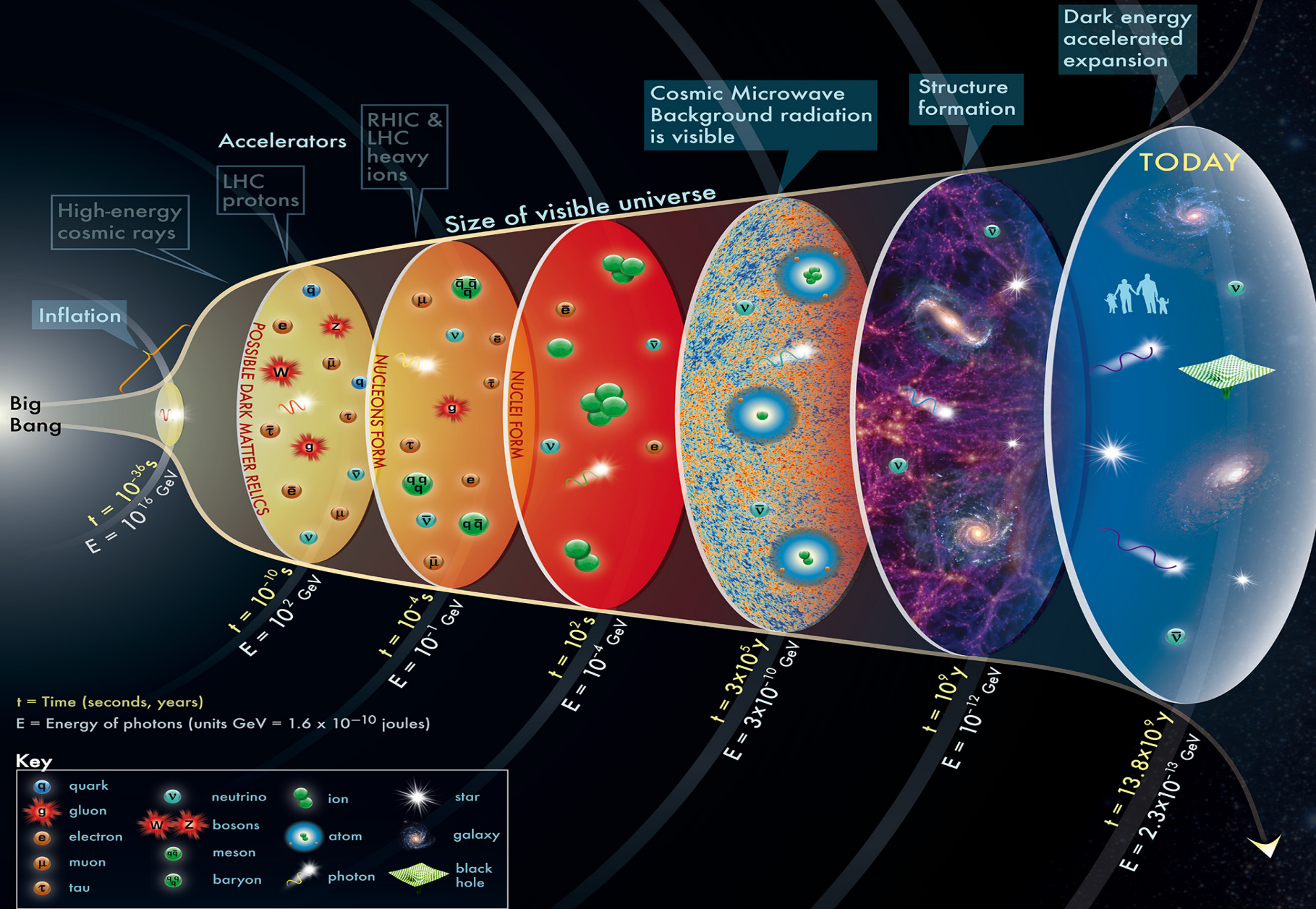
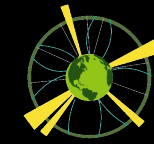
Cycle de conférences du CPPM

Luminy, 5 avril 2025





HISTORY OF THE UNIVERSE



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

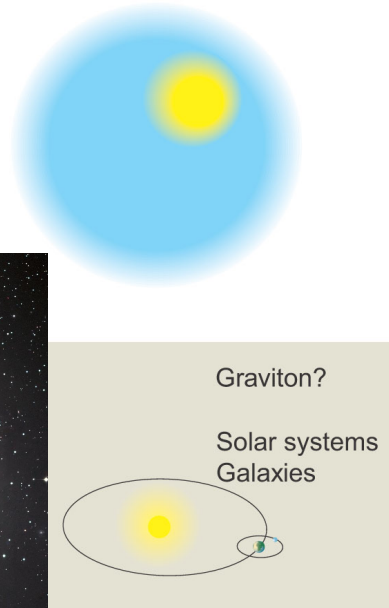
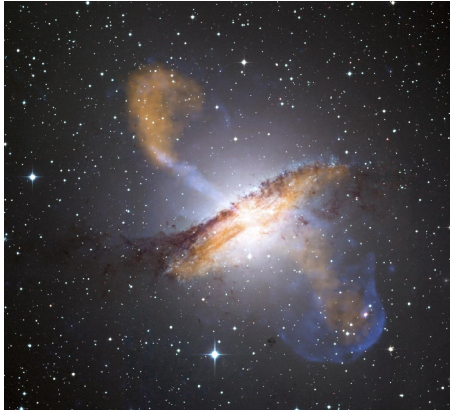
Particle Data Group, LBNL © 2015

Supported by DOE

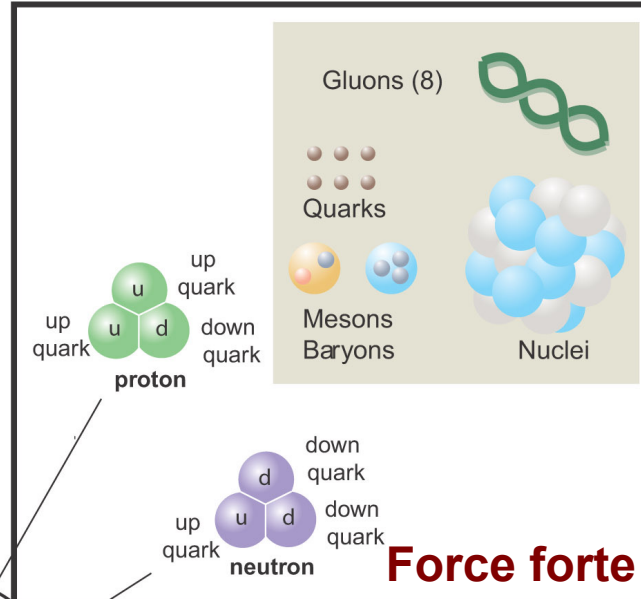
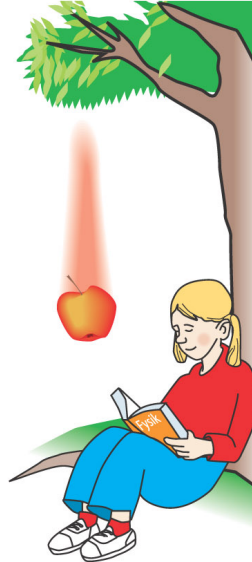
Les forces



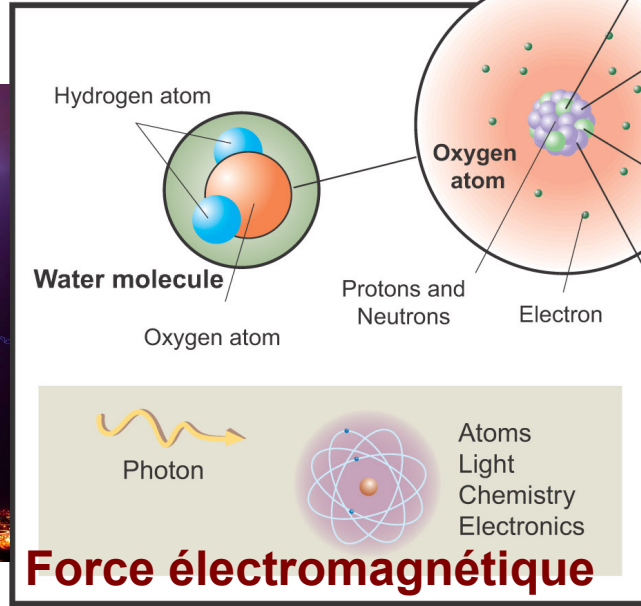
Illustration: Typoform



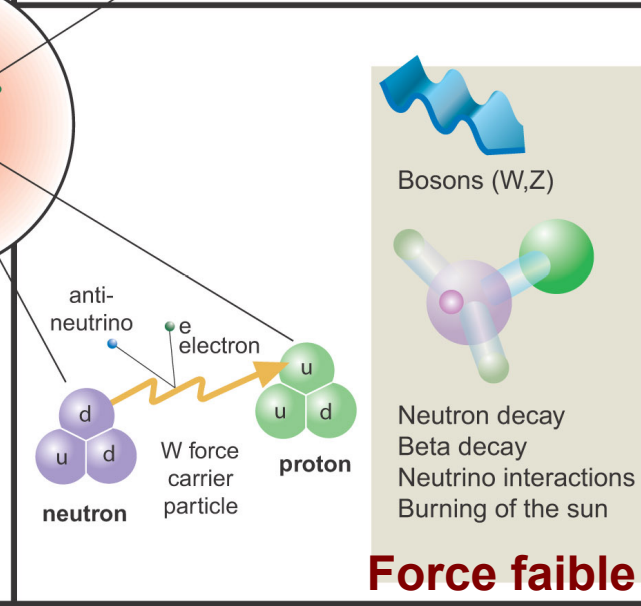
Force gravitationnelle



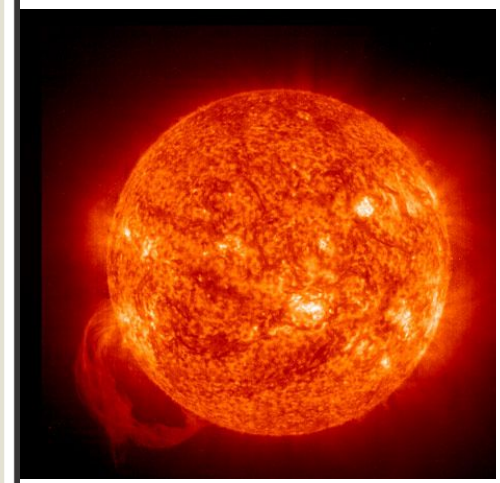
Force forte



Force électromagnétique

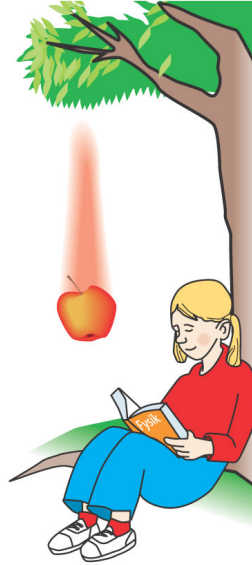
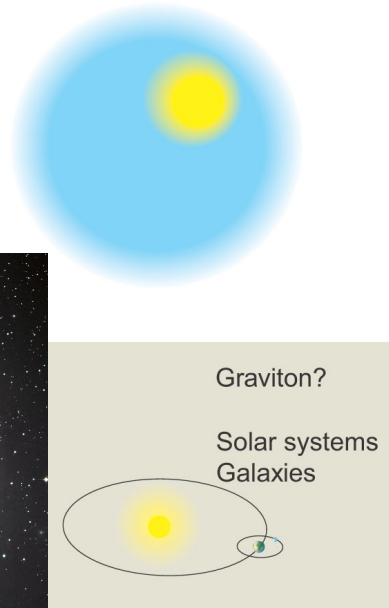
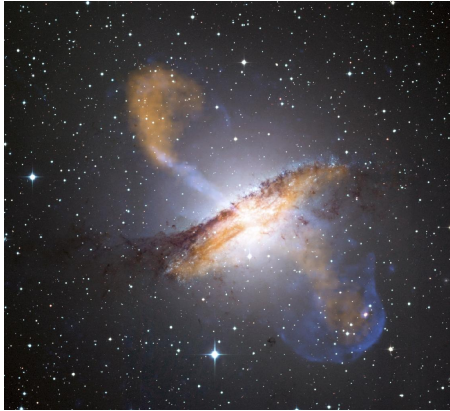
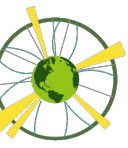


Force faible

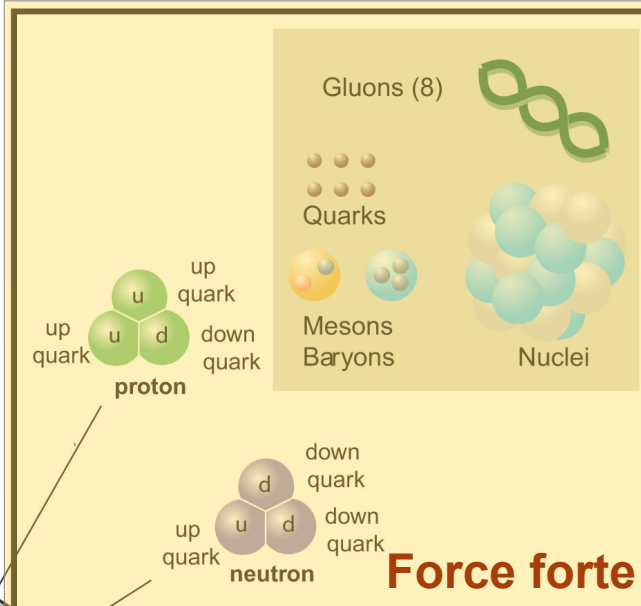


Les forces

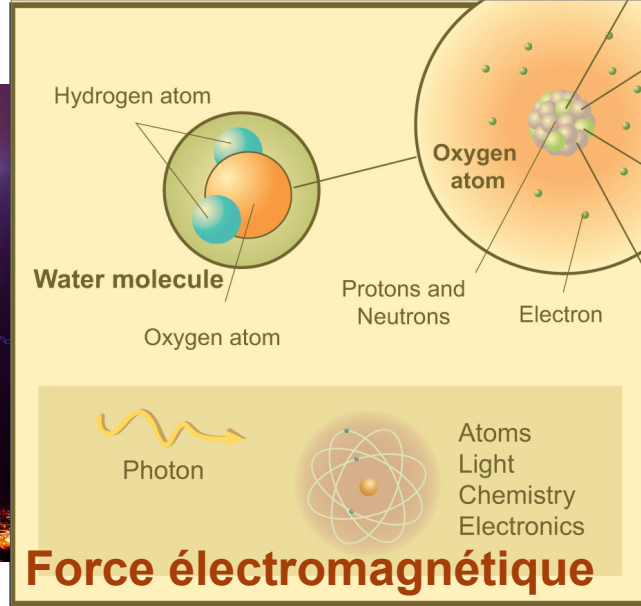
Illustration: Typoform



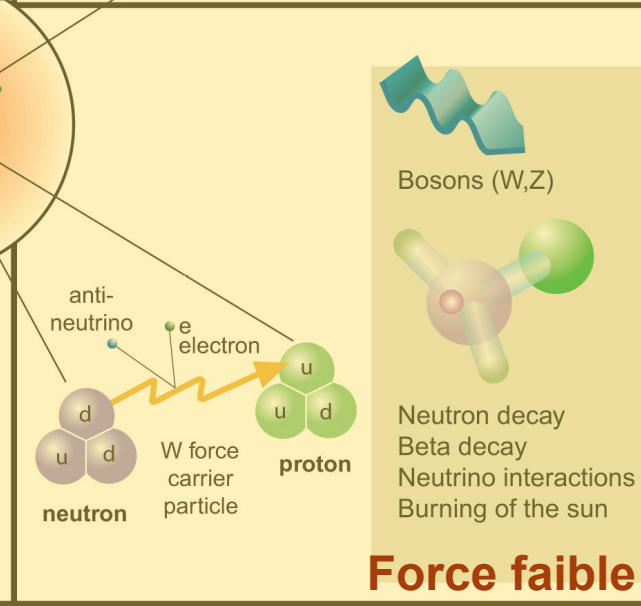
Force gravitationnelle



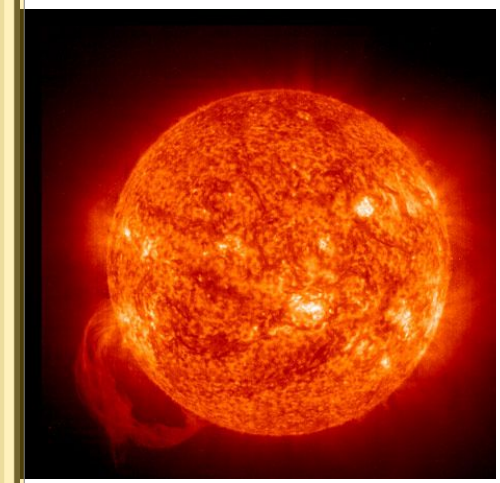
Force forte



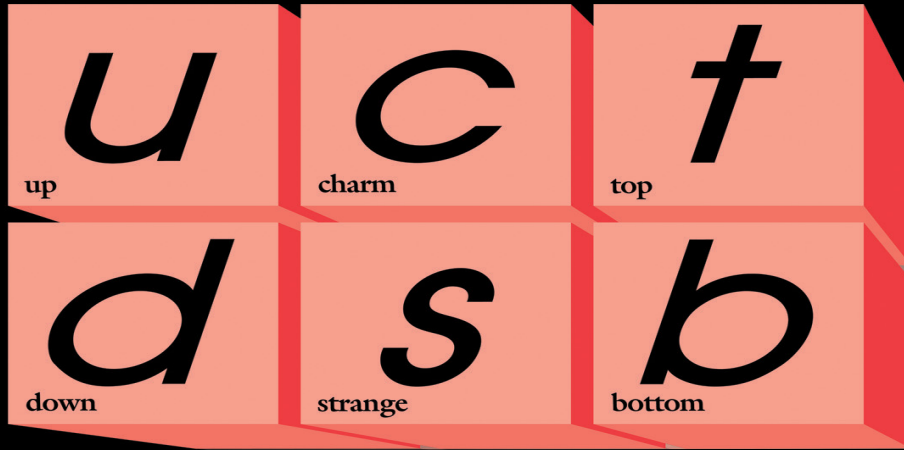
Force électromagnétique



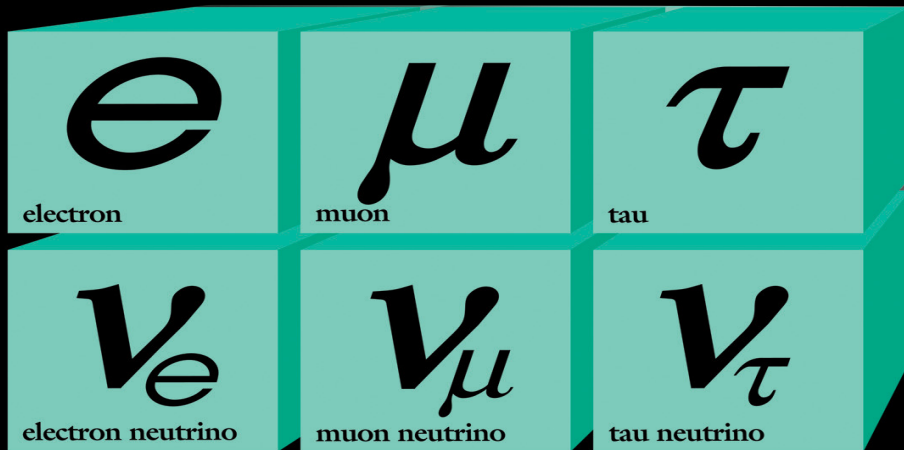
Force faible



Quarks



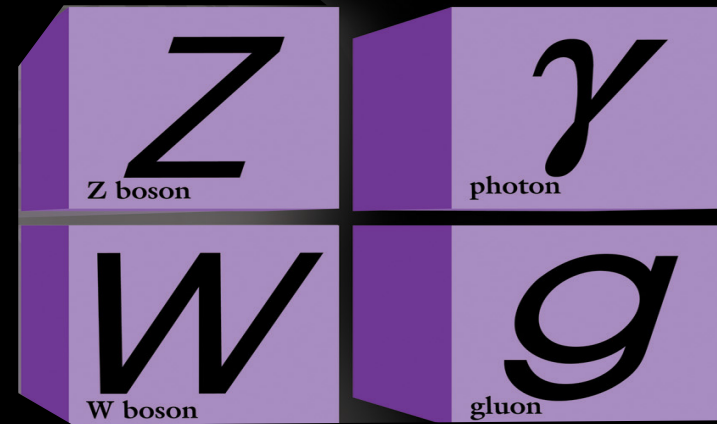
+ anti-matière



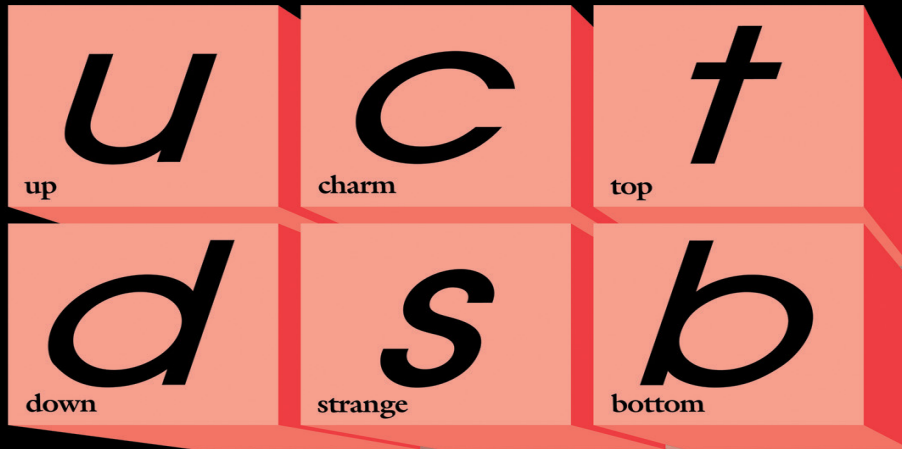
Leptons

Le modèle standard
de la physique des particules

Forces



Quarks



+ anti-matière

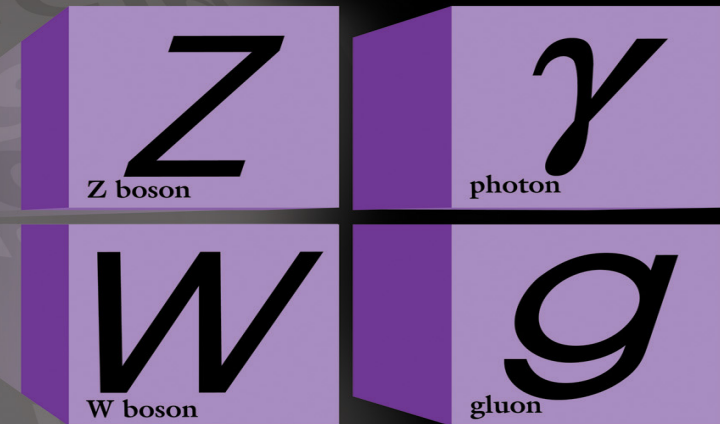


Leptons

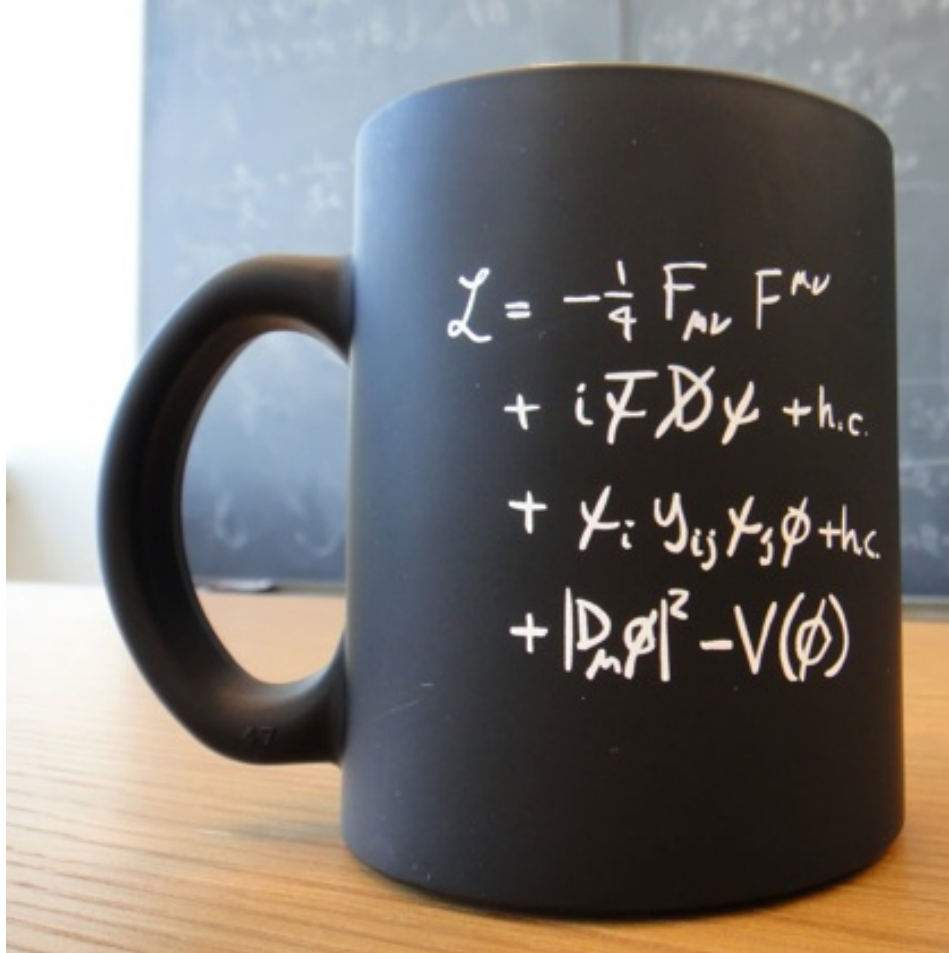
Le modèle standard
de la physique des particules



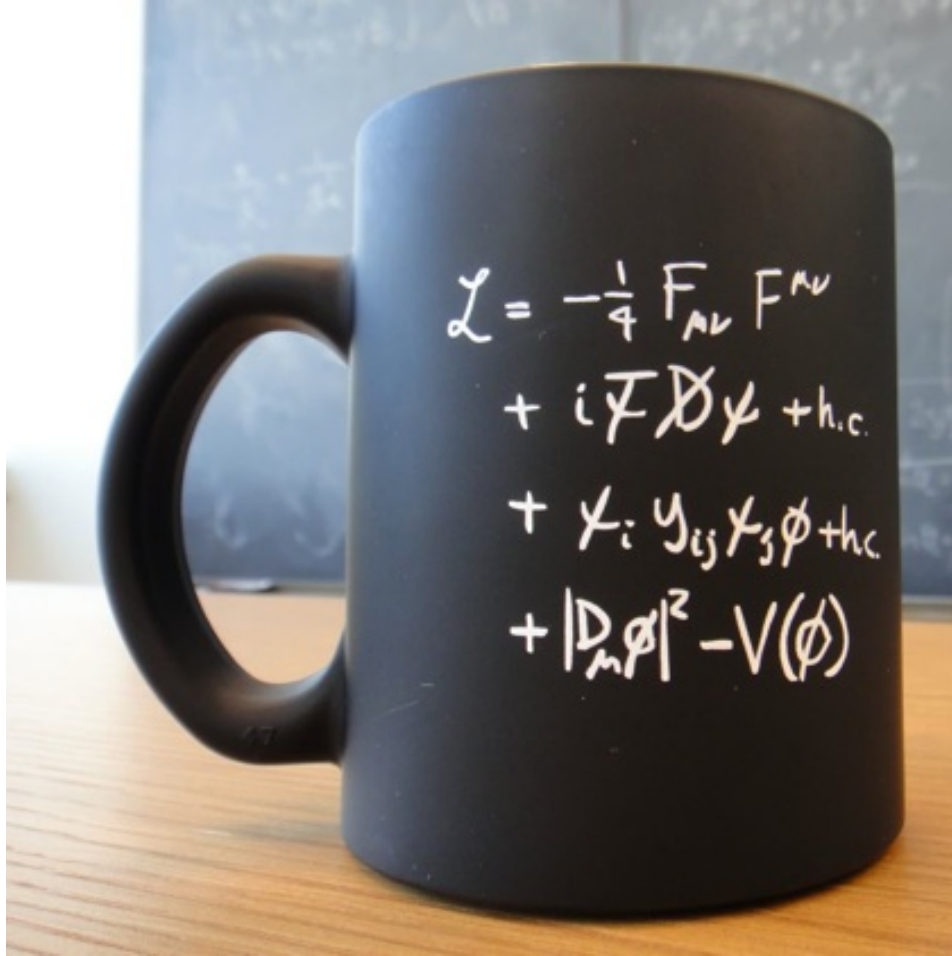
Forces



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^\nu) g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu G^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{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_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + \\
 & g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 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_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_{s_w} A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{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_\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_\lambda^c (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & m_\lambda^c (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^c (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_\lambda^c (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\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) - \\
 & \frac{ig}{2} \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}{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^0) + ig_{s_w} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^0) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ \mathbf{H} + \bar{X}^- X^- \mathbf{H} + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 \mathbf{H}] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^- + \bar{X}^- X^0 \phi^+] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

© T.D Gutierrez

Sources de particules



Sources de particules

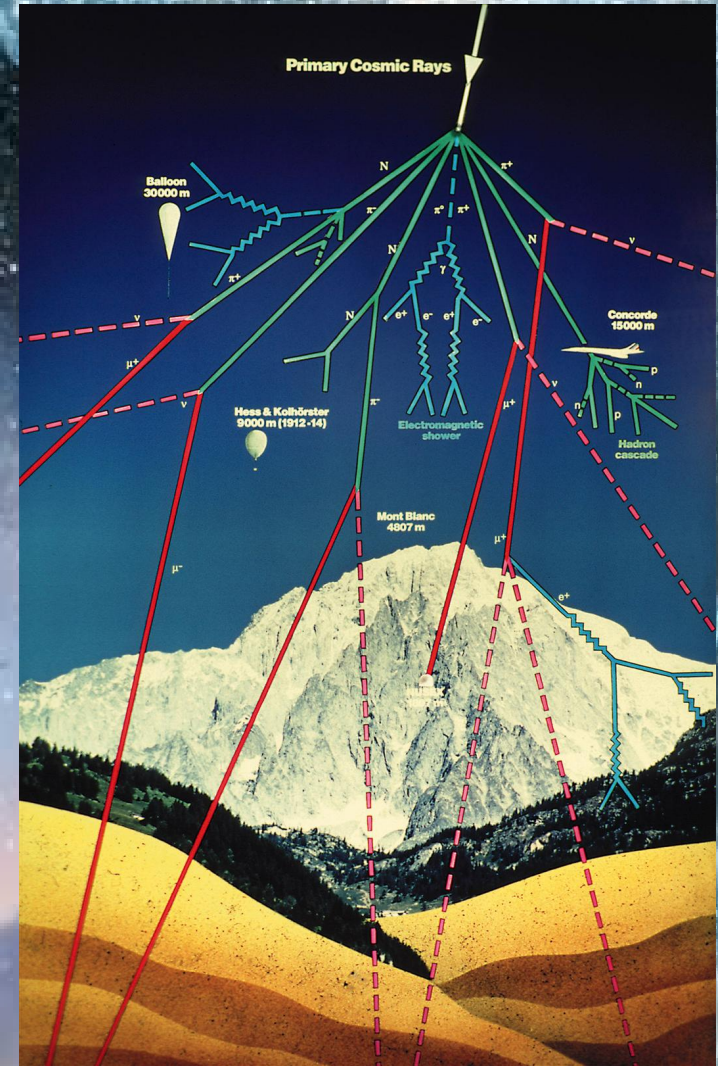
L'Univers et les rayons cosmiques

(protons, photons, neutrinos, muons)



Sources de particules

L'Univers et les rayons cosmiques



Sources de particules

L'Univers et les rayons cosmiques

(protons, photons, neutrinos, muons)

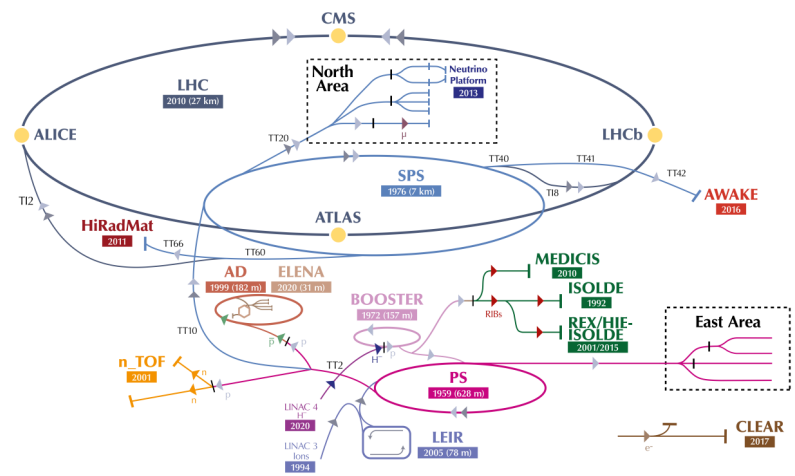
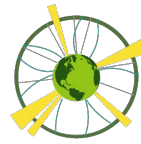
Les accélérateurs de particules
(protons, photons, électrons, muons, pions, kaons, etc)



YEARS / ANS CERN
1954-2024



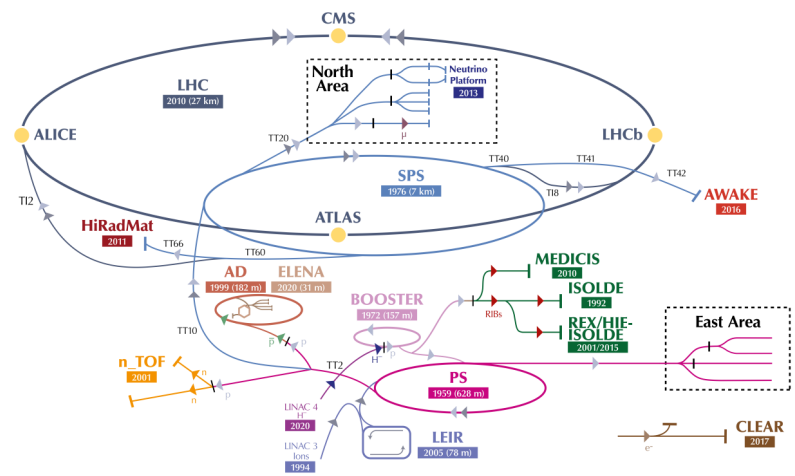
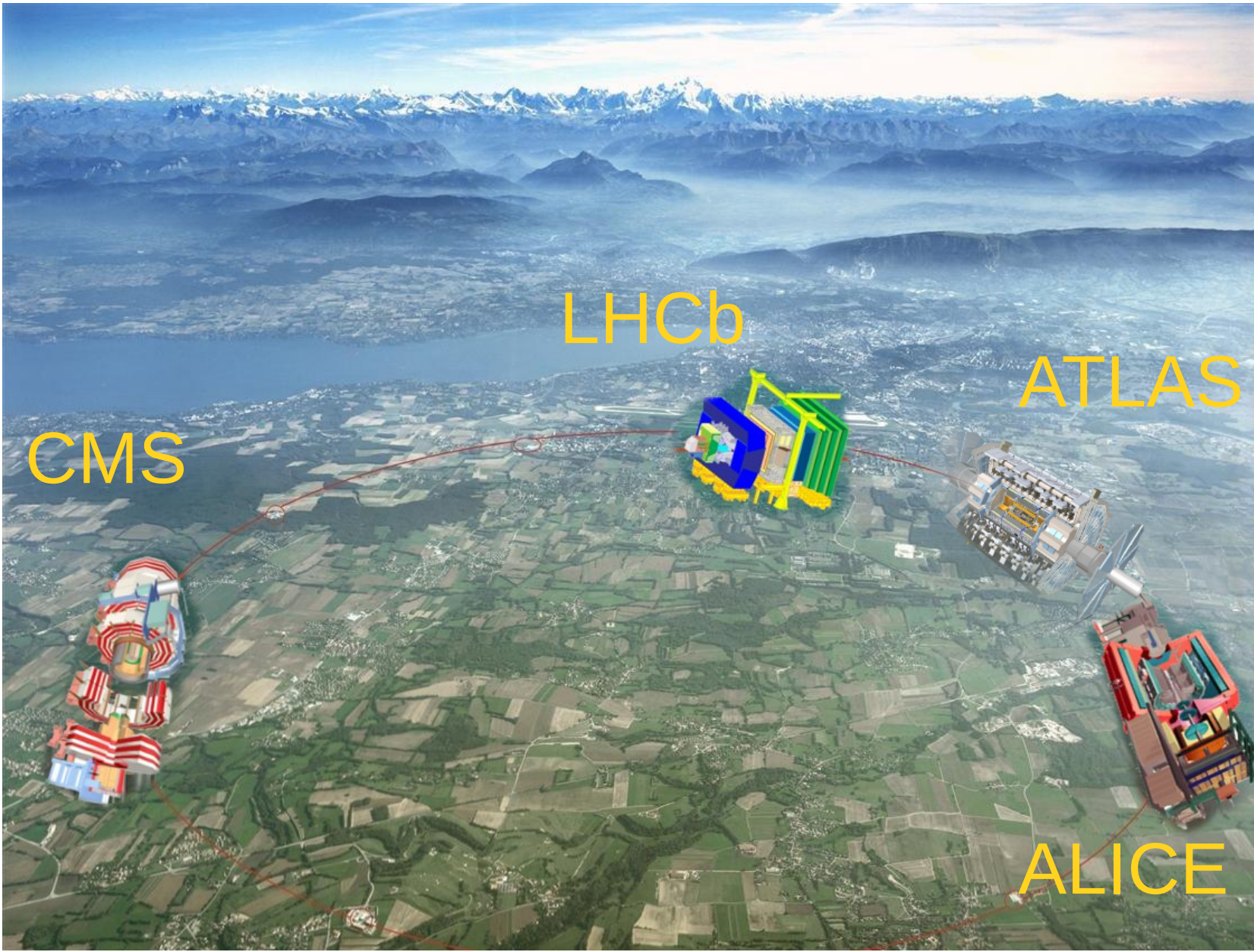
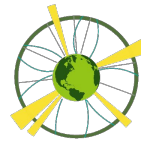
Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



▶ 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

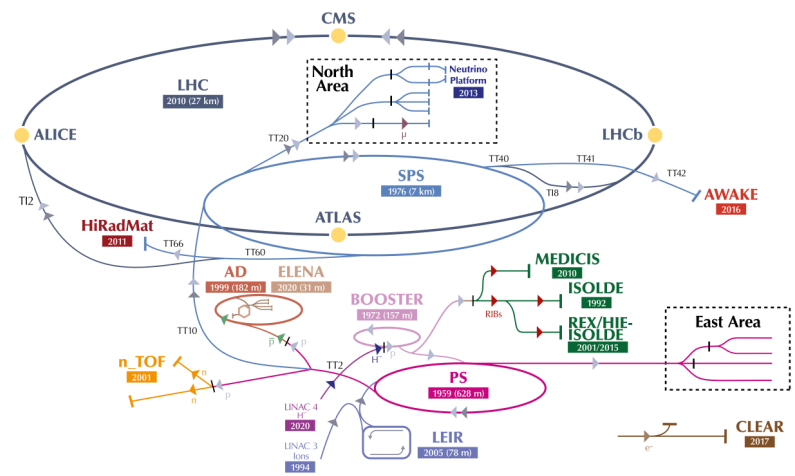
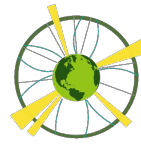
Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



▶ 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

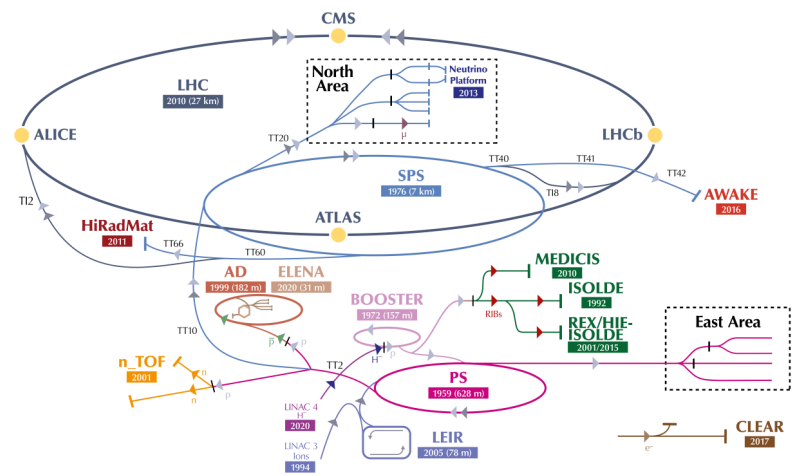
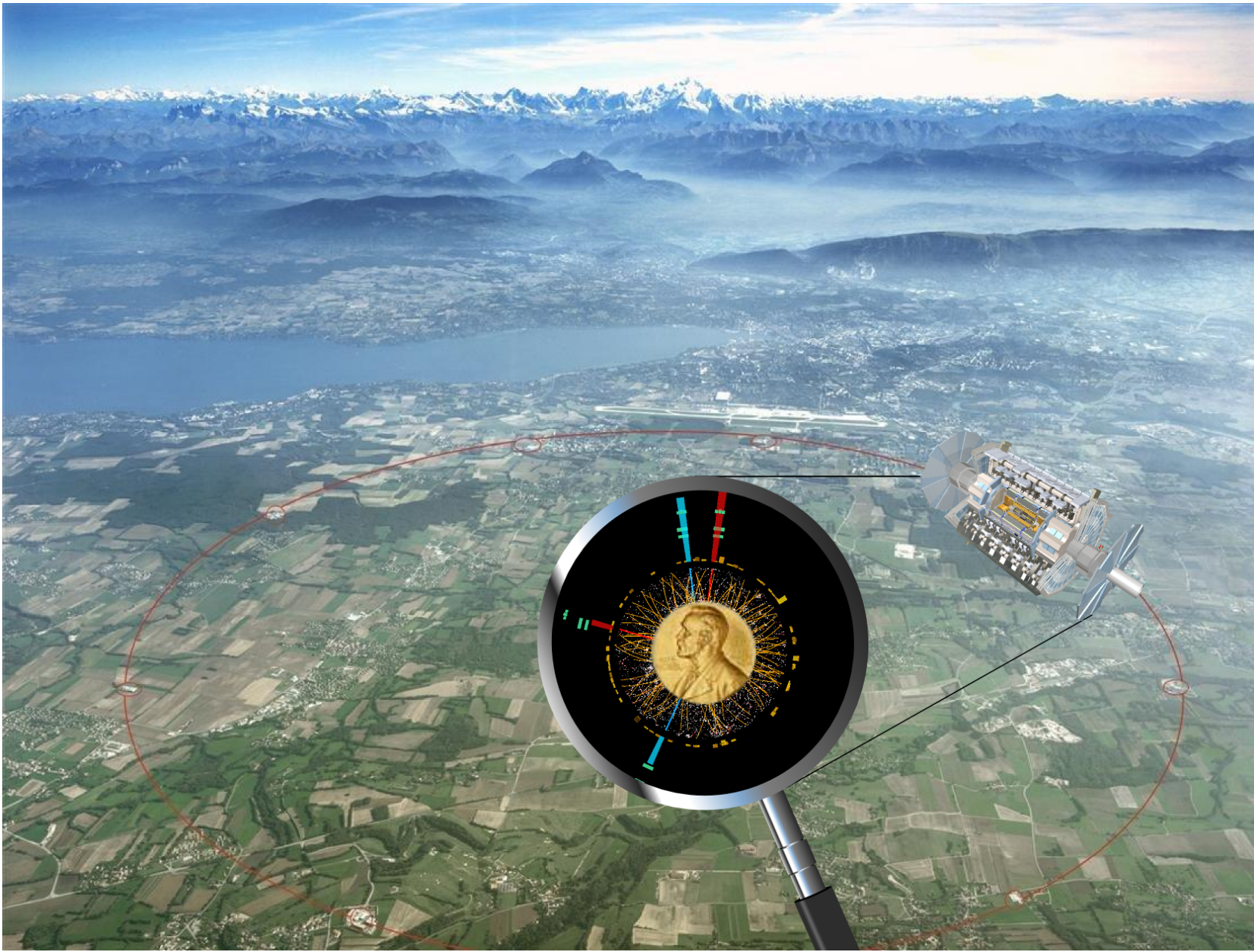
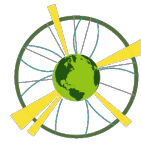
Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



▶ 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

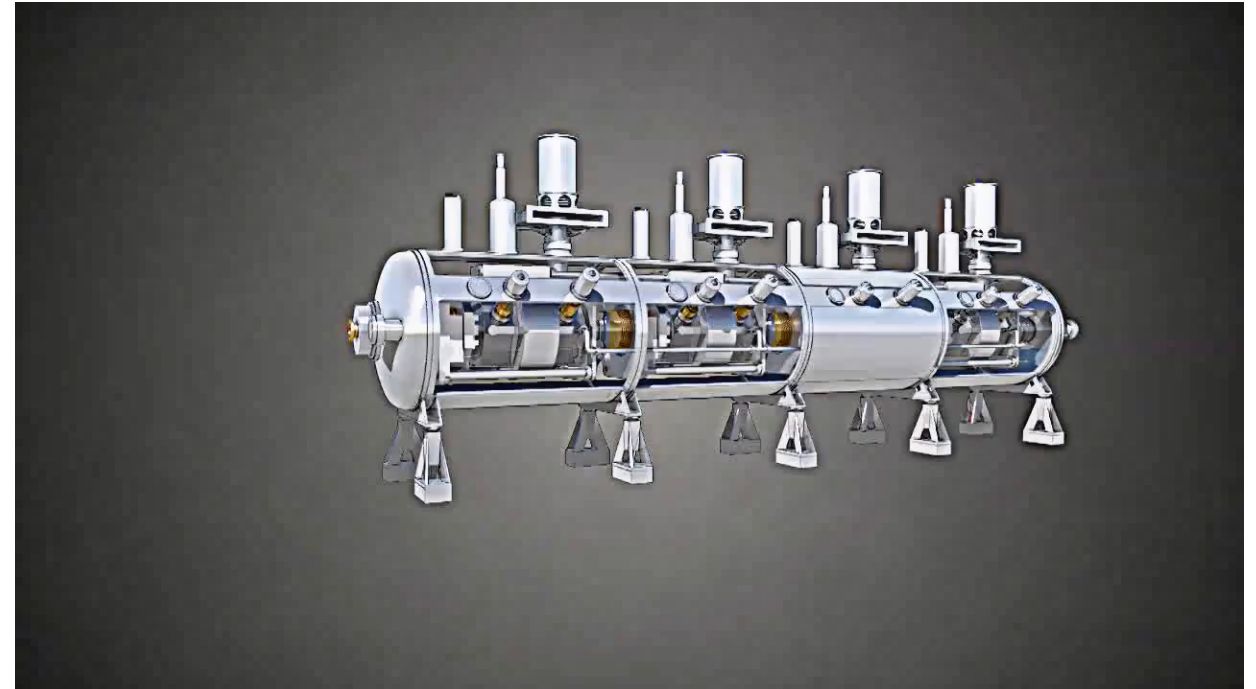
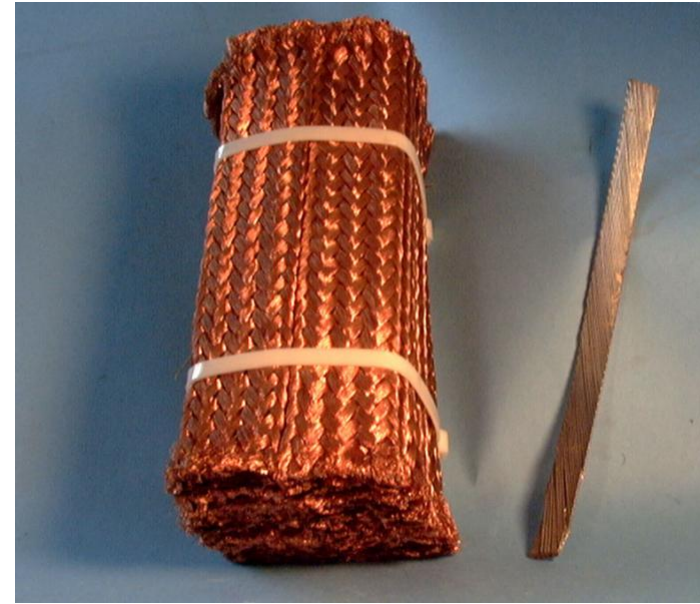
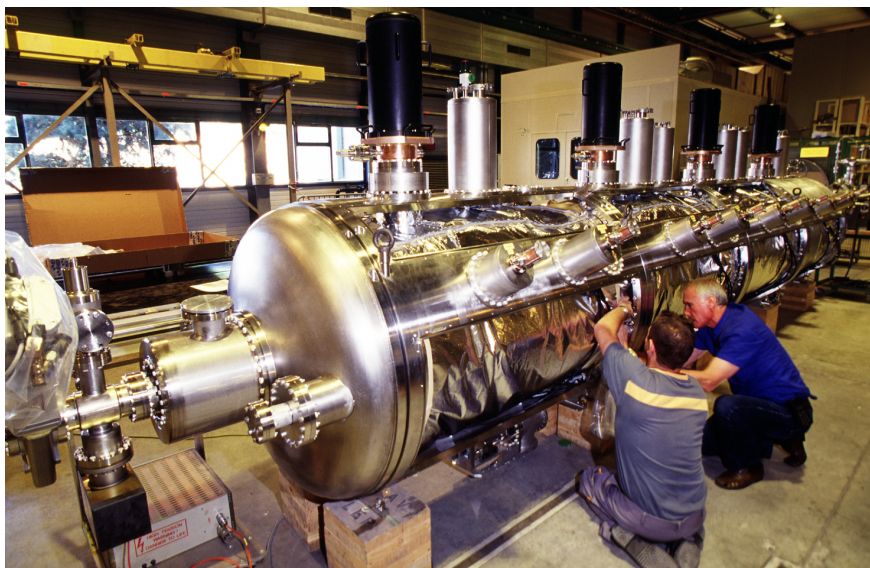
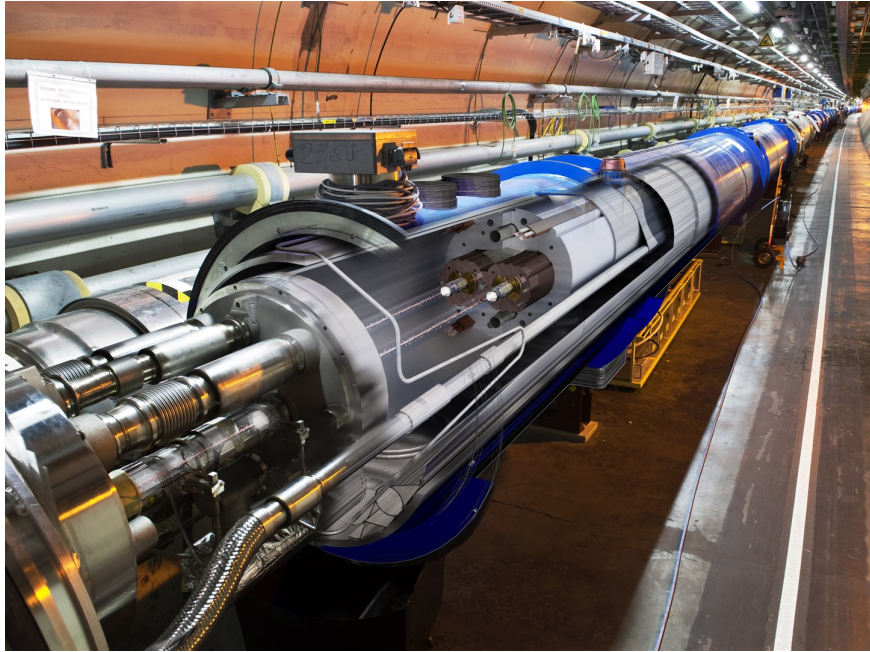
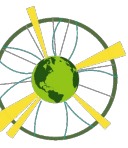
Le LHC (grand collisionneur de hadrons)



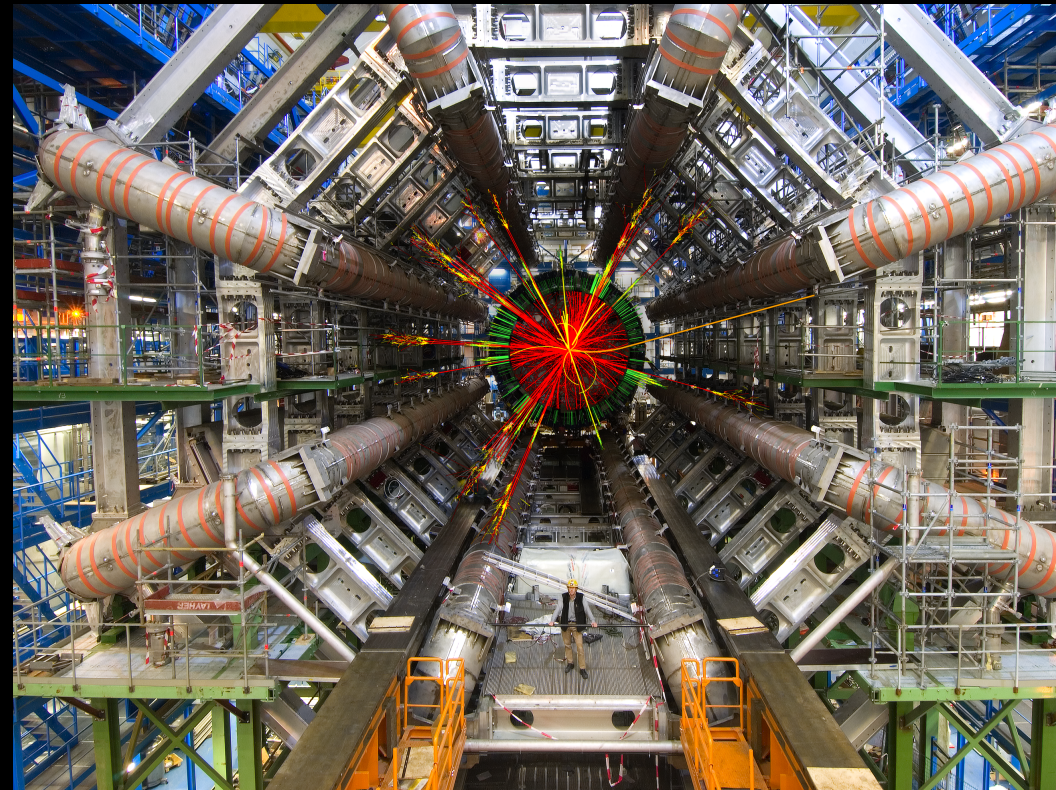
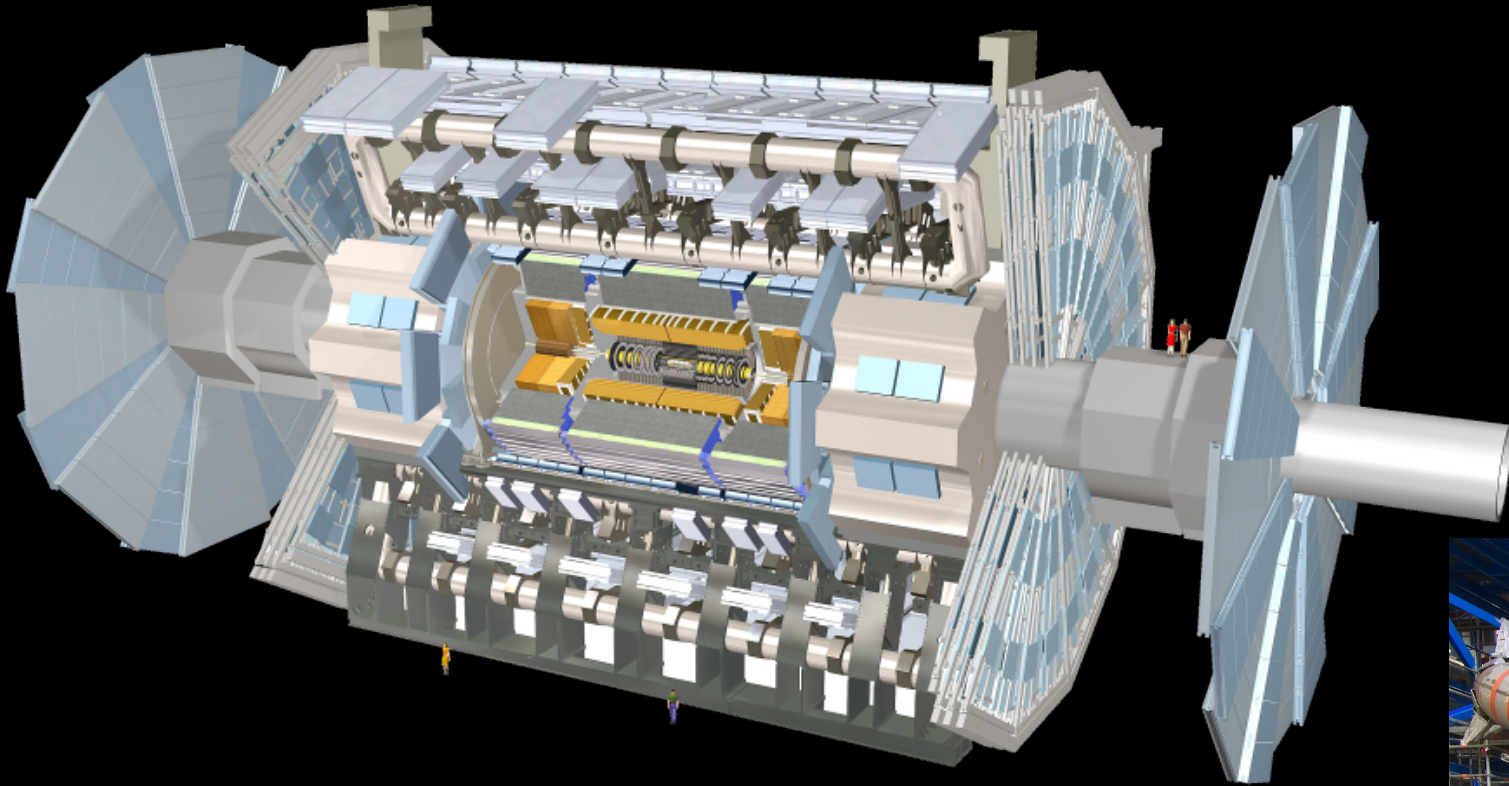
▶ H⁻ (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶ \bar{p} (antiprotons) ▶ e⁻ (electrons) ▶ μ (muons)

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

Aimants et cavités accélératrices



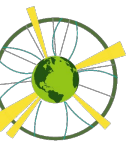
© CERN



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
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)

35 ans d'exploitation

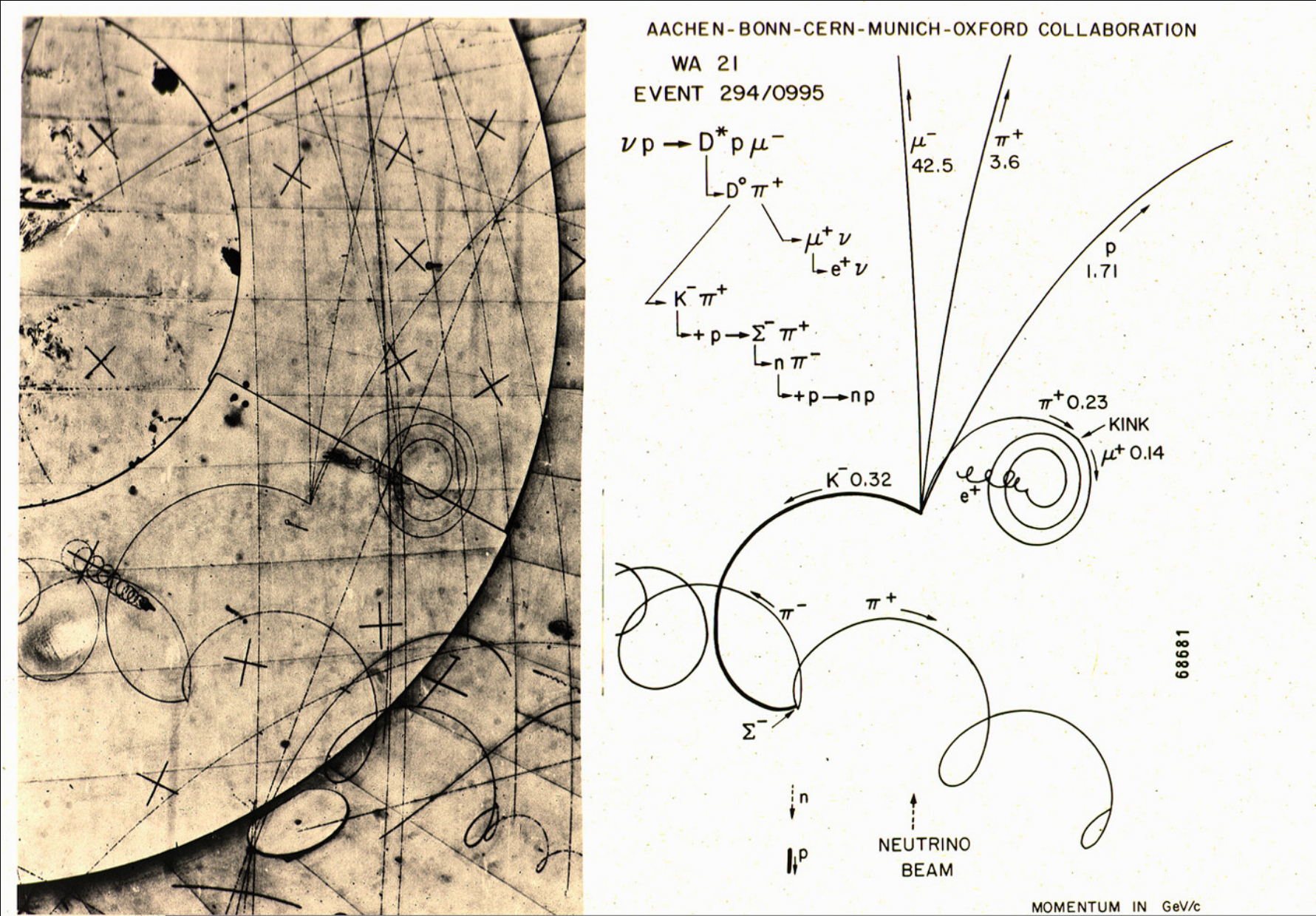


Accélérateur de science

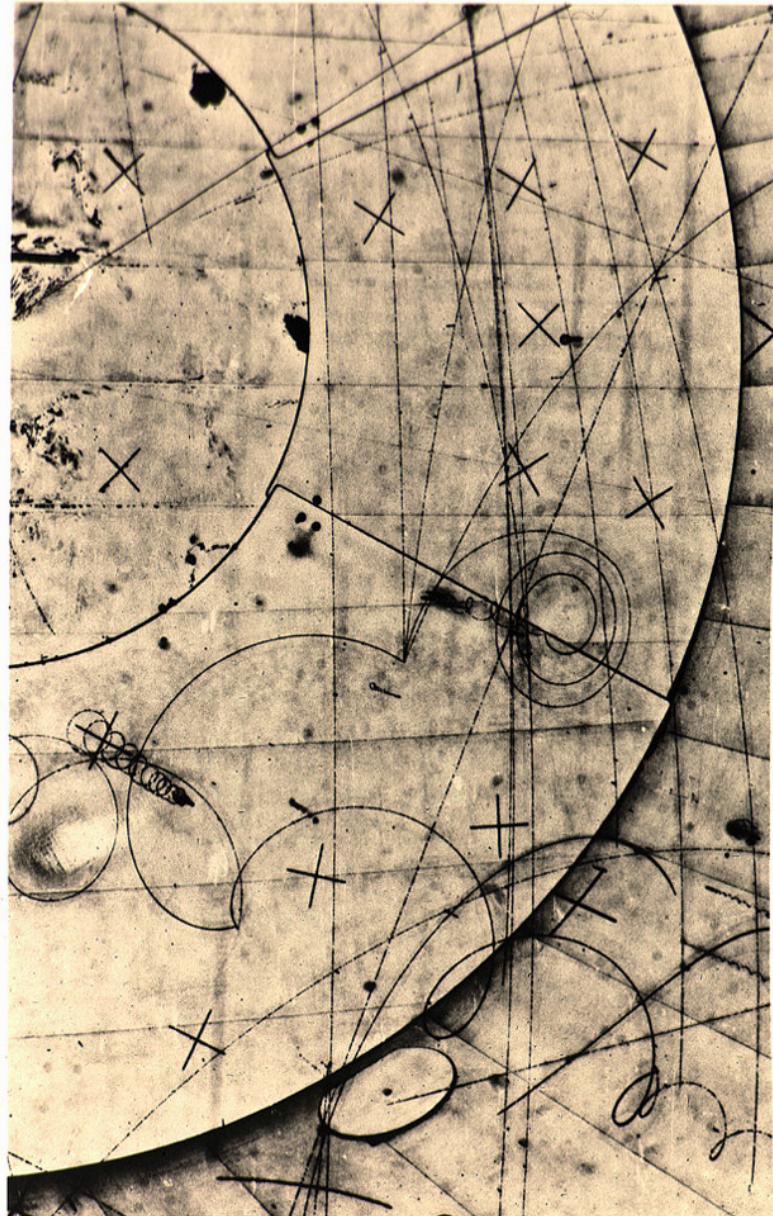
Anciennes photographies



Anciennes photographies



Anciennes photographies



AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION

EVE
 νp



$\mu^+ 0.14$
 $\nu 0.32$



68681

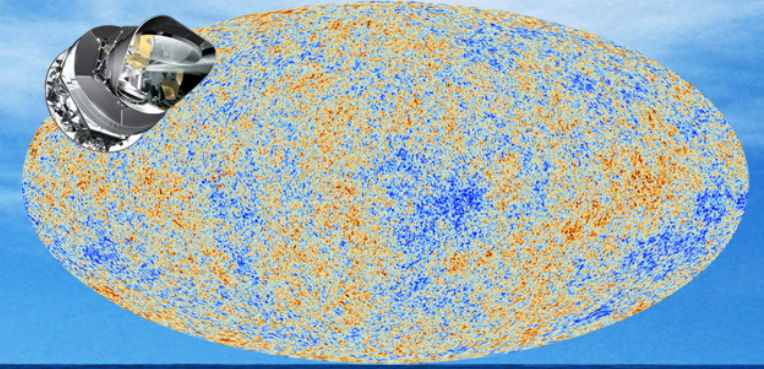
H^p BEAM

MOMENTUM IN GeV/c



A photograph of a large white iceberg floating in a deep blue ocean under a clear blue sky with light clouds. The iceberg is the central focus, with its jagged peaks and smaller icebergs visible. The water is dark blue, and the sky is a lighter blue with wispy clouds.

Ce que l'on connaît (5%)



Ce que l'on connaît (5%)

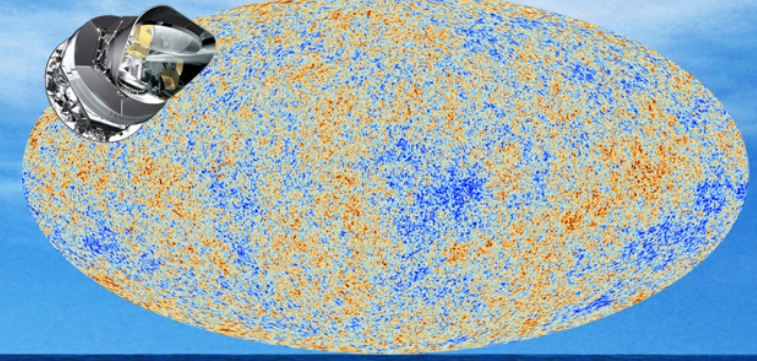
27% Matière noire

68% Énergie noire

Reste à découvrir !



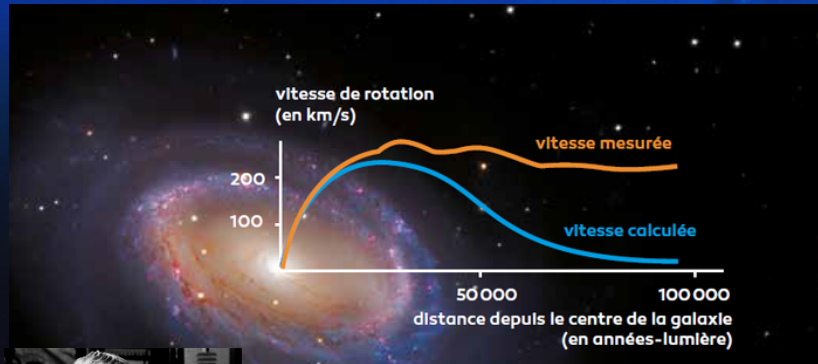
© Render by Jonathan Rey



Ce que l'on connaît (5%)

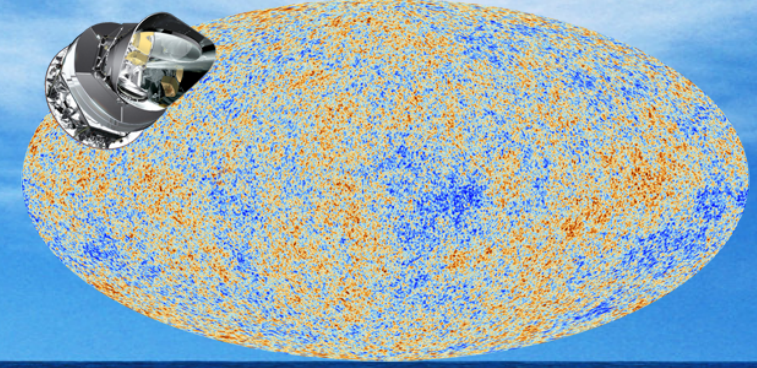
27% Matière noire

- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC ou dans un futur collisionneur ?



Vera Rubin

68% Énergie noire

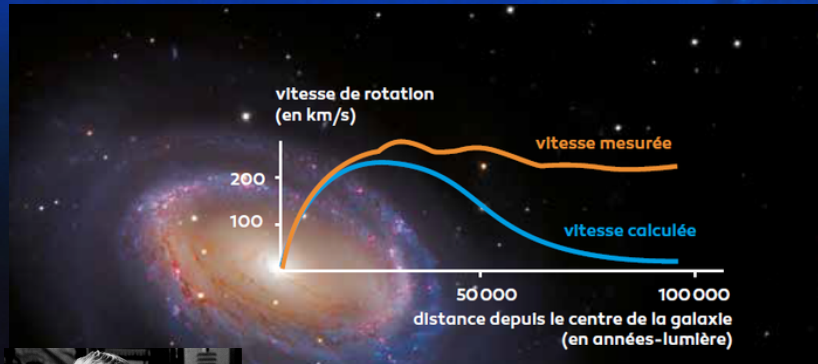


Ce que l'on connaît (5%)

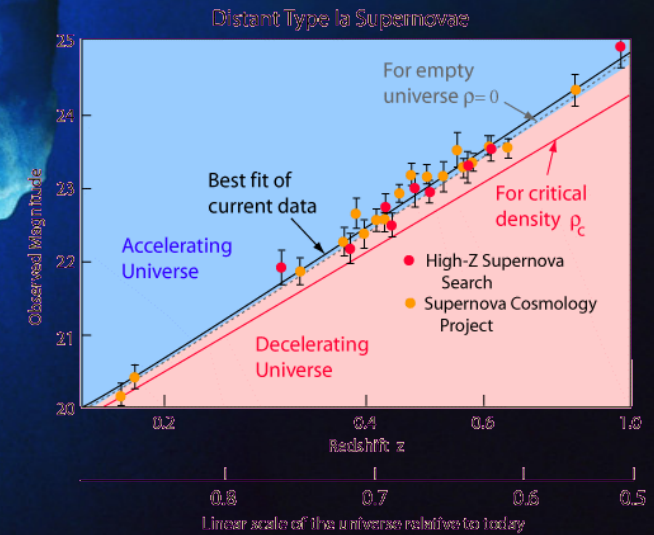
27% Matière noire

68% Énergie noire

- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC ou dans un futur collisionneur ?



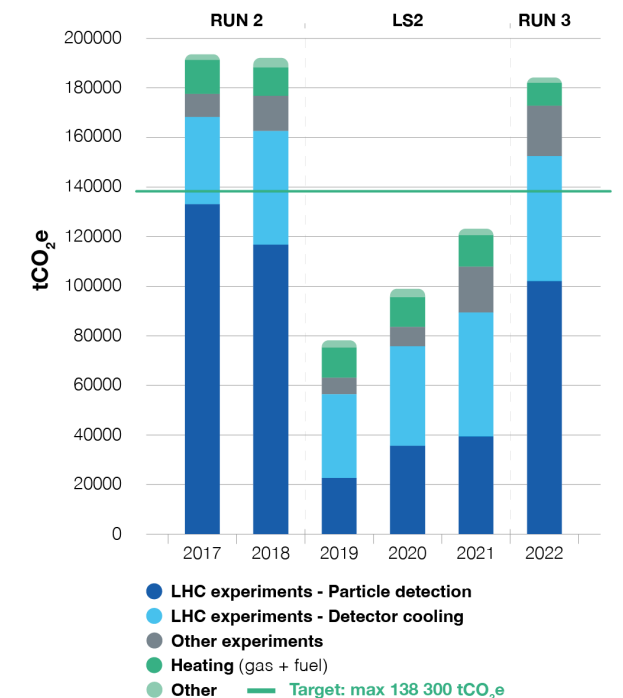
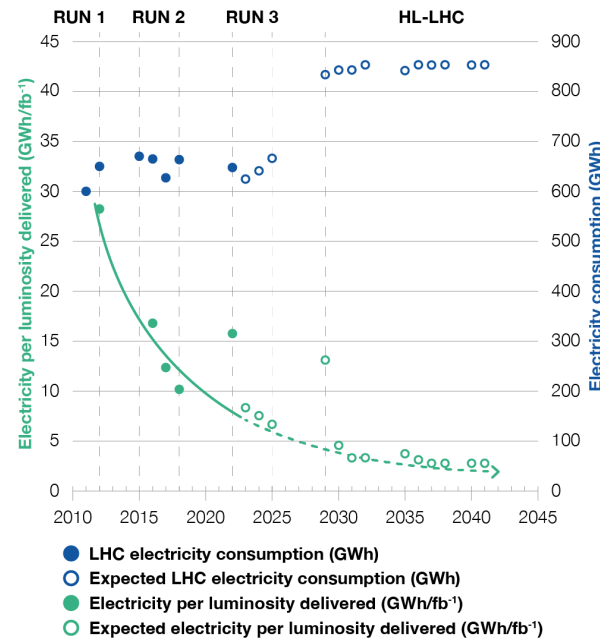
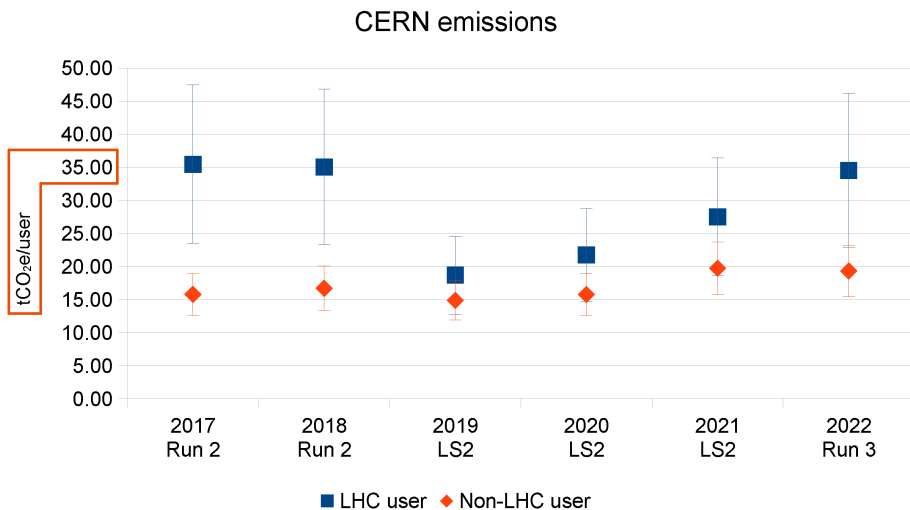
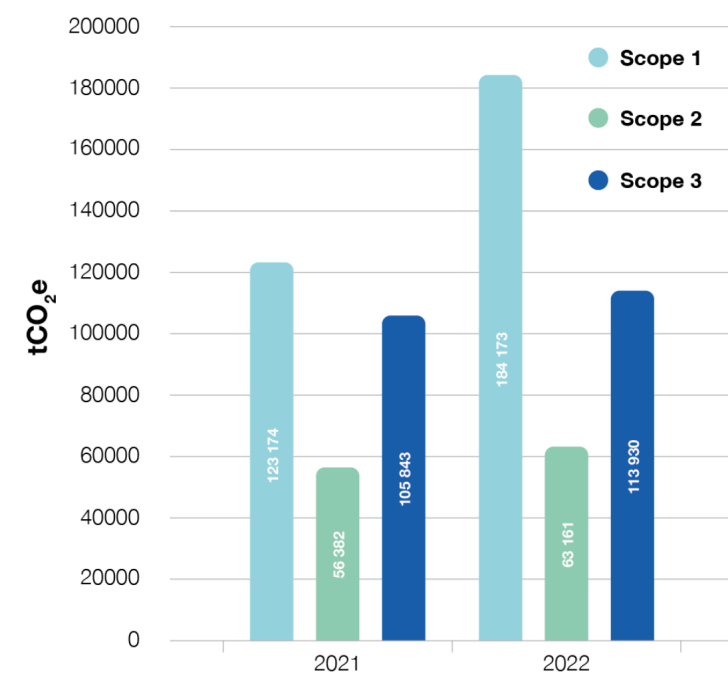
Vera Rubin



Pas la moindre idée de son origine !

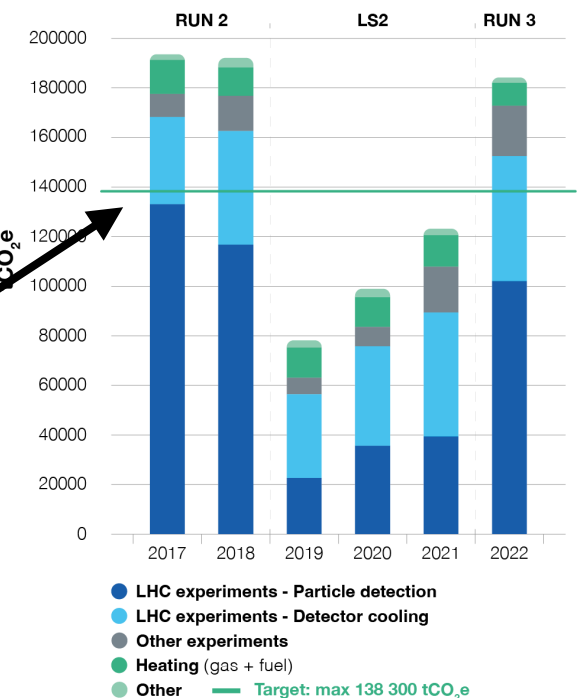
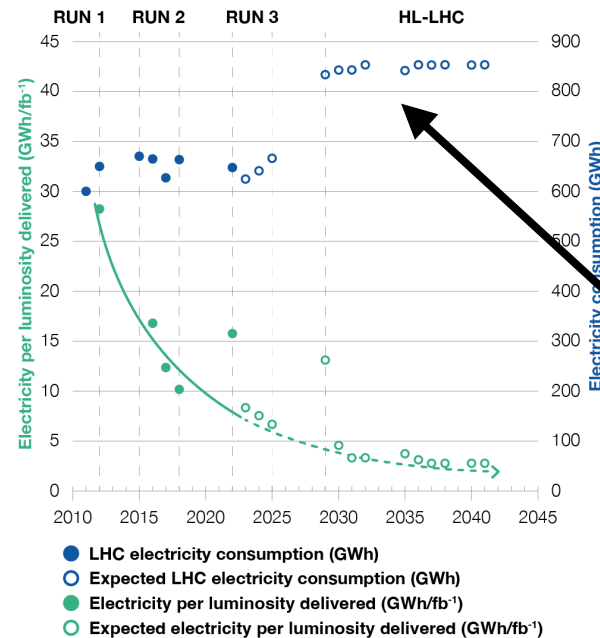
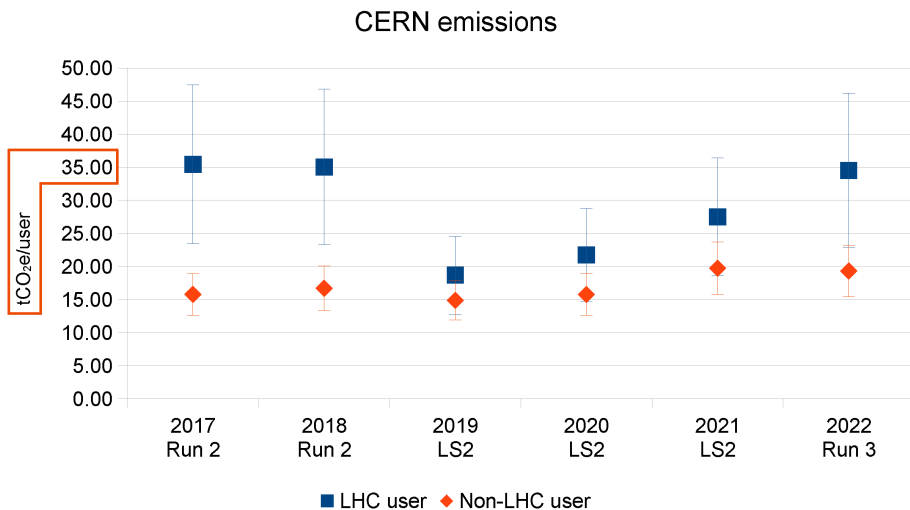
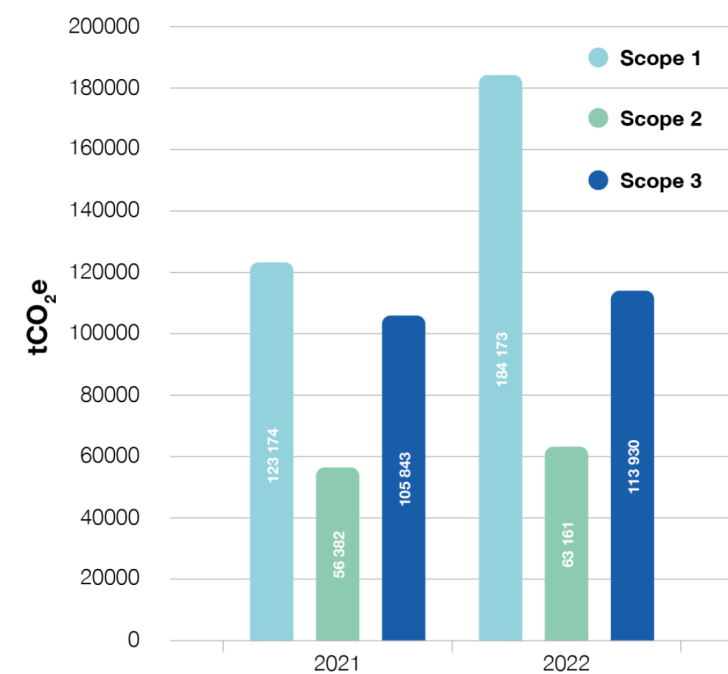
Durabilité du CERN et du LHC

- Très grande infrastructure ► grande empreinte environnementale
- **Consommation électrique** importante (majorité du “scope 2”)
 - 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 (“scope 1”)
- Construction de détecteurs
 - Machines, matériaux, bâtiments, etc. : **achats** (majorité du “scope 3”)
- Laboratoire mondial ► transports

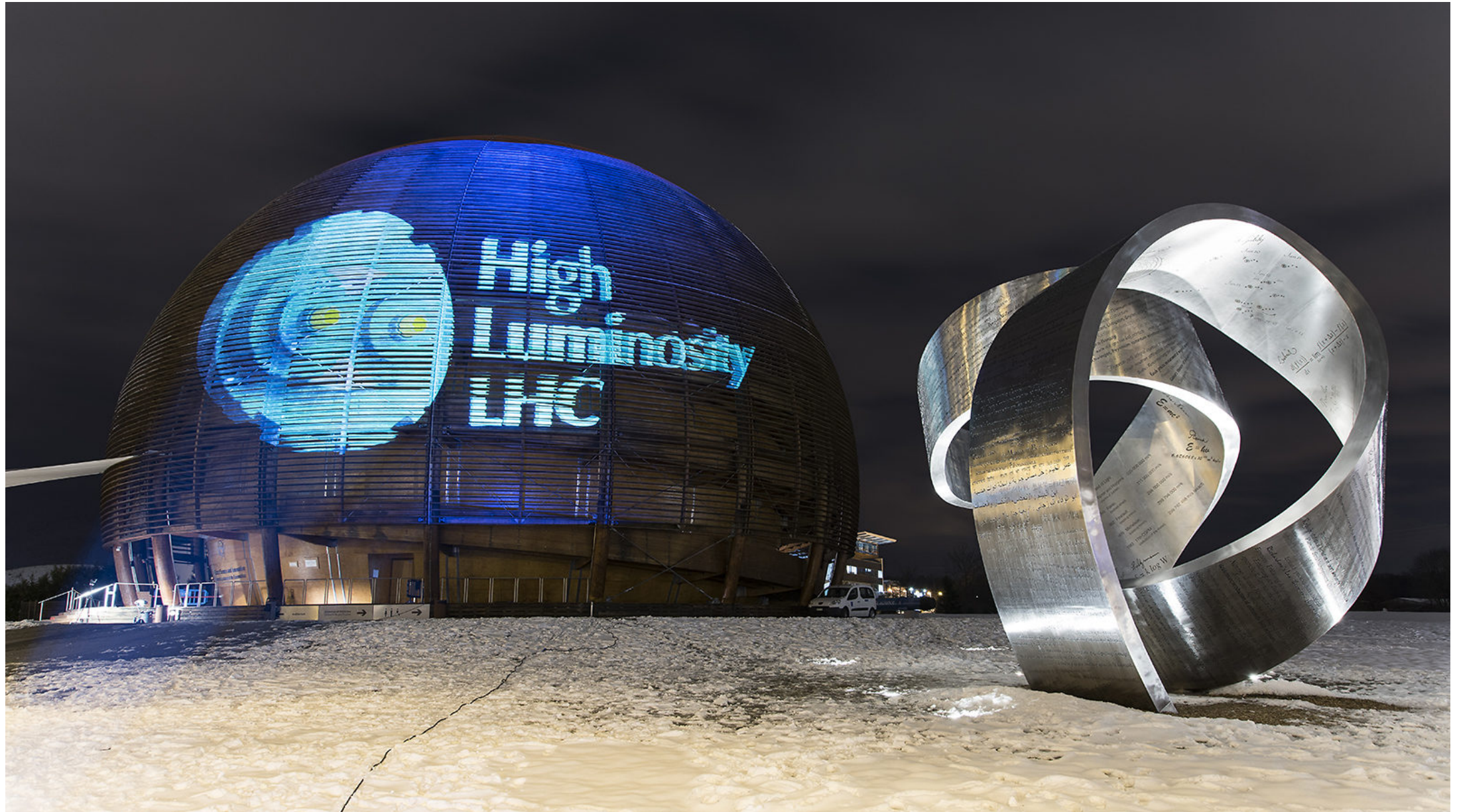
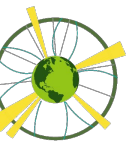


Durabilité du CERN et du LHC

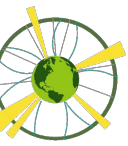
- Très grande infrastructure ► grande empreinte environnementale
- **Consommation électrique** importante (majorité du “scope 2”)
 - Accélération des particules, aimants, cryogénie
- Première source d’émissions :
 - **Gaz à très fort pouvoir de réchauffement** utilisés pour le refroidissement et la détection de particules (“scope 1”)
- Construction de détecteurs
 - Machines, matériaux, bâtiments, etc. : **achats** (majorité du “scope 3”)
- Laboratoire mondial ► transports



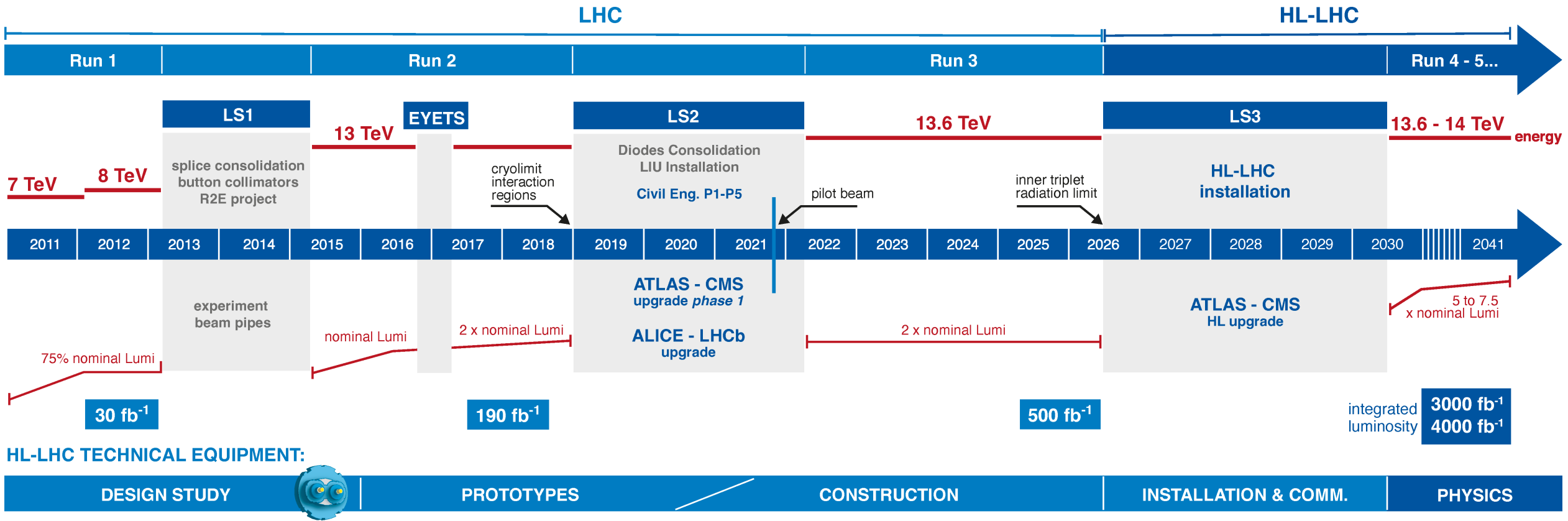
Accélérateur du futur : 2030-2041



LHC à haute luminosité (HL-LHC)



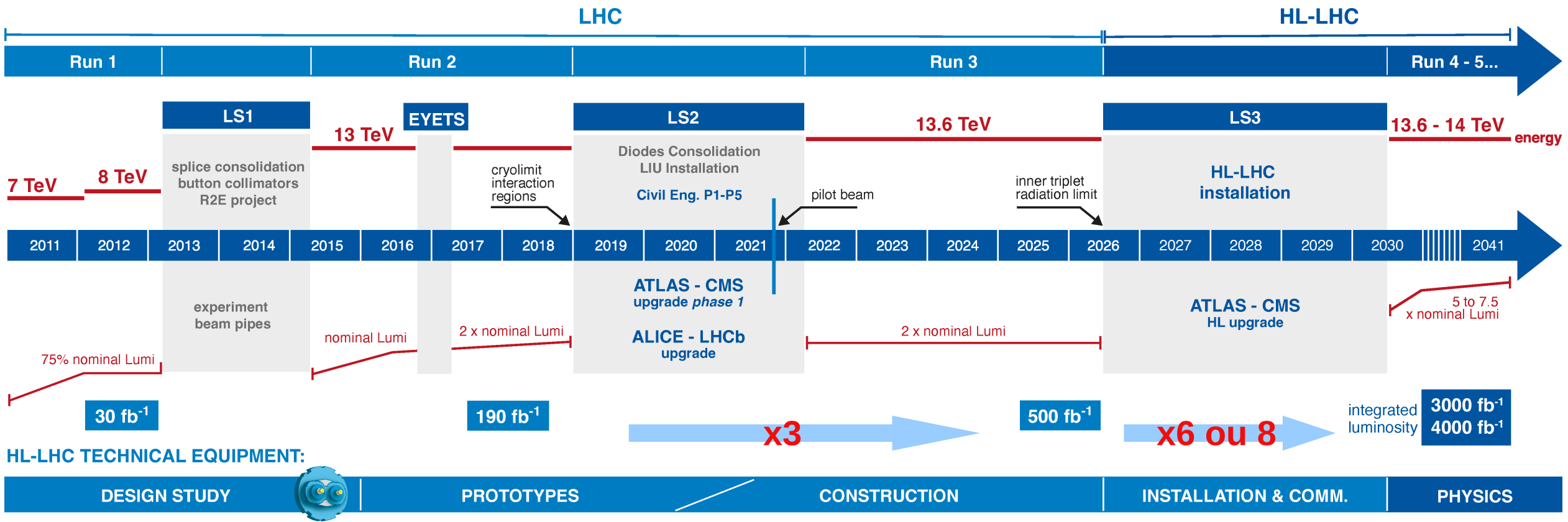
- Mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules :
 - ▶ “Mener à bien la *transformation du LHC en machine de haute luminosité* et la mise à niveau de ses détecteurs, tout en poursuivant l’effort d’innovation en matière de techniques d’expérimentation, *devra rester l’axe central de la physique des particules en Europe. Le potentiel de physique du LHC et du HL-LHC [..] devra être pleinement exploité.*”



LHC à haute luminosité (HL-LHC)



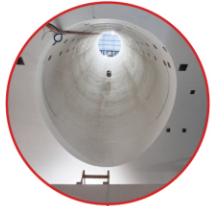
- Mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules :
 - ▶ “Mener à bien la *transformation du LHC en machine de haute luminosité* et la mise à niveau de ses détecteurs, tout en poursuivant l’effort d’innovation en matière de techniques d’expérimentation, *devra rester l’axe central de la physique des particules en Europe. Le potentiel de physique du LHC et du HL-LHC [..] devra être pleinement exploité.*”



LHC à haute luminosité (HL-LHC)

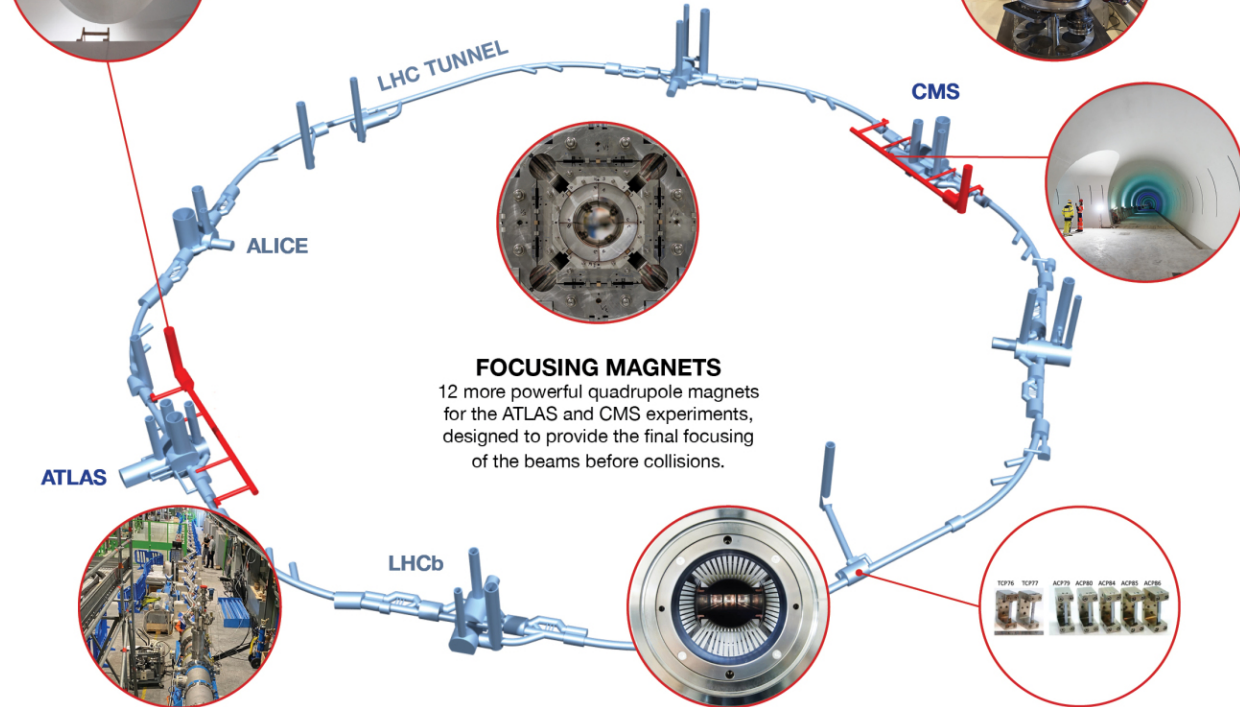


NEW TECHNOLOGIES FOR THE HIGH-LUMINOSITY LHC



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.

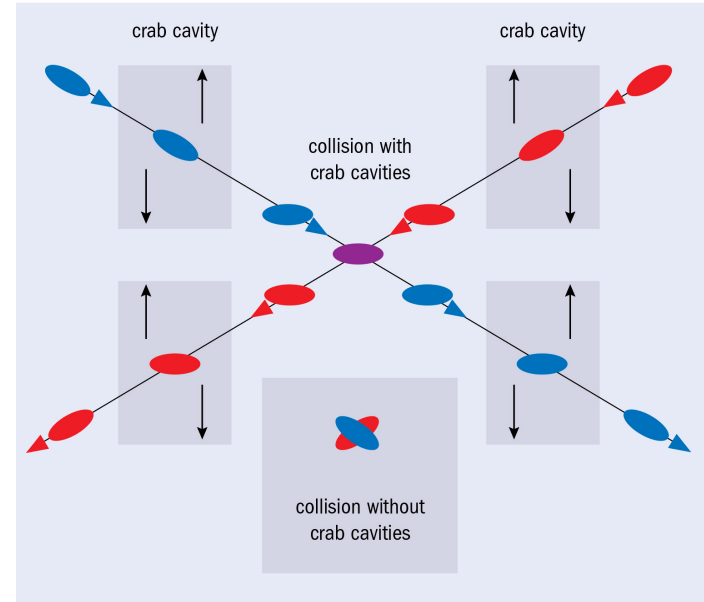


FOCUSING MAGNETS
12 more powerful quadrupole magnets for the ATLAS and CMS experiments, designed to provide the final focusing of the beams before collisions.

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.

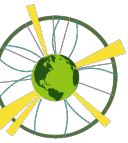
COLLIMATORS
15 to 20 additional collimators and replacement of 60 collimators with improved performance to reinforce machine protection.

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

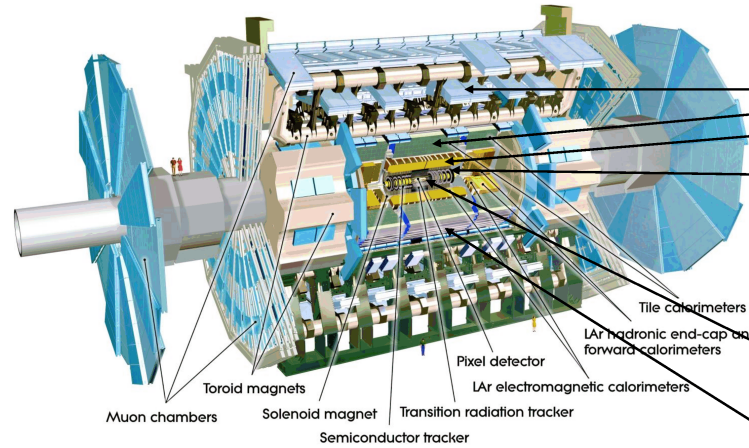


CERN February 2024

Mise à niveau des détecteurs



ATLAS



Upgraded Trigger and Data Acquisition System

- Level-0 Trigger at 1 MHz
- Improved High-Level Trigger
- 150 kHz full-scan tracking

Electronics Upgrades

- Muon System
- Tile Calorimeter
- LAr Calorimeter

High Granularity Timing Detector (HGTD)

- Forward region ($2.4 < |\eta| < 4.0$)
- Low-Gain Avalanche Detectors (LGADs) with 30 ps track resolution

Additional small upgrades

- Luminosity detectors (1% precision goal)
- HL-ZDC

New Inner Tracking Detector (ITk)

- All silicon
- Coverage up to $|\eta| = 4$

New Muon Chambers

- Inner barrel region with new RPC and sMDT detectors



L1-Trigger

<https://cds.cern.ch/record/2714892>

- Tracks in L1-Trigger at 40 MHz
- Particle Flow selection
- 750 kHz L1 output
- 40 MHz data scouting



DAQ & High-Level Trigger

<https://cds.cern.ch/record/2759072>

- Full optical readout
- Heterogenous architecture
- 60 TB/s event network
- 7.5 kHz HLT output

Barrel Calorimeters

<https://cds.cern.ch/record/2283187>

- ECAL crystal granularity readout at 40 MHz with precise timing for e/y at 30 GeV
- ECAL and HCAL new Back-End boards



Calorimeter Endcap

<https://cds.cern.ch/record/2293646>

- 3D showers and precise timing
- Si, Scint+SiPM in Pb/W-SS



Tracker

<https://cds.cern.ch/record/2272264>

- Si-Strip and Pixels increased granularity
- Design for tracking in L1-Trigger
- Extended coverage to $\eta = 3.8$



MIP Timing Detector

<https://cds.cern.ch/record/2667167>

- Precision timing with:
 - Barrel layer: Crystals + SiPMs
 - Endcap layer: Low Gain Avalanche Diodes

Muon systems

<https://cds.cern.ch/record/2283189>

- DT & CSC new FE/BE readout
- RPC back-end electronics
- New GEM/RPC $1.6 < \eta < 2.4$
- Extended coverage to $\eta = 3$

Beam Radiation Instr. and Luminosity

<http://cds.cern.ch/record/2759074>

- Beam abort & timing
- Beam-induced background
- Bunch-by-bunch luminosity: 1% offline, 2% online
- Neutron and mixed-field radiation monitors

LHCb

Align and calibrate detector in quasi-real time, full detector reconstruction and pileup suppression in trigger

Enhance PID with precise timing and improved granularity, explore enhanced readout boards with fast tracking



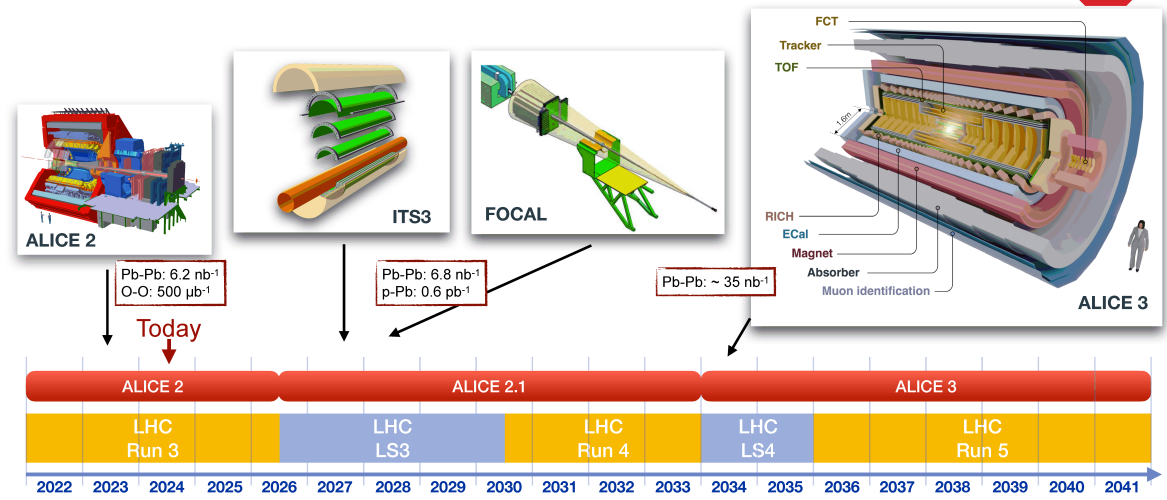
It works! Concept of forward flavour detector validated, many world-best measurements

Greatly improved tracker & PID granularity, 30 MHz detector readout & GPU tracking trigger

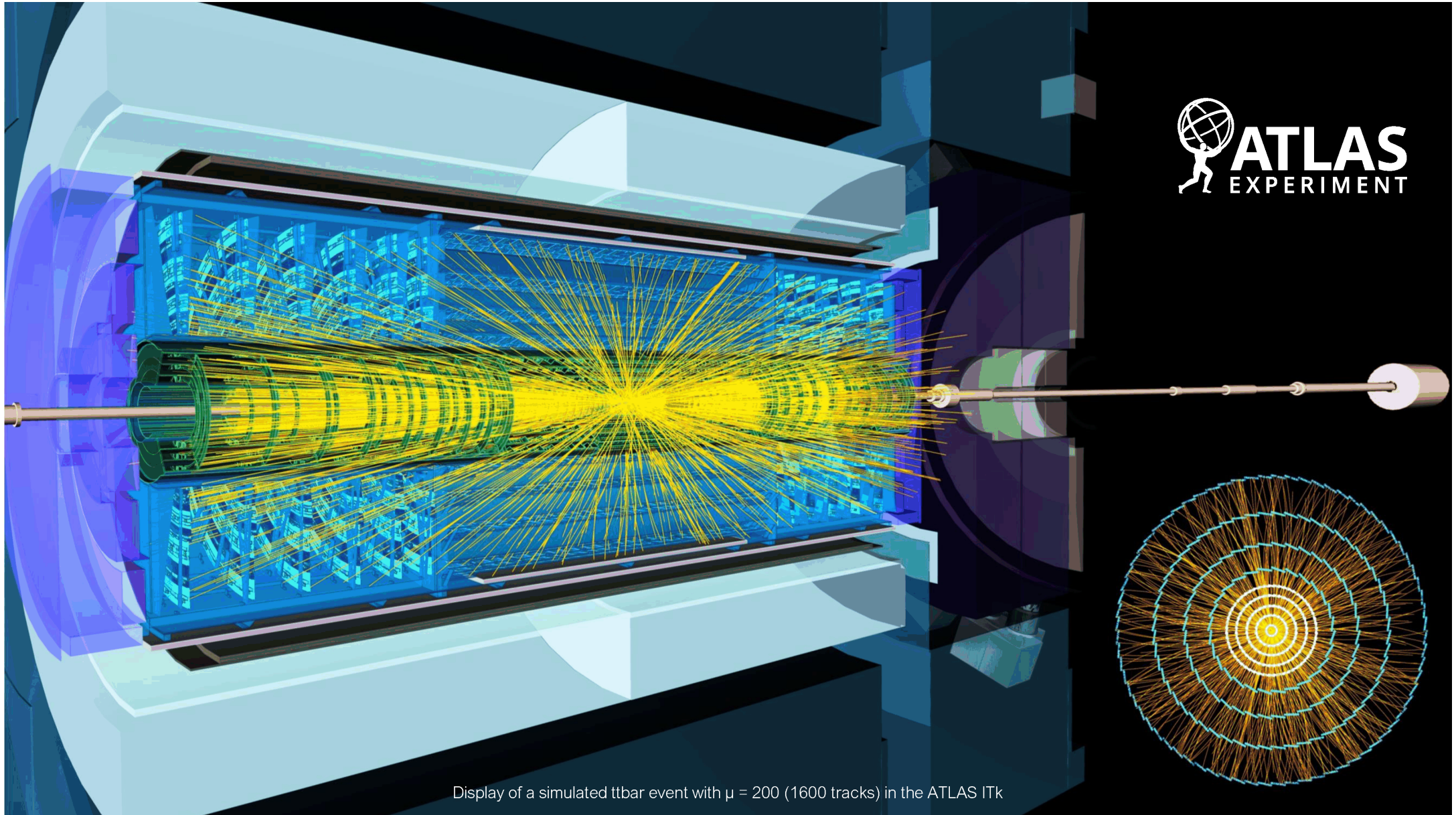
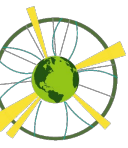
Deploy 4D tracking, PID, and calorimetry + a highly granular pixel tracker to be processed by a heterogenous trigger

A Large Ion Collider Experiment

ALICE Upgrade Roadmap

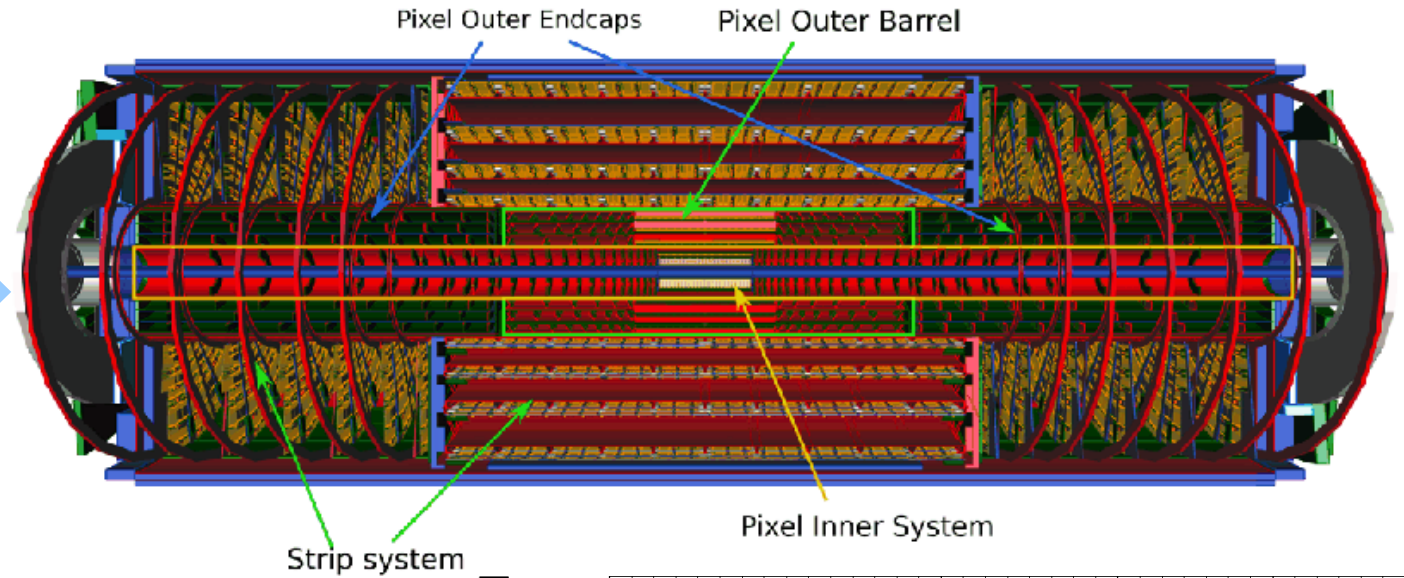
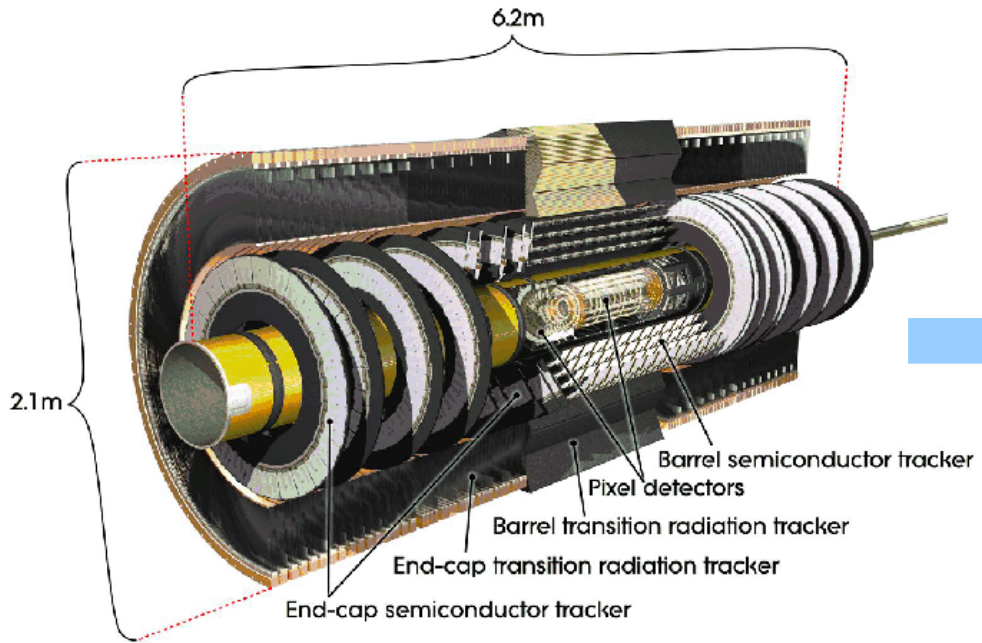


Pourquoi des mises à niveau ?

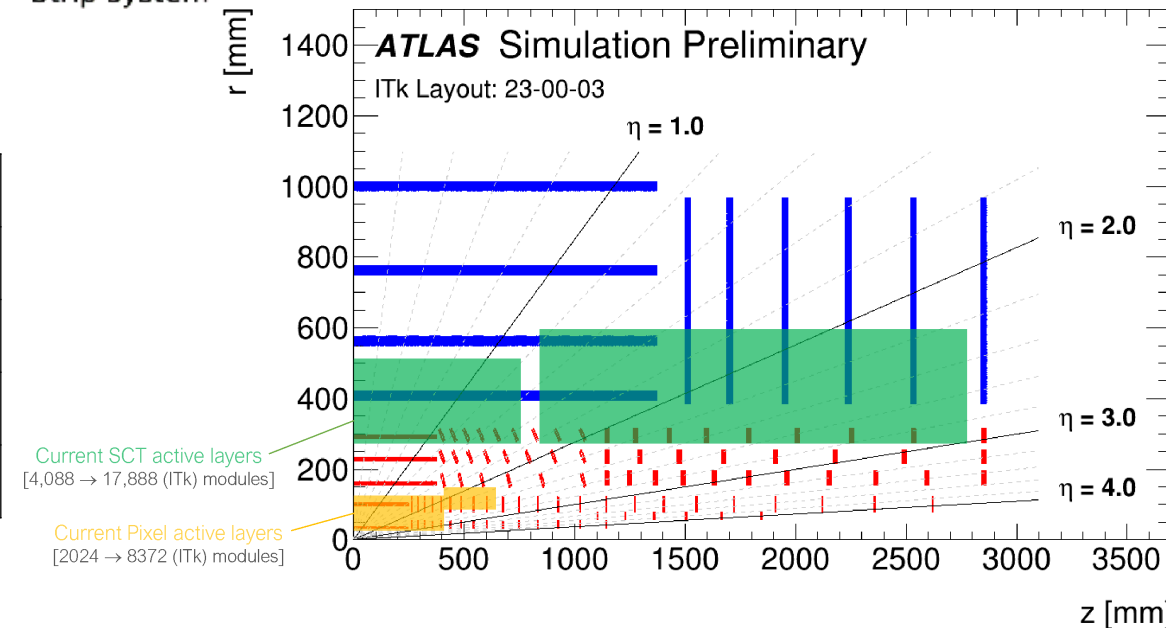


Display of a simulated $t\bar{t}$ event with $\mu = 200$ (1600 tracks) in the ATLAS ITk

Mise à niveau du trajectographe d'ATLAS

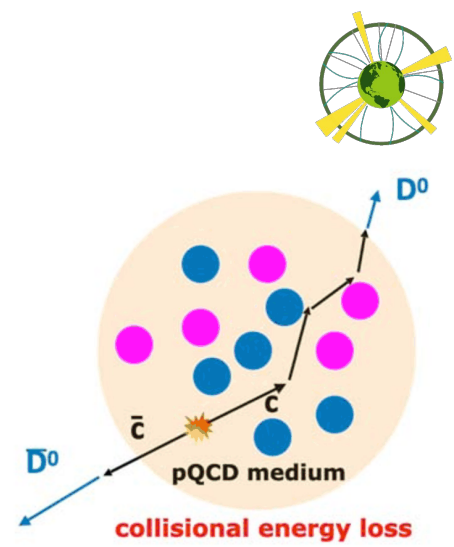


	Ancien : ID	Nouveau : ITk
Nombre de pixels	92 M	1,4 G
Nombre de modules	~2 000	~19 400
Surface	1,9 m ²	13 m ²
η	2,5	4,0

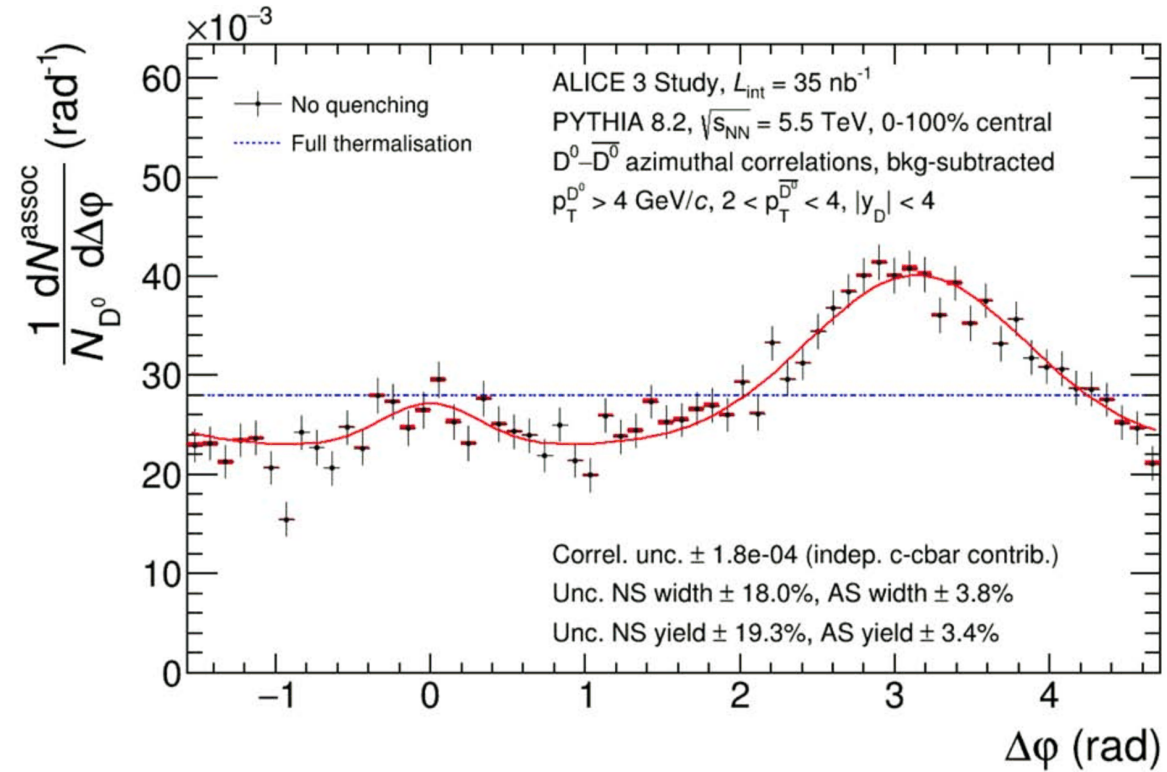
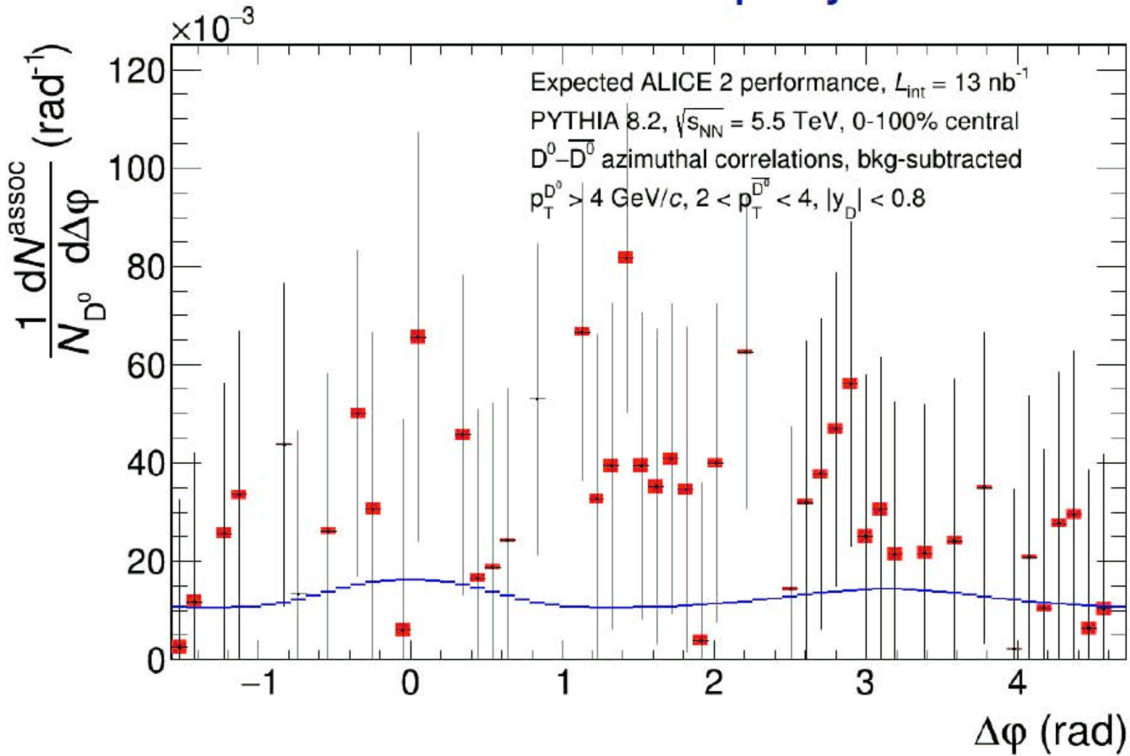


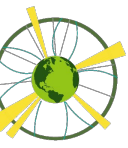
Pourquoi toutes ces données ?

La puissance des statistiques et d'un meilleur détecteur



ALICE Run 3&4 projection





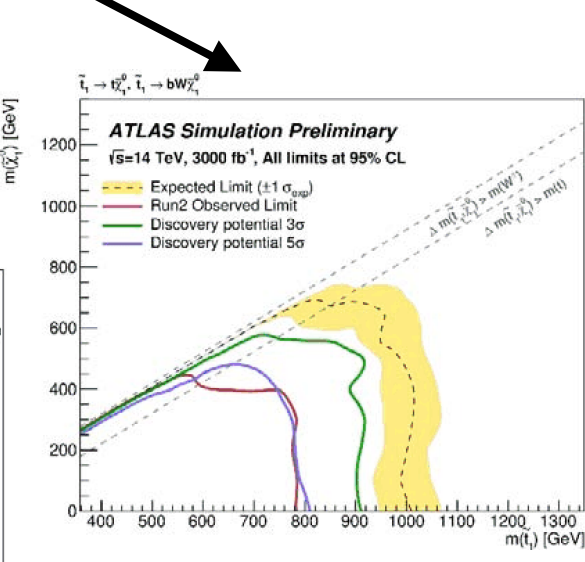
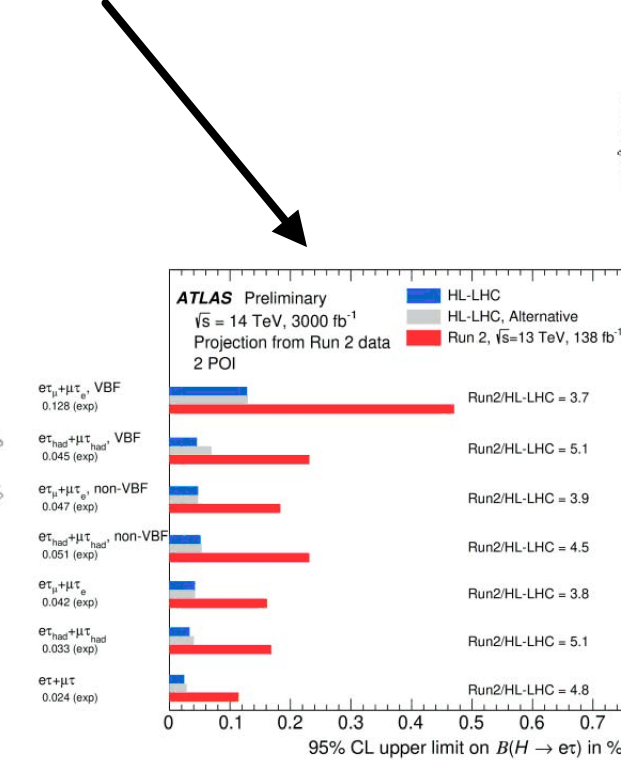
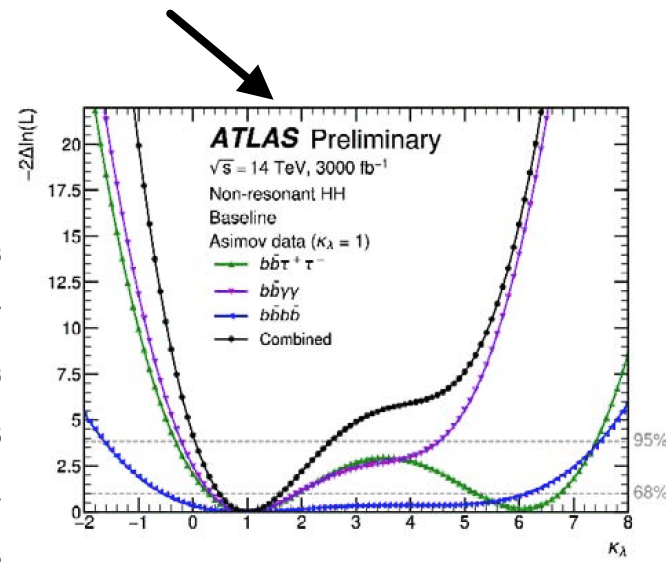
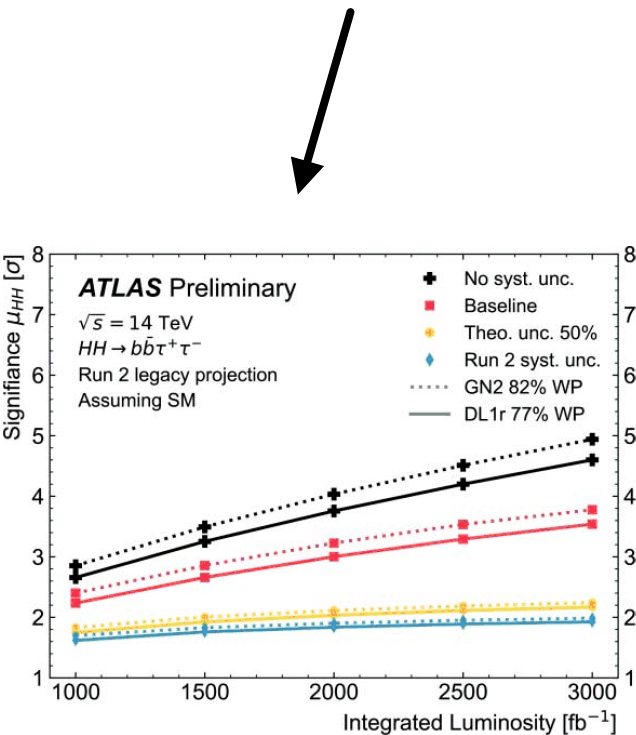
Le HL-LHC pour faire quoi ?

■ 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, ...



Boson de Higgs : voir double sans modération



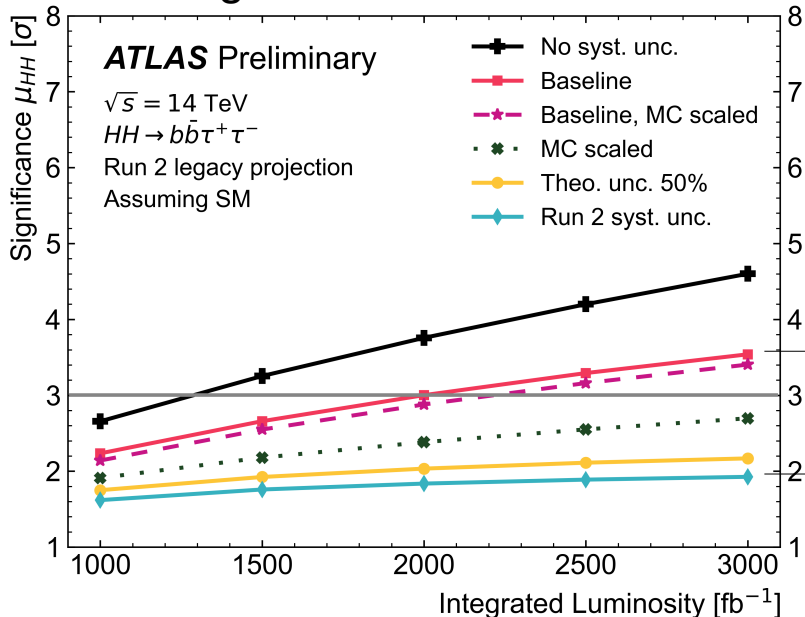
- Produire 1 boson de Higgs et l'observer est déjà difficile
 - ▶ En produire deux simultanément est encore plus rare mais un des buts principaux du HL-LHC

	N_H	N_{HH}
Run-1	512 000	200
Run-2	6 800 000	4 300
Run-3*	7 700 000	5 000
HL-LHC*	165 000 000	110 000

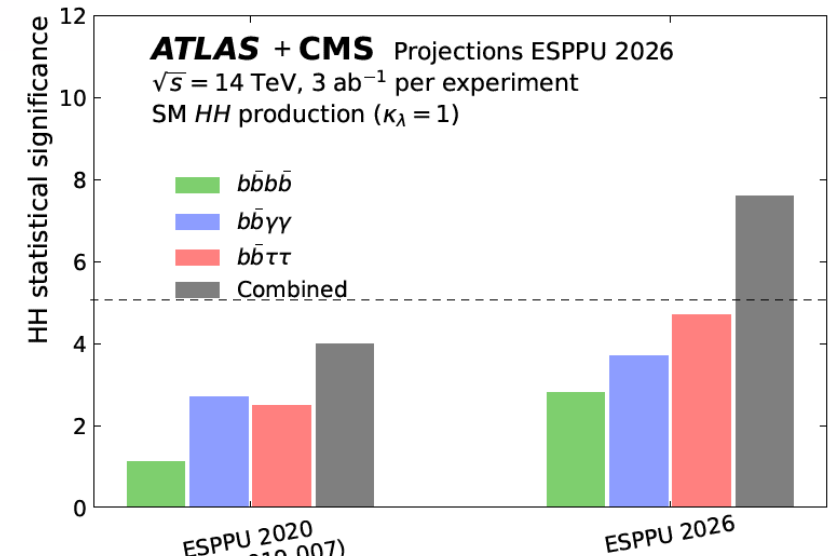
*estimated

5sigma : découverte

3sigma : évidence



Progrès d'analyse



Progrès d'analyse





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**

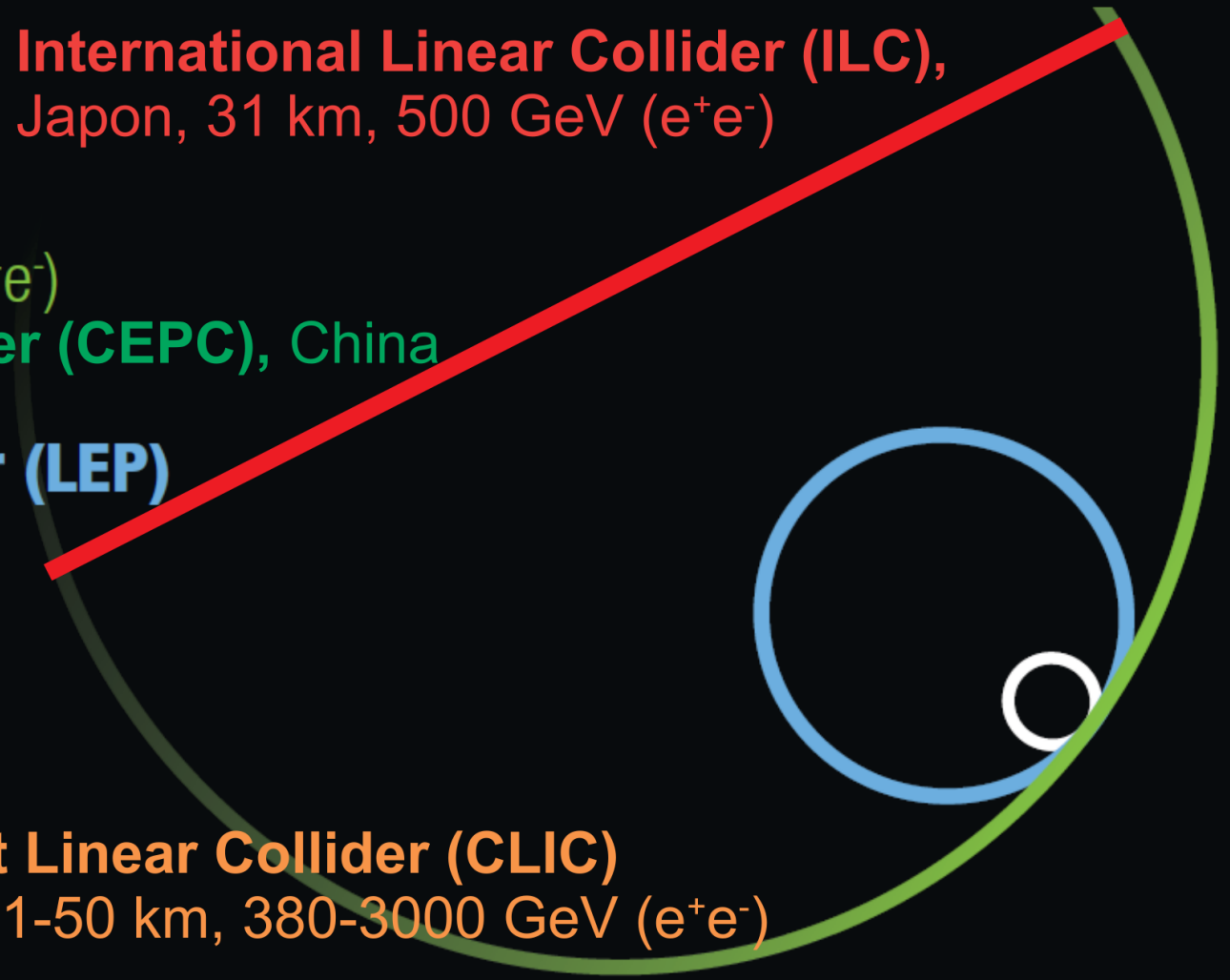
Circumference: 6.2 km

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^-)



Pourquoi envisage-t-on de nouveaux accélérateurs ?

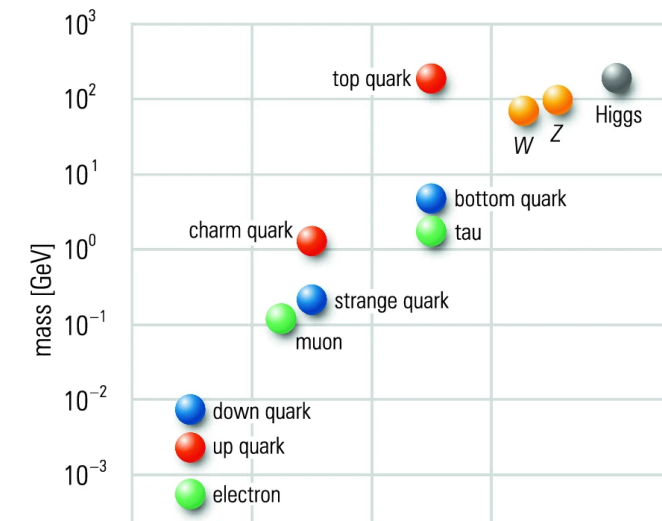
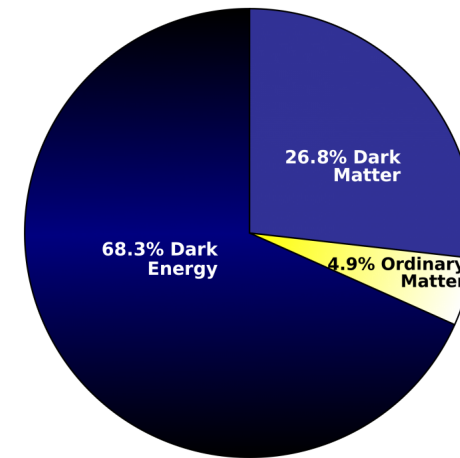


■ Pour la physique !

- ▶ 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 ?



■ Plein d'idées chez les théoriciens

- ▶ A tester expérimentalement
- ▶ Pas de signes clairs au LHC (surtout des modèles exclus)
- ▶ Supersymétrie, modèles exotiques, nouvelles dimensions d'espace, ...
- ▶ Prédissent des nouvelles particules ou impactent des phénomènes déjà mesurés

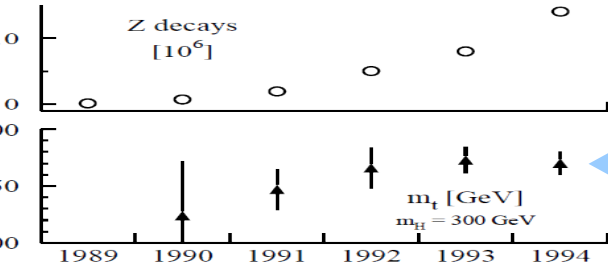
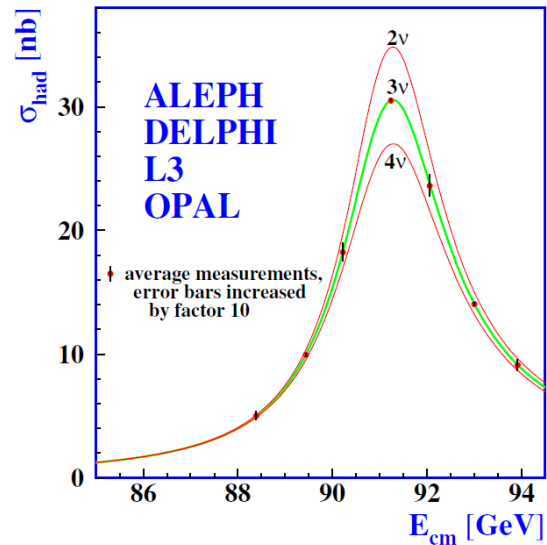
■ Besoin d'un guide expérimental, mais difficile de définir les paramètres d'une nouvelle machine

- ▶ Quelle énergie ?
- ▶ quel(s) secteurs affectés (Higgs, saveur, quark top, etc.) ?

Interactions du boson de Higgs



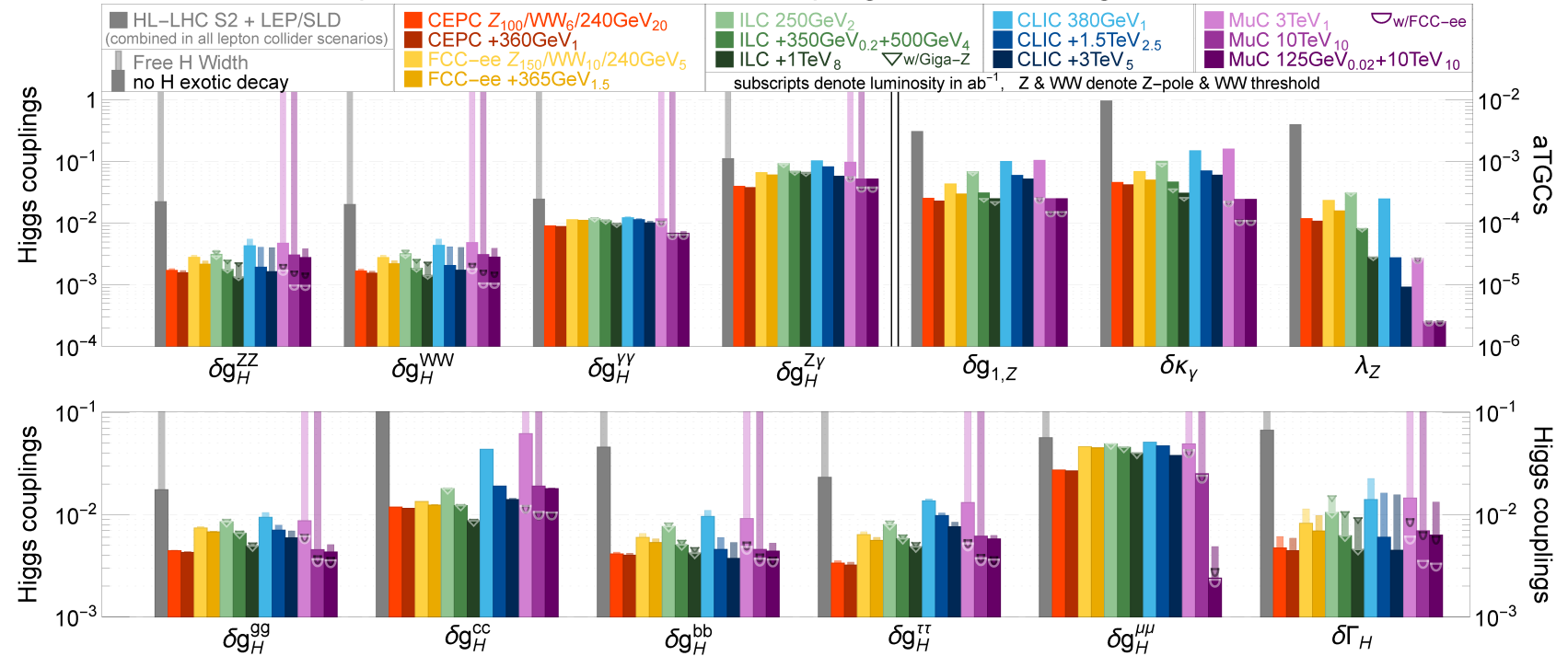
- Précision accrue d'au moins un ordre de grandeur par rapport au HL-LHC
 - ▶ Rend les mesures sensibles à des effets de nouvelle physique à des énergies plus élevées



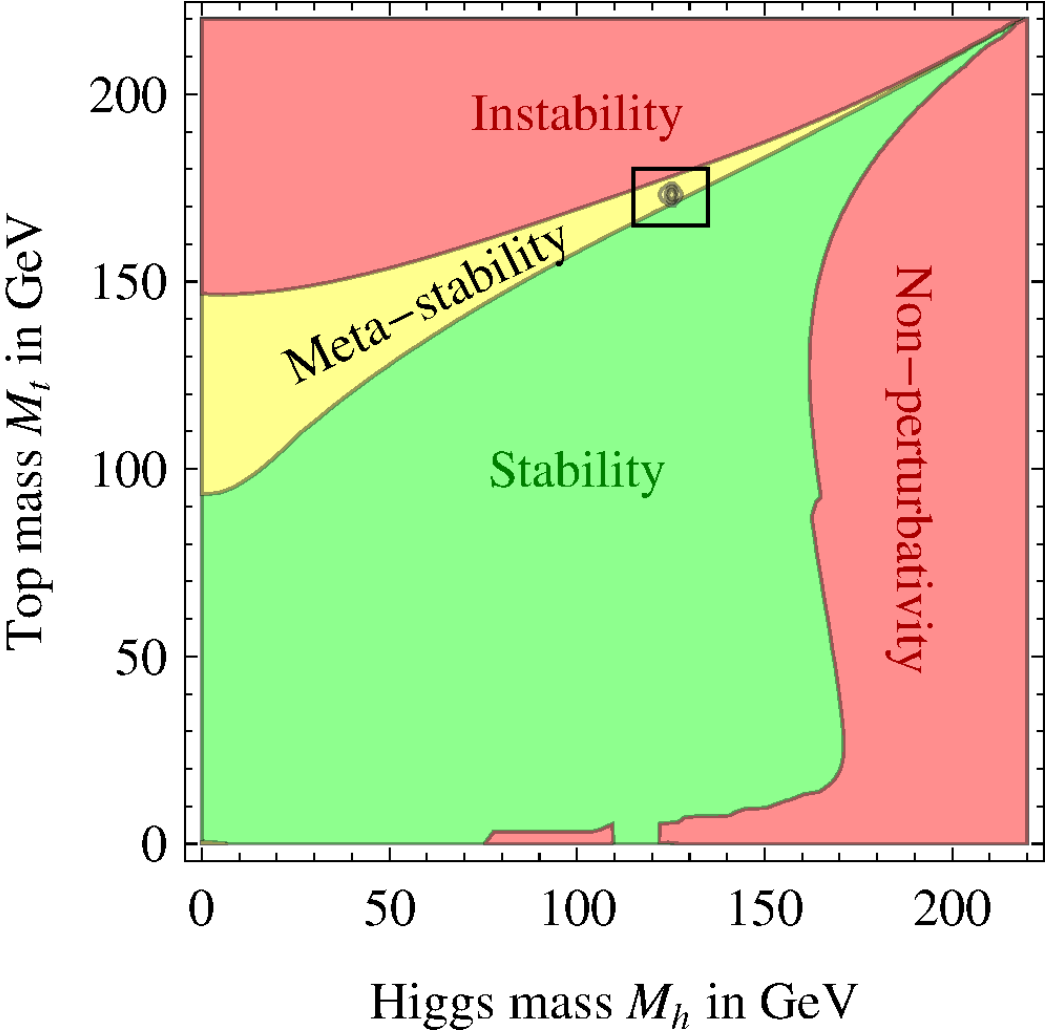
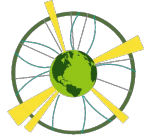
Prédiction du LEP
 $170 \pm 10^{+17}_{-19} \text{ GeV}$

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

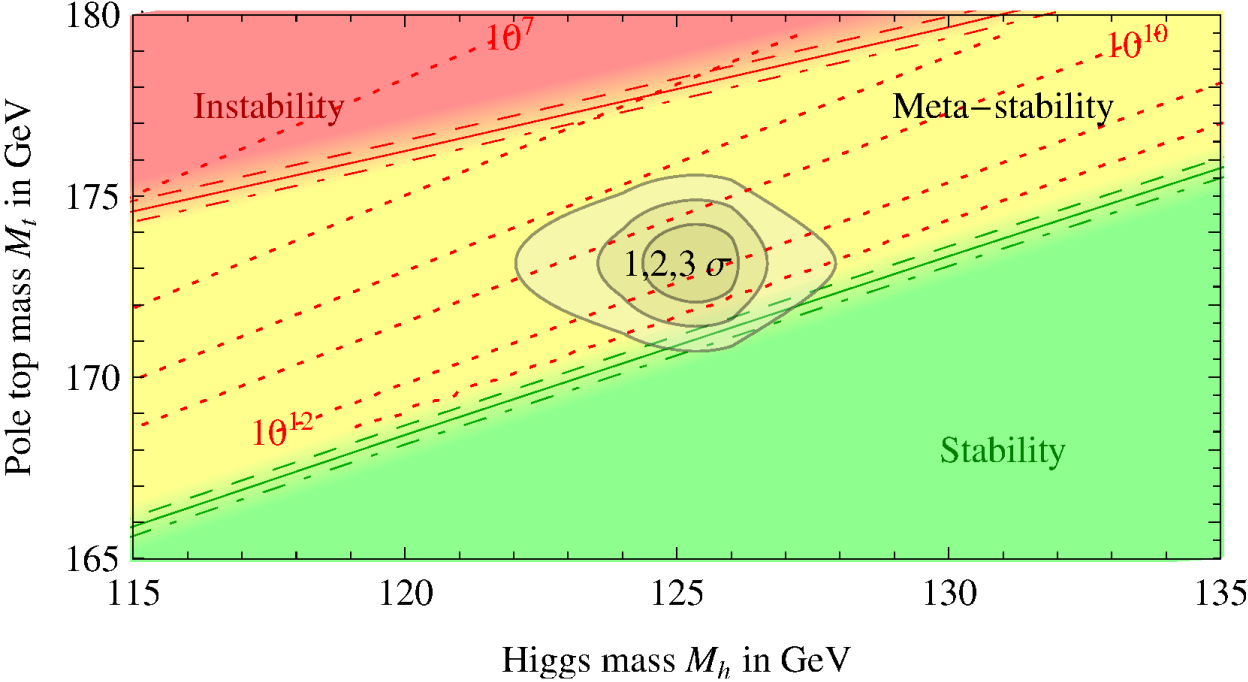
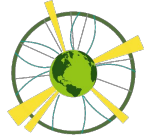
precision reach on effective couplings from SMEFT global fit



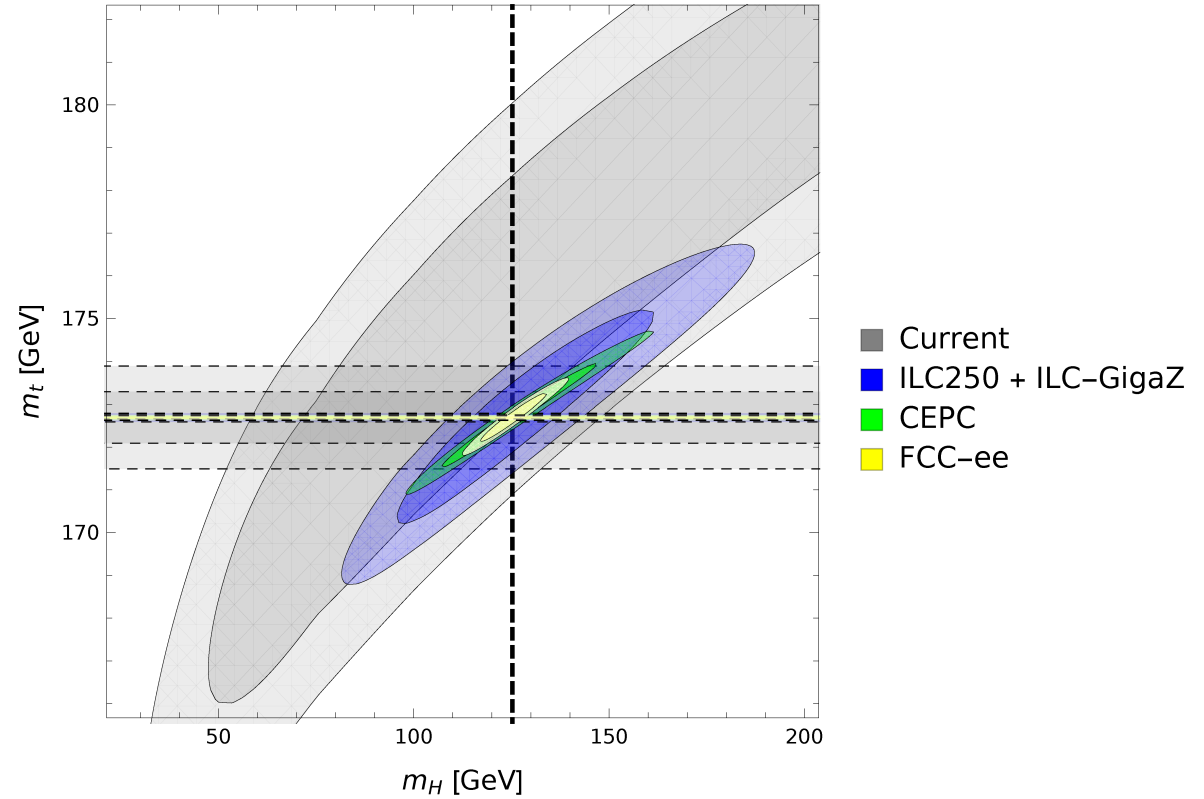
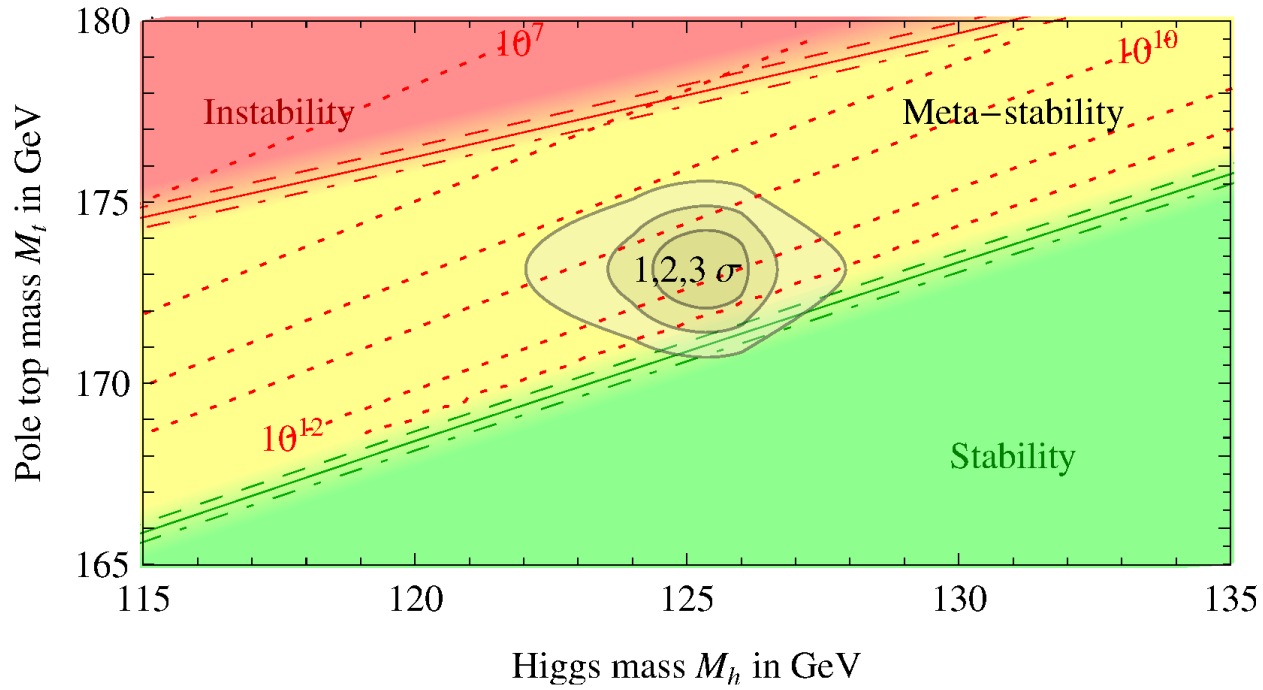
Un univers instable ?



Un univers instable ?



Un univers instable ?



Stratégies européenne et américaine

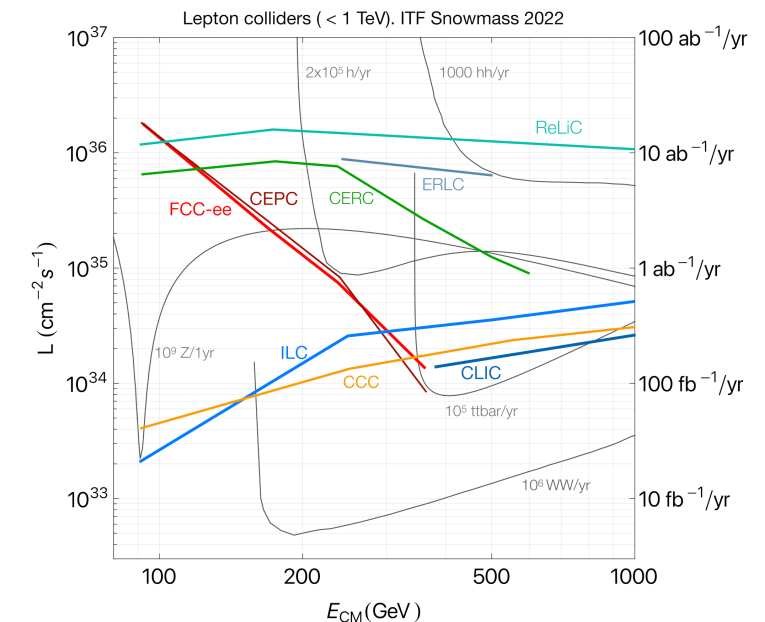
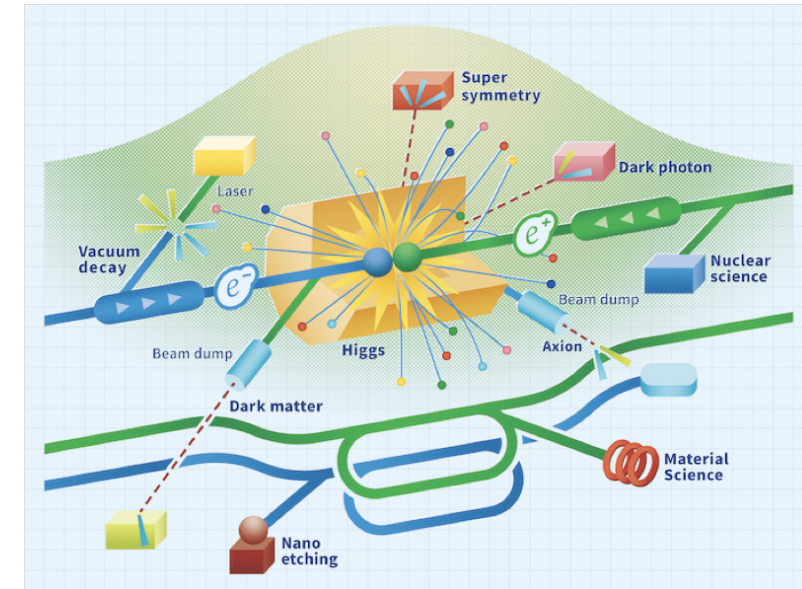


- Mise à jour 2020 de la stratégie européenne pour la physique des particules :
 - ▶ “*La prochaine priorité pour ce qui concerne les collisionneurs est une usine à Higgs électron-positon*”
 - ▶ “*l’Europe, avec ses partenaires internationaux, devra étudier la faisabilité technique et financière d’un futur collisionneur de hadrons d’une énergie d’au moins 100 TeV dans le centre de masse au CERN, avec, comme première phase éventuelle, la construction d’une usine à Higgs et de production électrofaible sous la forme d’une machine électron-positon. L’étude de faisabilité des collisionneurs et de l’infrastructure correspondante devra être mise en oeuvre en tant que projet d’envergure mondiale, et être réalisée suivant le calendrier de la prochaine mise à jour de la stratégie.*”
 - ▶ “*La réalisation en temps voulu au Japon du Collisionneur linéaire international (ILC) électron-positon serait compatible avec cette stratégie, et, dans cette hypothèse, la communauté européenne de la physique des particules souhaiterait y collaborer.*”
- Aux Etats-Unis, rapport Particle Physics Project Prioritization Panel 2023 :
 - ▶ “*In the area of colliders, the panel endorses an offshore Higgs factory, located in either Europe, including CERN, or Japan, to advance studies of the Higgs boson following the HL-LHC (..) it is recommended that the US commit funds commensurate with its involvement in the LHC and HL-LHC.*”

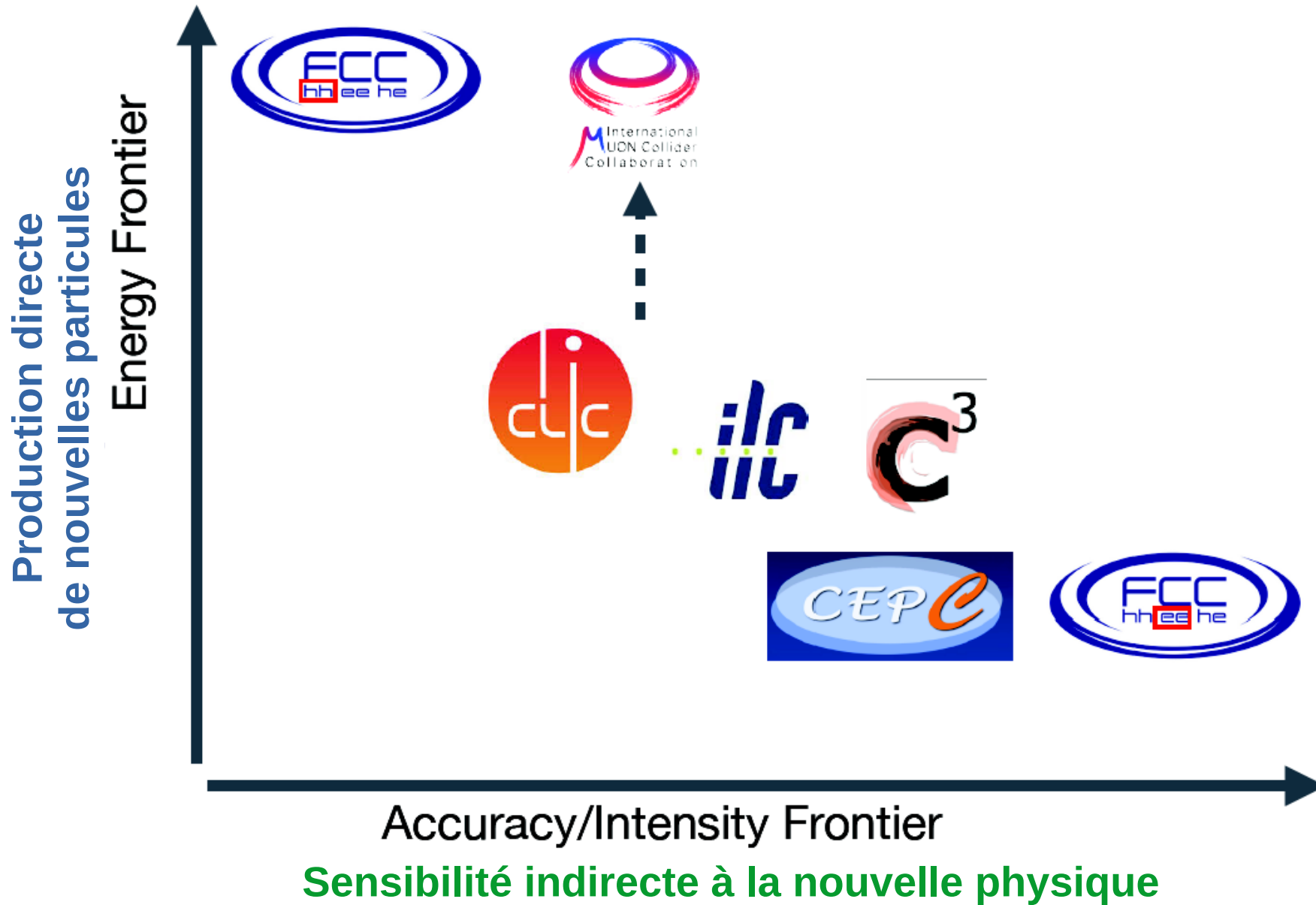
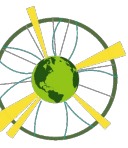
Principaux projets envisagés



- **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



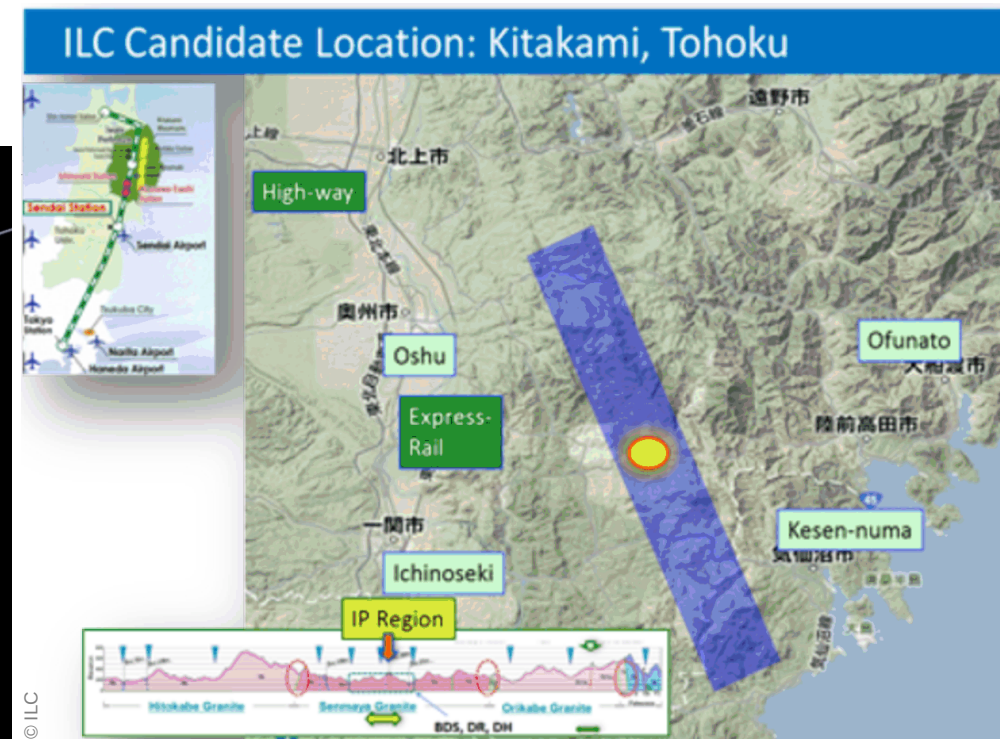
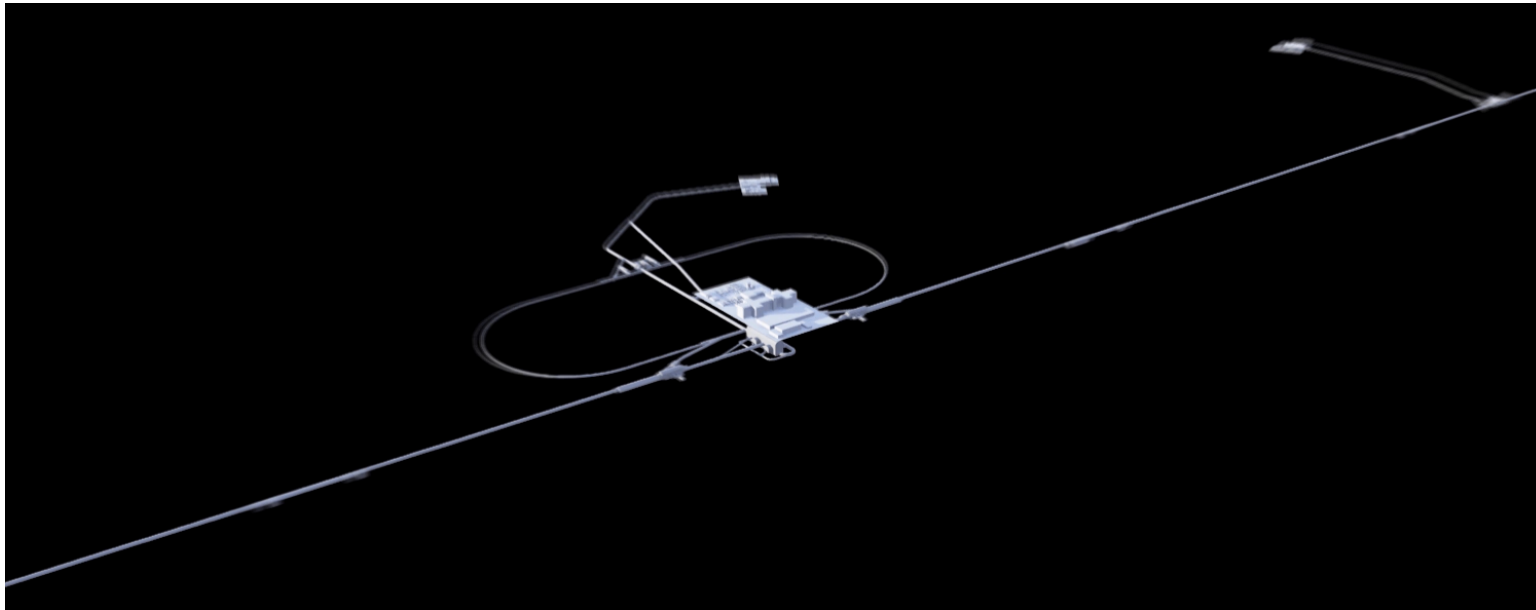
Frontière en énergie et en intensité



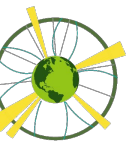
ILC (International Linear Collider)



- Concept près depuis de nombreuses années
 - ▶ Manque un accord pour le construire, depuis des années...
- Commencer par 20 km avec technologies déjà éprouvées
 - ▶ Usine à Higgs e^+e^-
- Plus tard, rallonger le tunnel ou changer de technique d'accélération
 - ▶ Augmentation de l'énergie de collision jusqu'à 1 TeV

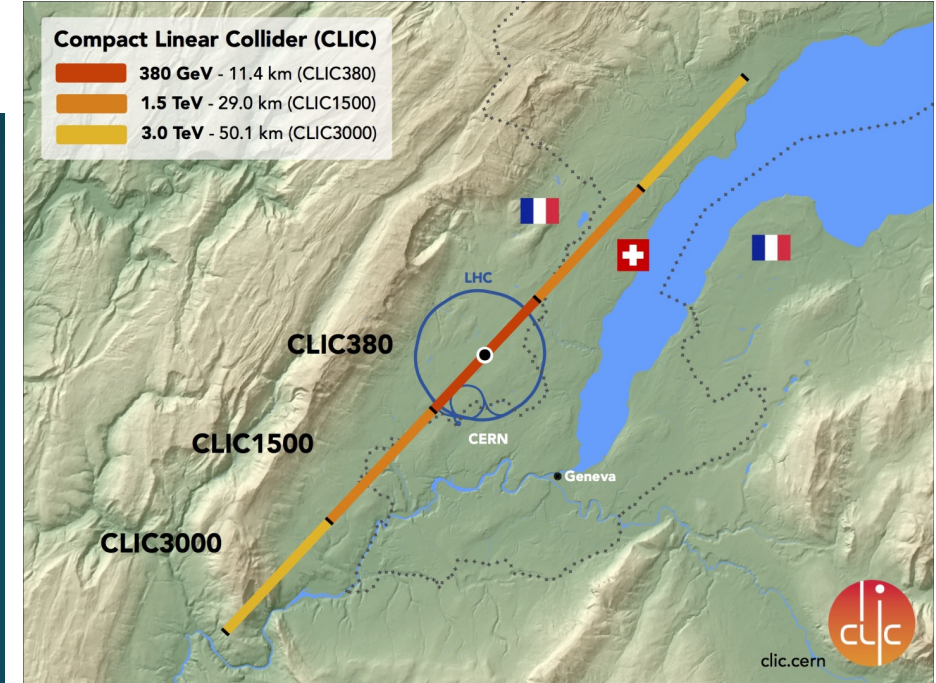
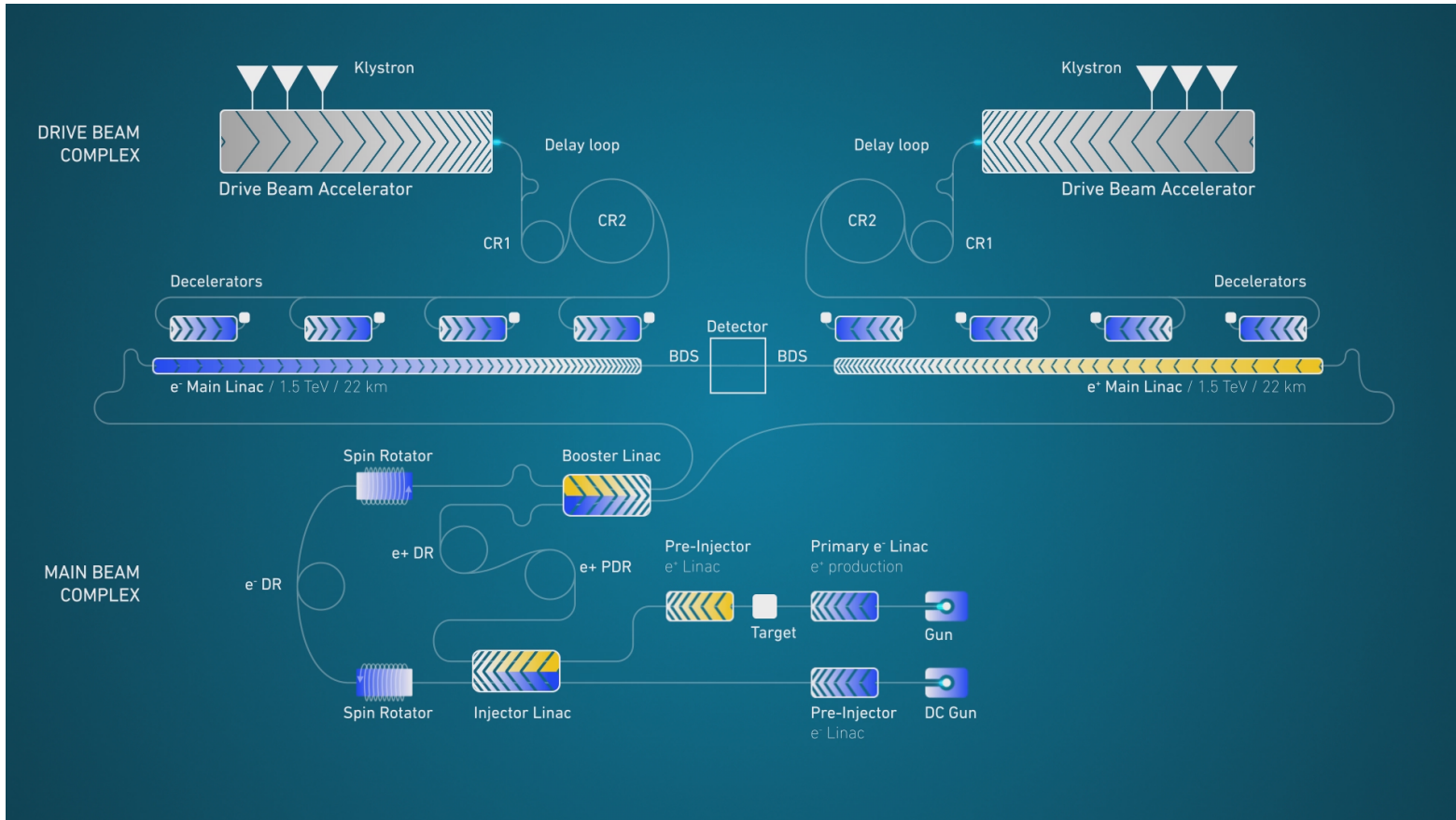


© ILC



CLIC (Compact Linear Collider)

- Deux accélérateurs
 - ▶ Faisceau d'entraînement (faible énergie, haute charge)
 - ▶ Faisceau principal (haute énergie, faible charge)
- Entre 11 et 50 km, par étape, de 380 GeV à 3 TeV

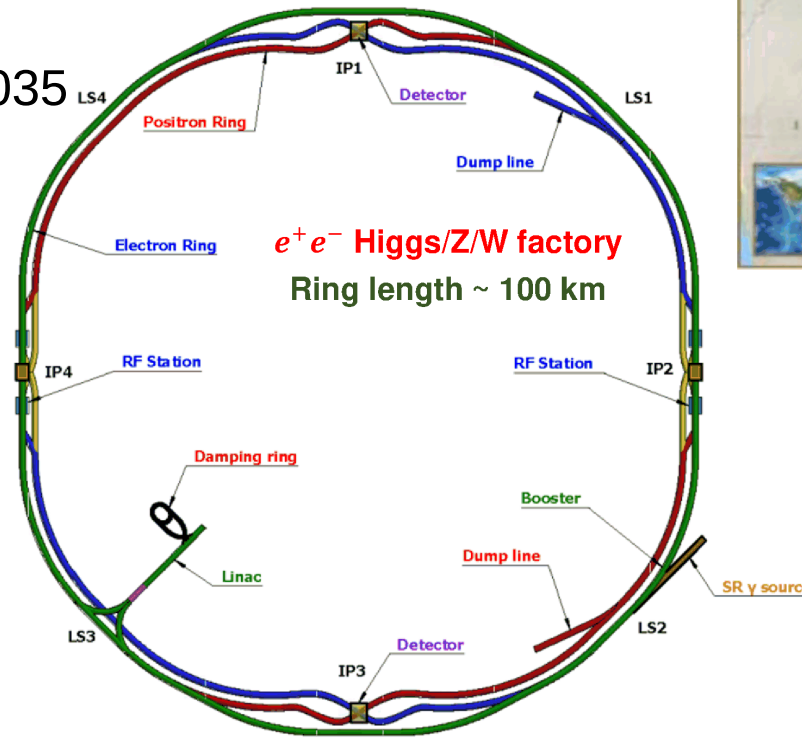


© CERN

CEPC (Circular Electron-Positron Collider)



- Tunnel de 100 km
- Production de bosons de Higgs, bosons Z et W, quarks top
- Pourrait ensuite abriter un collisionneur proton-proton (SppC) de 100 TeV
- Démarrage potentiel de construction (si approuvé en 2025) **dès 2027**
 - ▶ Données à partir de 2035
- Réaction en Europe :
 - ▶ Accélérer la mise à jour de la stratégie
 - ▶ Finalisation de l'étude de faisabilité du FCC



nature

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

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

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

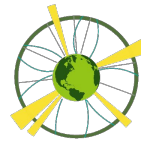
China could start building world's biggest particle collider in 2027

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

FCC (Future Circular Collider)



Etude de faisabilité du FCC



Document sorti lundi dernier !

> 1200 pages : motivations de physique, construction, fonctionnement, impact environnemental



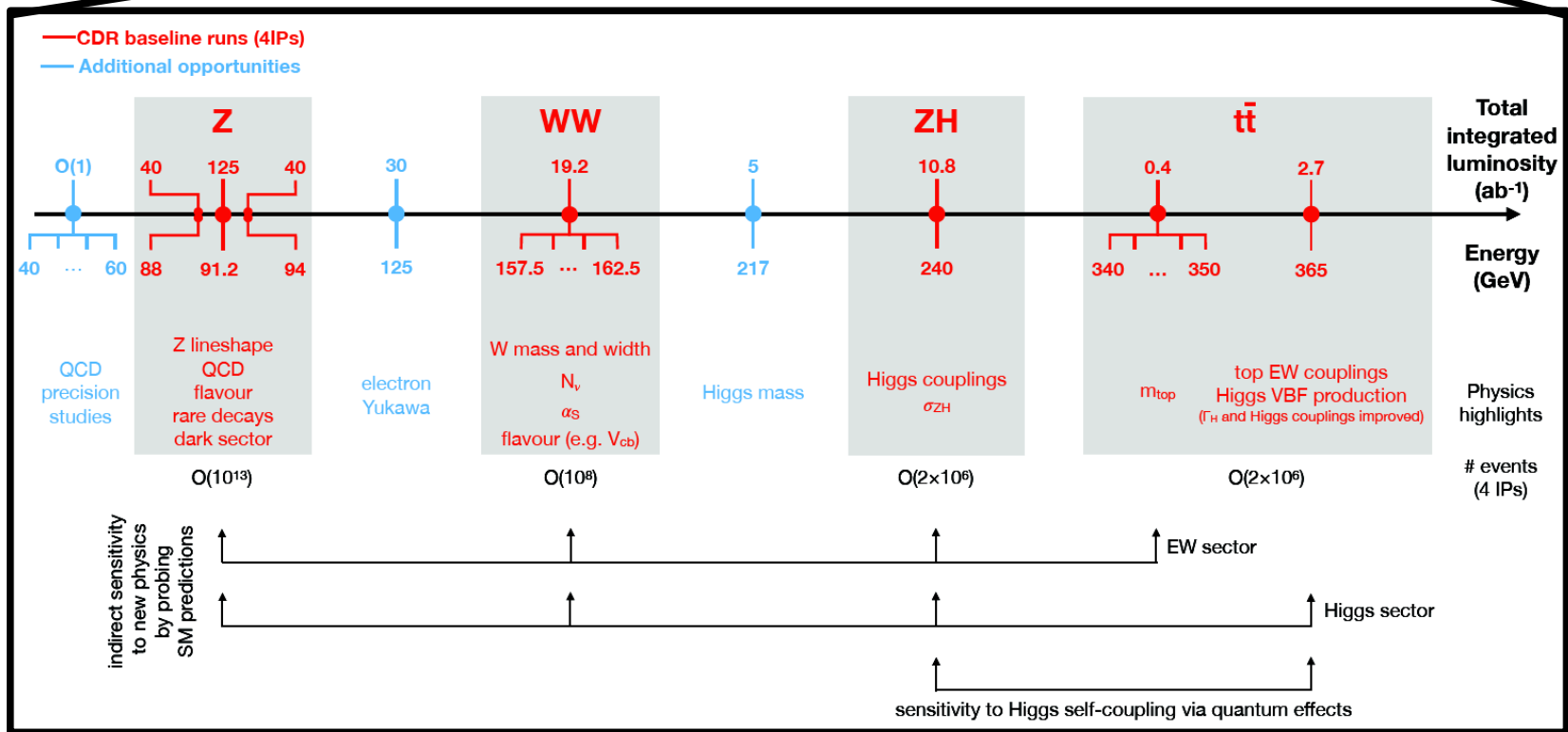
Future Circular Collider
Feasibility Study Report

Volume 1
Physics, Experiments, Detectors

Volume 2
Accelerators, Technical Infrastructure and Safety

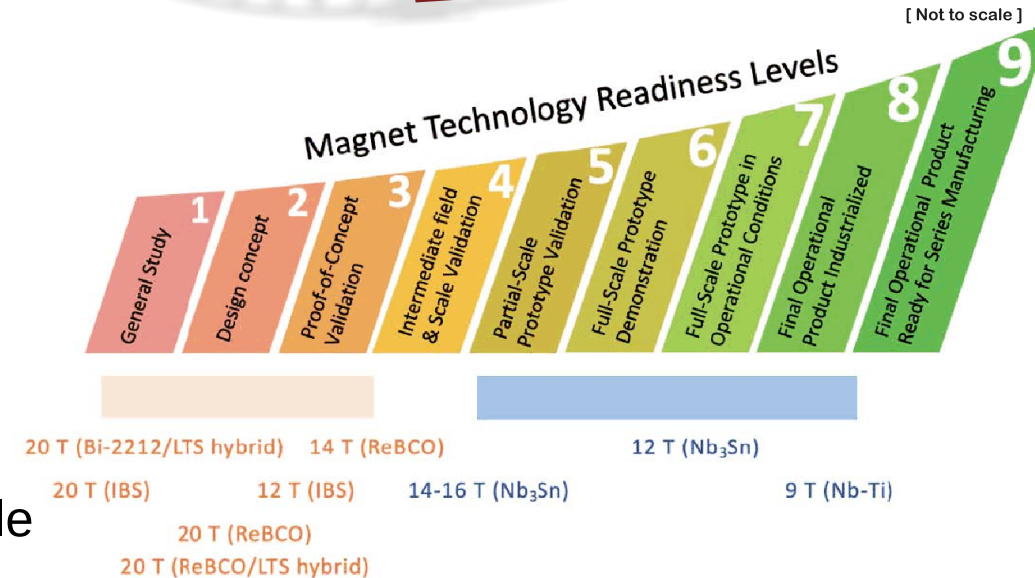
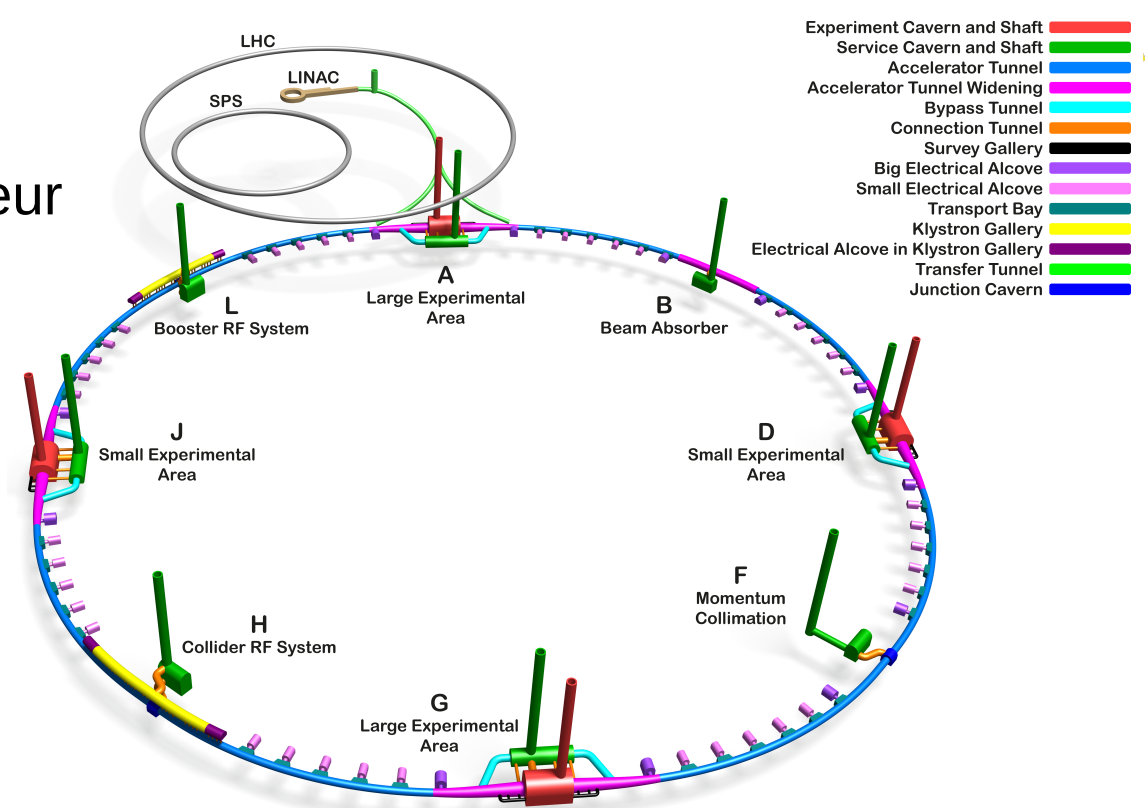
Volume 3
Civil Engineering, Implementation and Sustainability

March 31, 2025

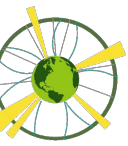


FCC-ee / FCC-hh

- Tunnel de 90,7 km entre 30 et 560 m de profondeur
- 15 milliards de CHF
- Deux accélérateurs : booster et collisionneur
 - ▶ À cause des pertes d'énergie
- 4 points d'interaction (4 détecteurs potentiels)
 - ▶ Augmente les statistiques
 - ▶ Résultats plus robustes
 - ▶ Détecteurs spécialisés si besoin
- Fonctionnement successif à plusieurs énergies
 - ▶ 91 GeV (Z, 4 ans)
 - ▶ 160 GeV (WW, 2 ans)
 - ▶ 240 GeV (ZH, 3 ans)
 - ▶ 360 GeV ($t\bar{t}$, 5 ans)
- Ensuite, passage au FCC-hh :
 - ▶ Similaire au passage du LEP au LHC
 - ▶ 85-125 TeV suivant le champ des aimants
 - ▶ Démarrage dans les années 2070, jusqu'à la fin du siècle

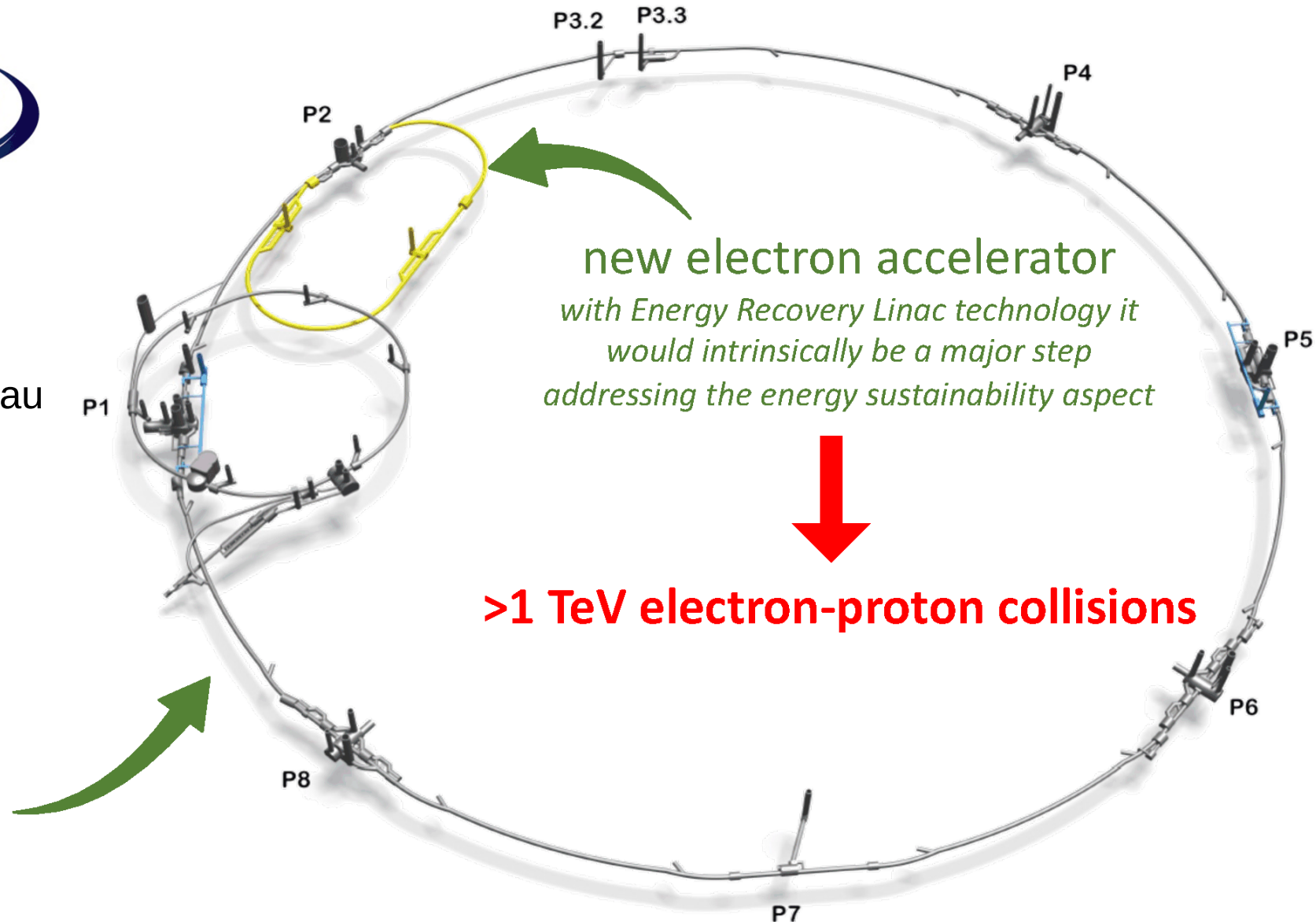


Collisionneurs ep : LHeC, FCC-he



- Energy recovery linac (ERL)
 - ▶ Récupère l'énergie du faisceau pour accélérer les nouveaux électrons
 - ▶ Diminue la consommation électrique

existing/future
proton accelerator

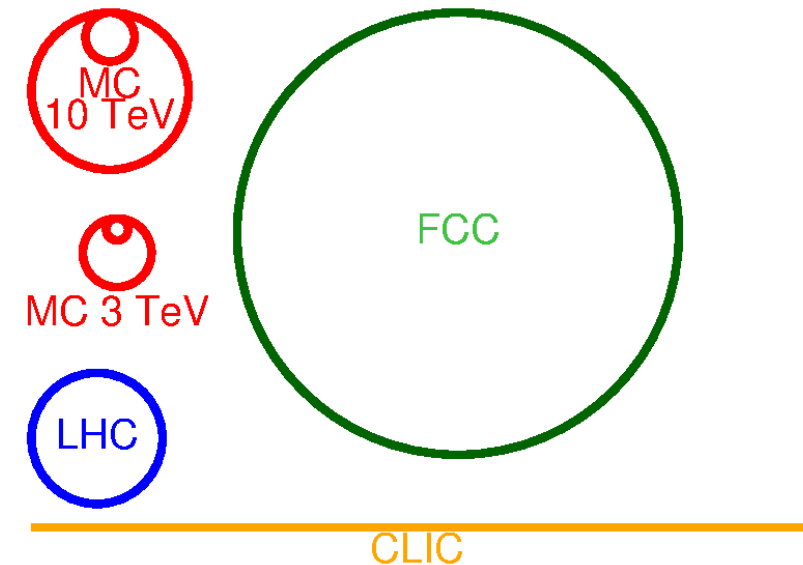
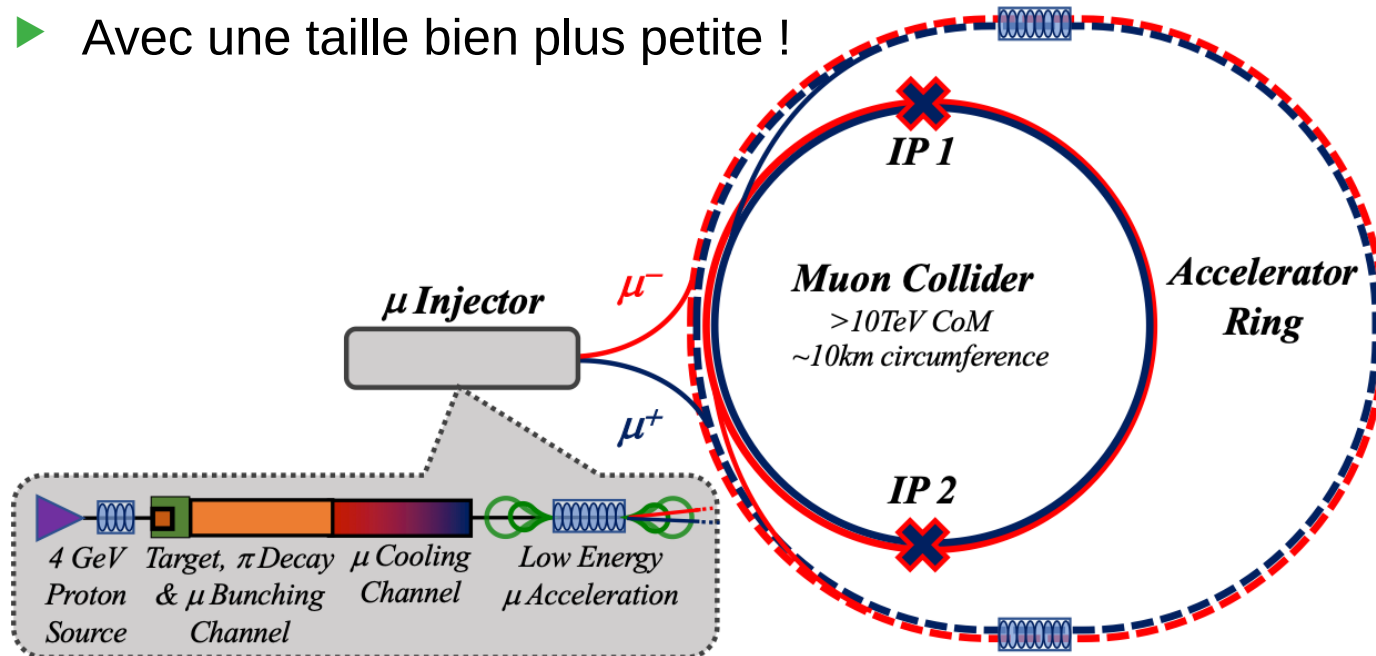
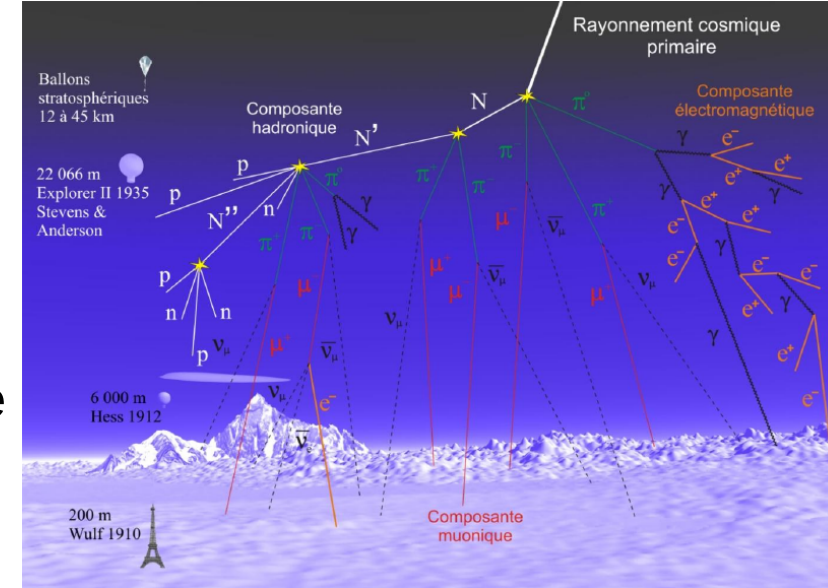


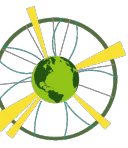
>1 TeV electron-proton collisions

Accélérateur de muons



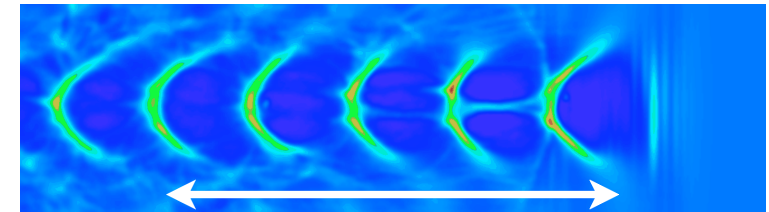
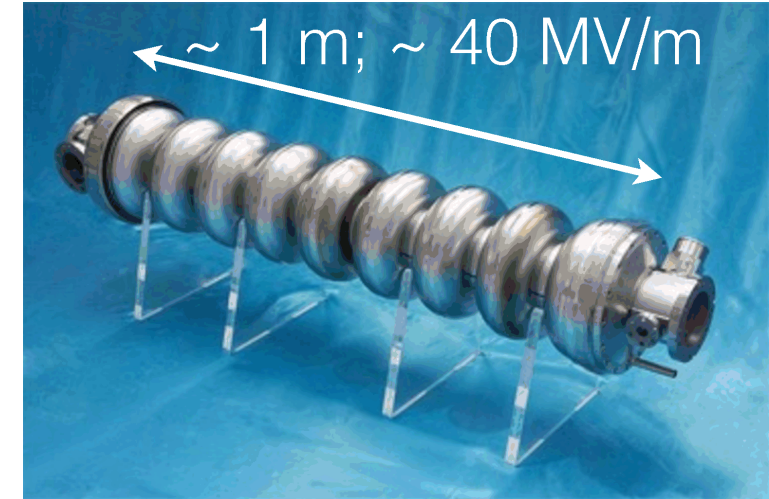
- Muon : cousin lourd de l'électron
 - ▶ Durée de vie : 2,2 microsecondes
 - ▶ À la vitesse de la lumière, représente environ 660 m
 - ▶ Comment les accélérer ???
- À la vitesse de la lumière, effet relativiste : dilatation du temps
 - ▶ Plus son énergie est grande, plus il "vit" longtemps, plus il voyage
 - ▶ Explique les muons cosmiques au niveau de la mer
- Pas encore mature, mais semble possible pour 3-10 TeV
 - ▶ Avec une taille bien plus petite !



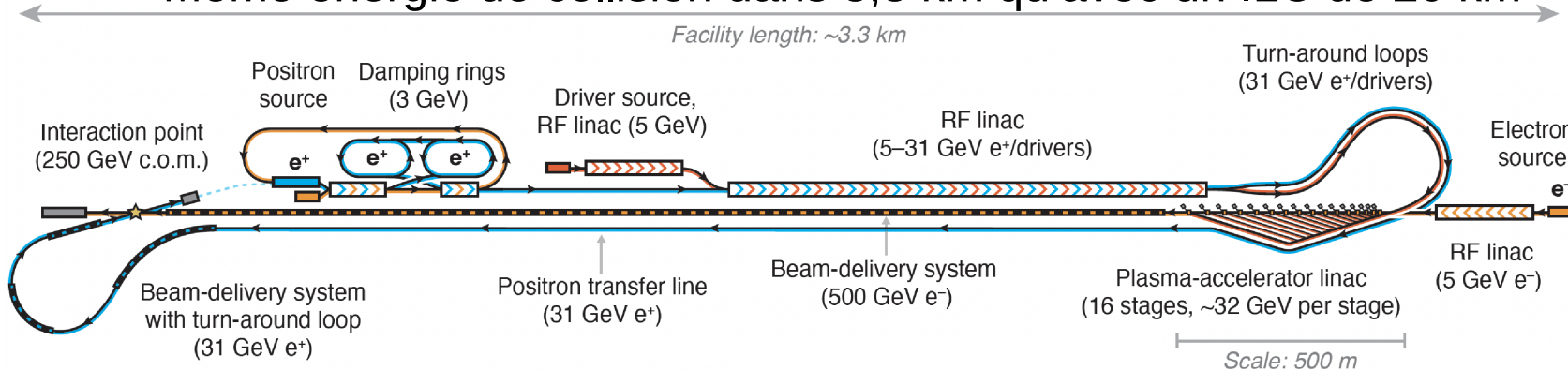


Accélération à champ de sillage plasma

- “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

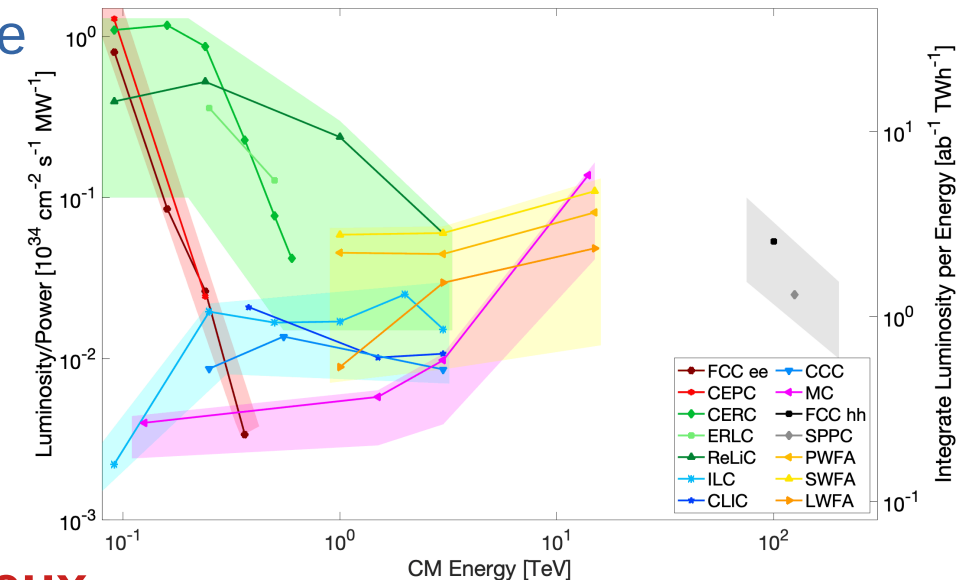
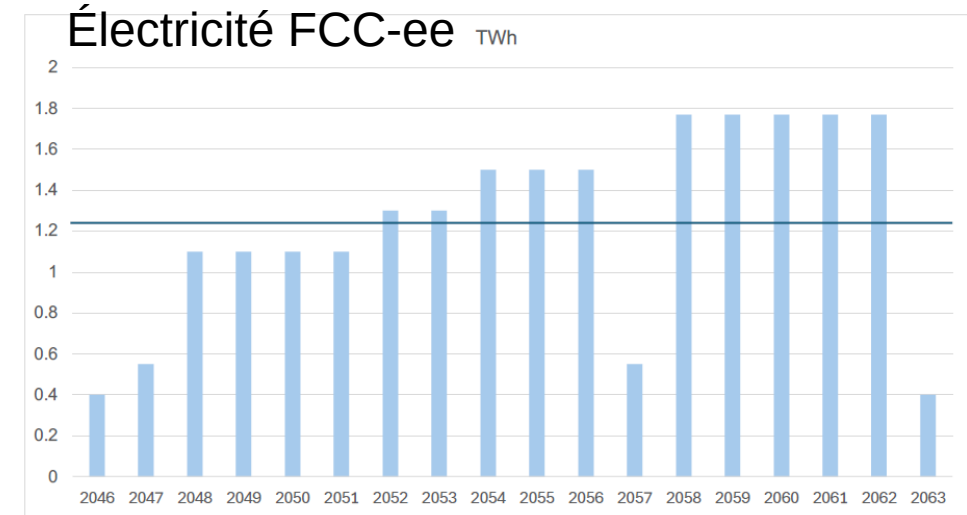


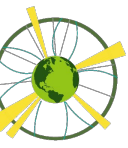
- **Gros projets ► gros impacts environnementaux**
- **Tentatives de minimisation** en optimisant le design
 - Longueur des tunnels, béton, extraction, localisation
 - Choix technologiques pour l'accélérateur/les détecteurs
 - Aimants
 - Cavités accélératrices / techniques d'accélération
 - Gaz de refroidissement/détection
 - Optimisation de la consommation électrique journalière/saisonnnière

- **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 ?
- Consommation électrique actuelle du CERN : 1,2 TWh/an
 - Dont LHC : 0,6 TWh/an. Avec HL-LHC : 1,4 TWh/an
 - 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**





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** ?



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.”*

- ▶ Pourtant, pour la science uniquement, bien d'avoir une machine plus tôt

■ 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 ?
 - Certain·es se posent la question

“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