Le grand collisionneur de hadrons et l'expérience CMS

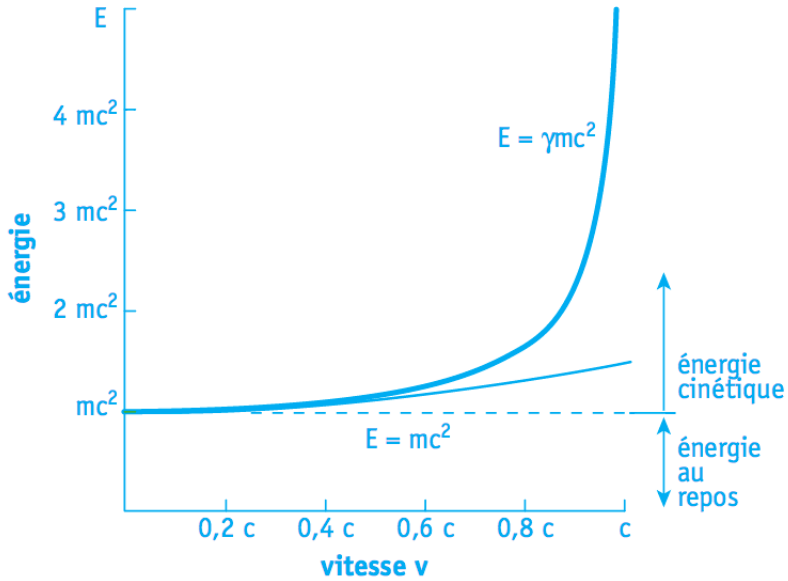
MasterClasses

Institut de Physique des deux Infinis – Lyon

Vitesse ou énergie ?

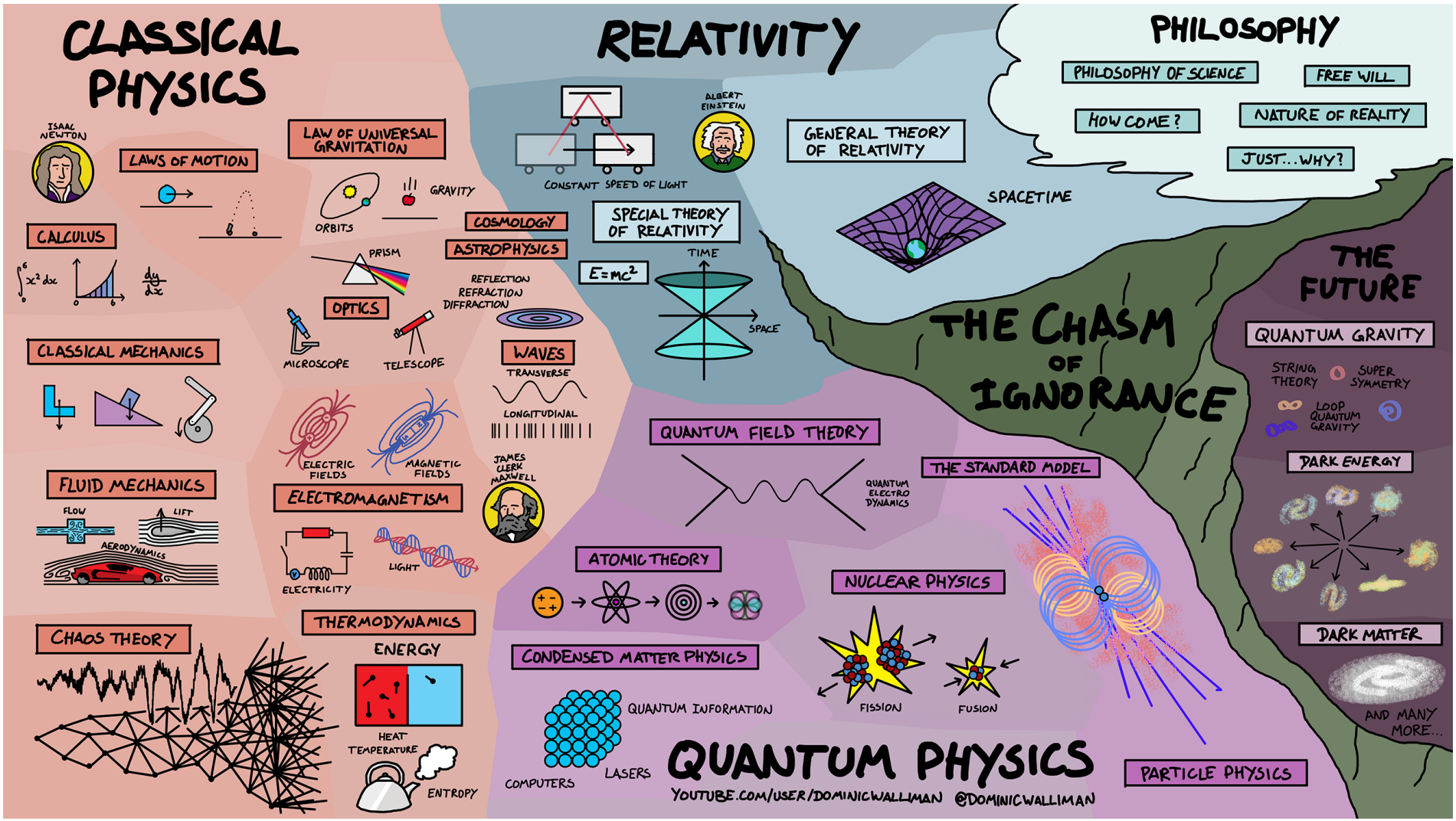
- Aucune particule ne peut dépasser la vitesse de $c = 299\,792\,458\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$.

v/c	E (proton)
0,999 997 828	450 GeV
0,999 999 991	7 TeV



- En physique des particules, on préfère donc se référer à l'énergie d'une particule.

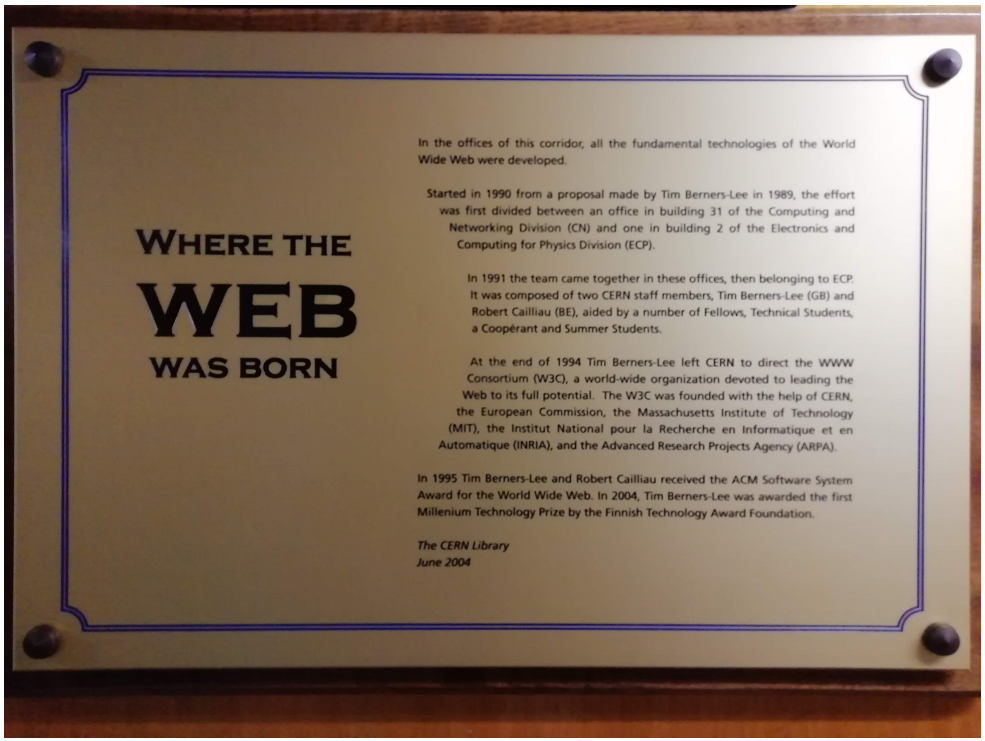
La physique *des particules*



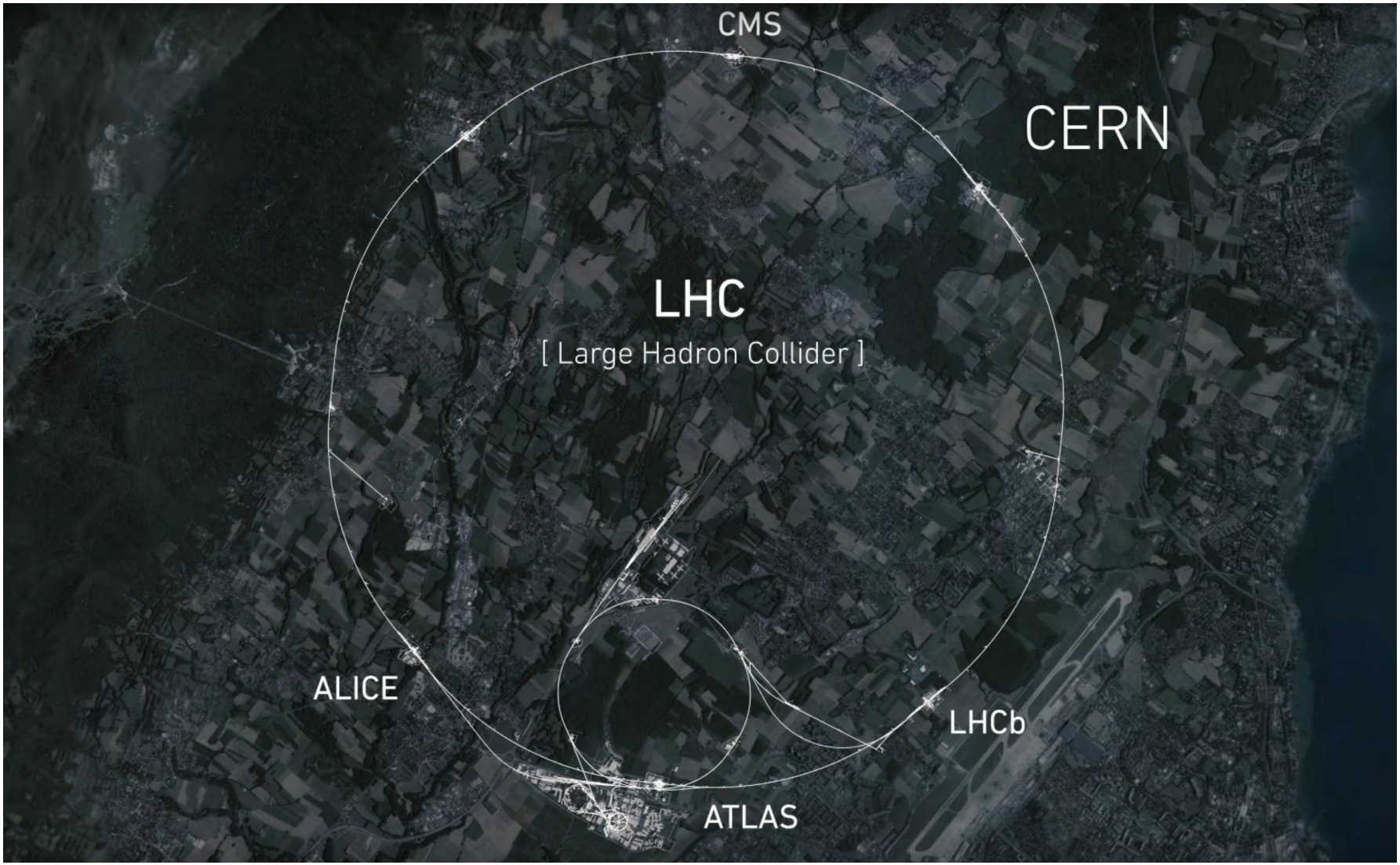
CERN : Organisation européenne pour la recherche nucléaire

De nombreuses innovations, par exemple...

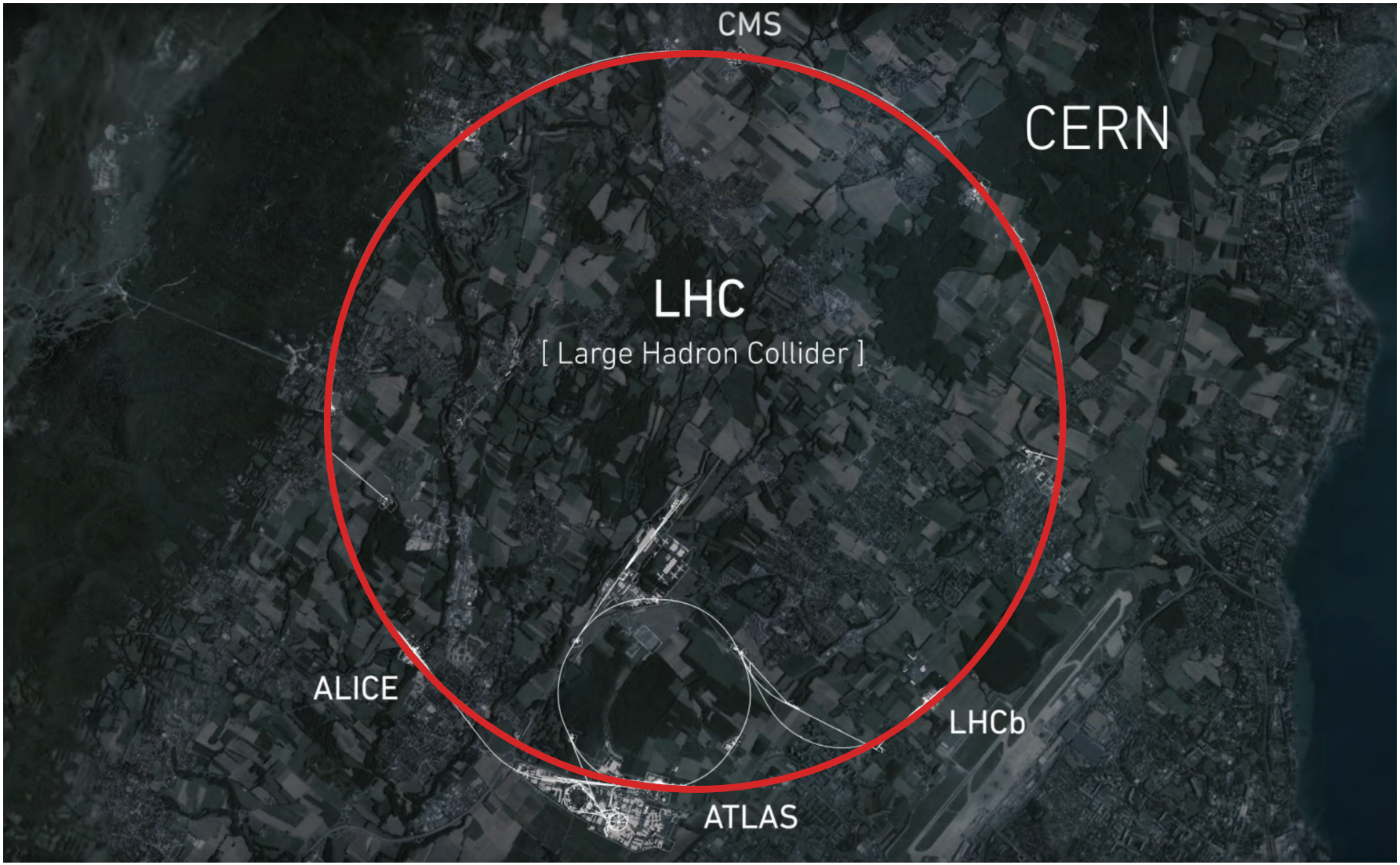
- Écrans tactiles
- Tomographie par émission de positrons
- Le Web



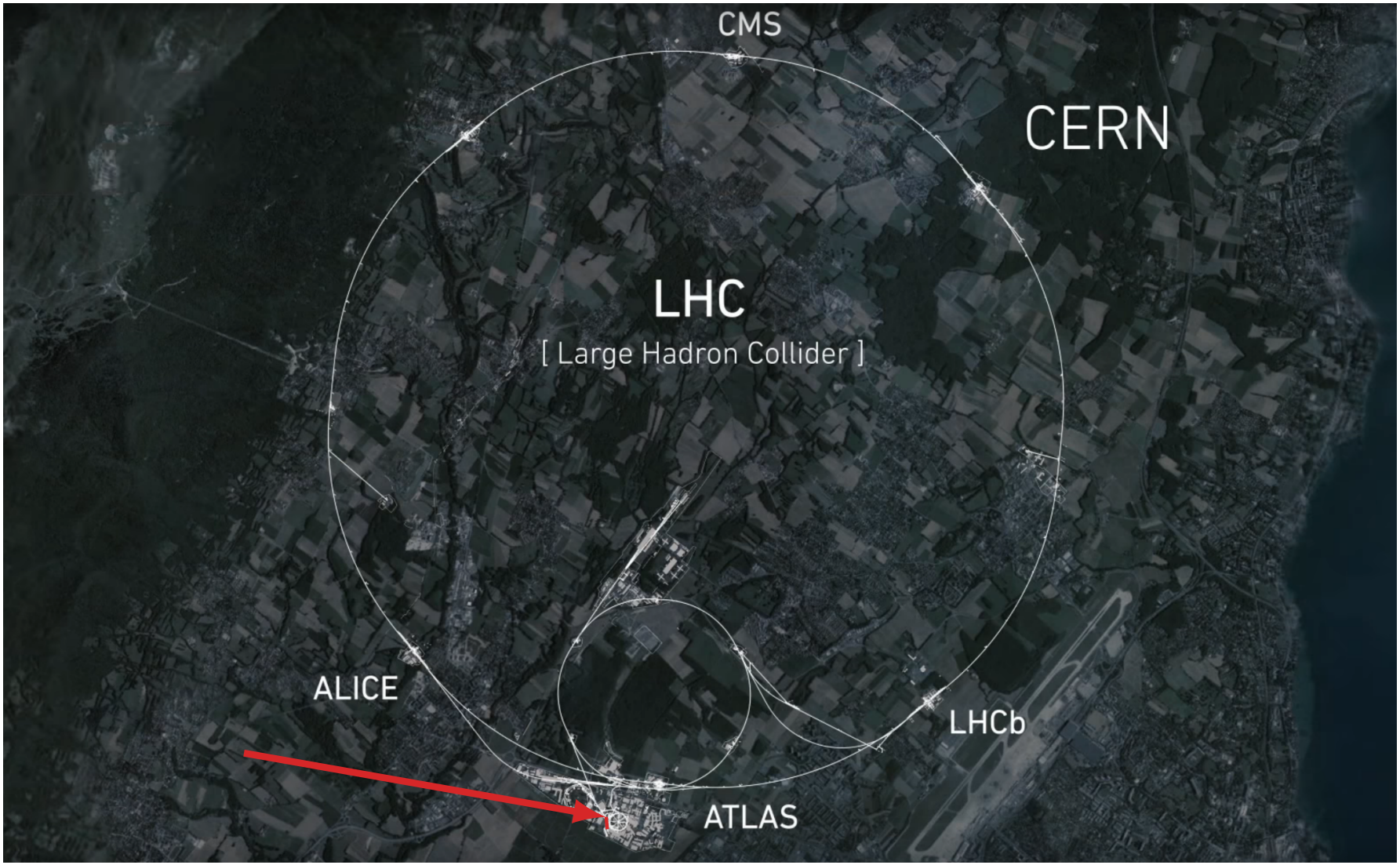
Le CERN ≠ LHC !



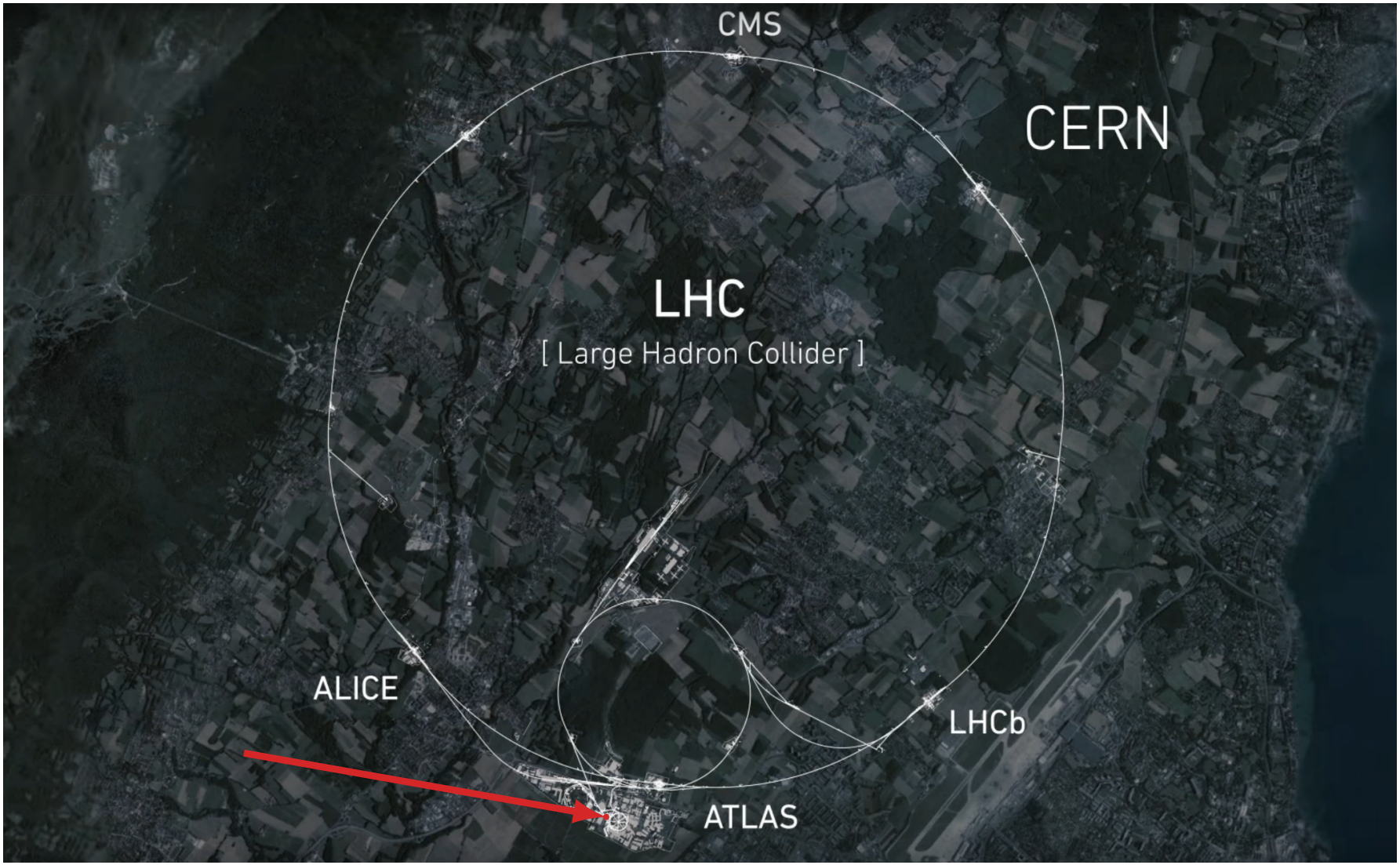
Le LHC



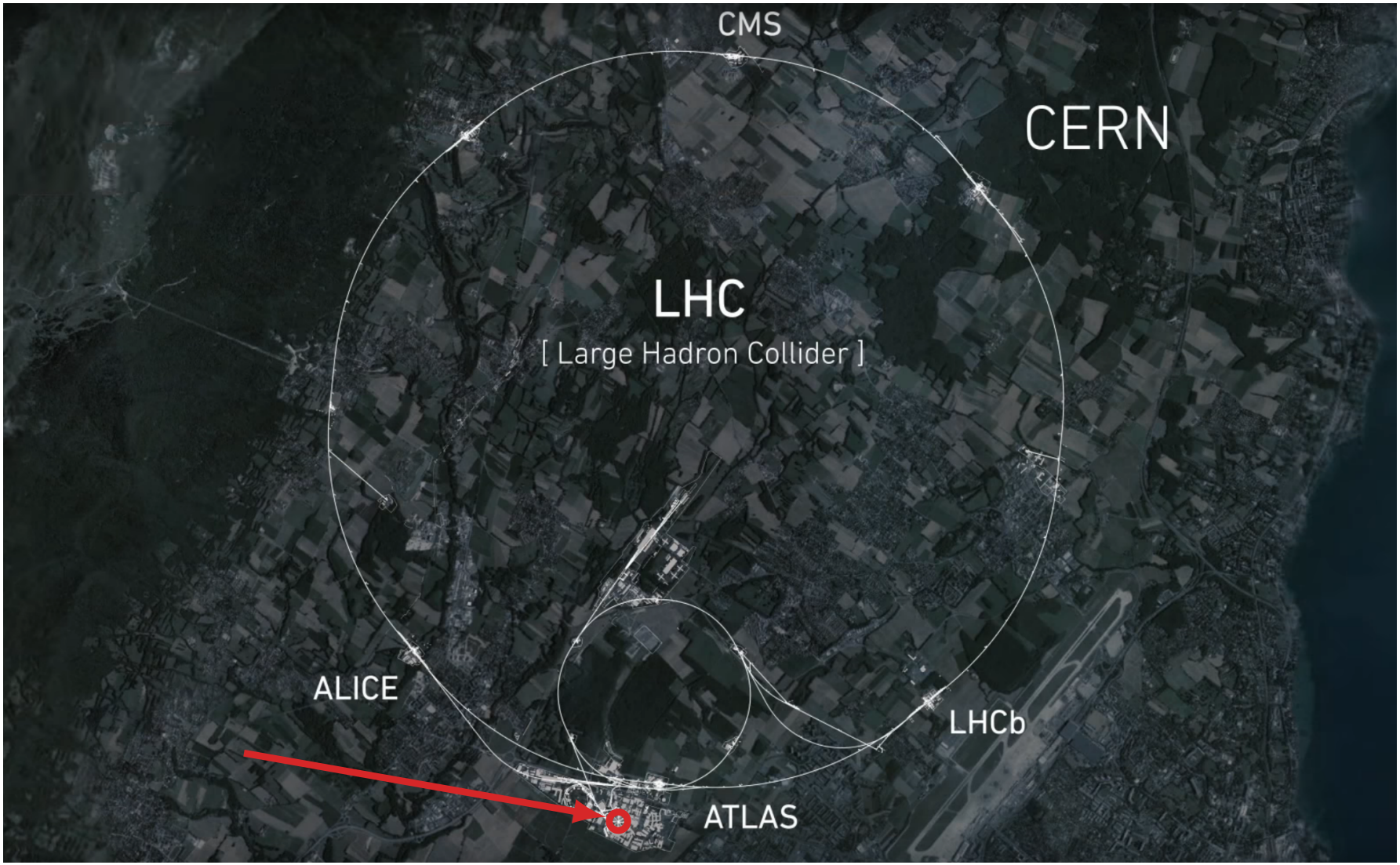
Le LHC, pré-accélération : LINAC2 (50 MeV)



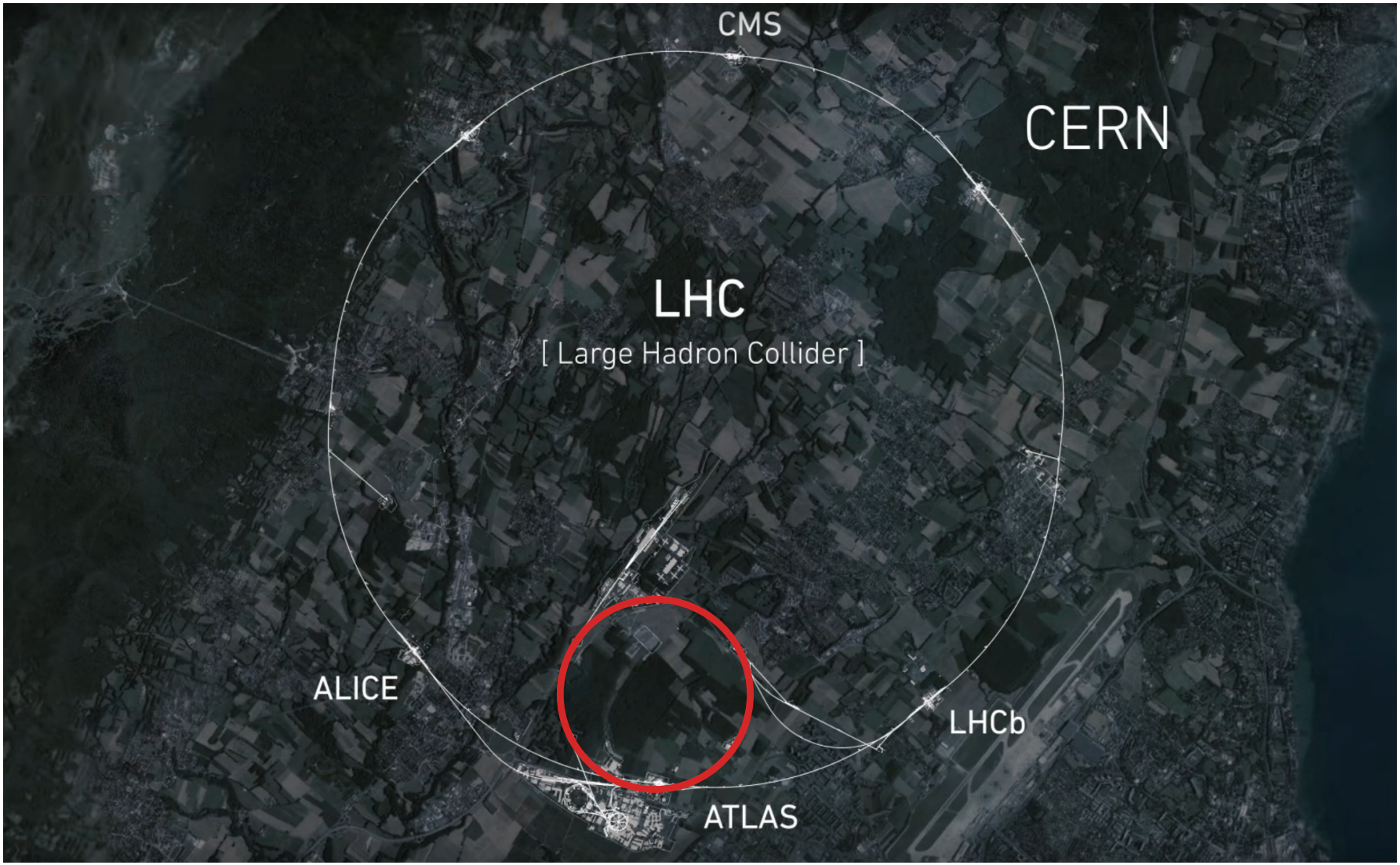
Le LHC, pré-accélération : Booster (1972, 157 m, 1,4 GeV)



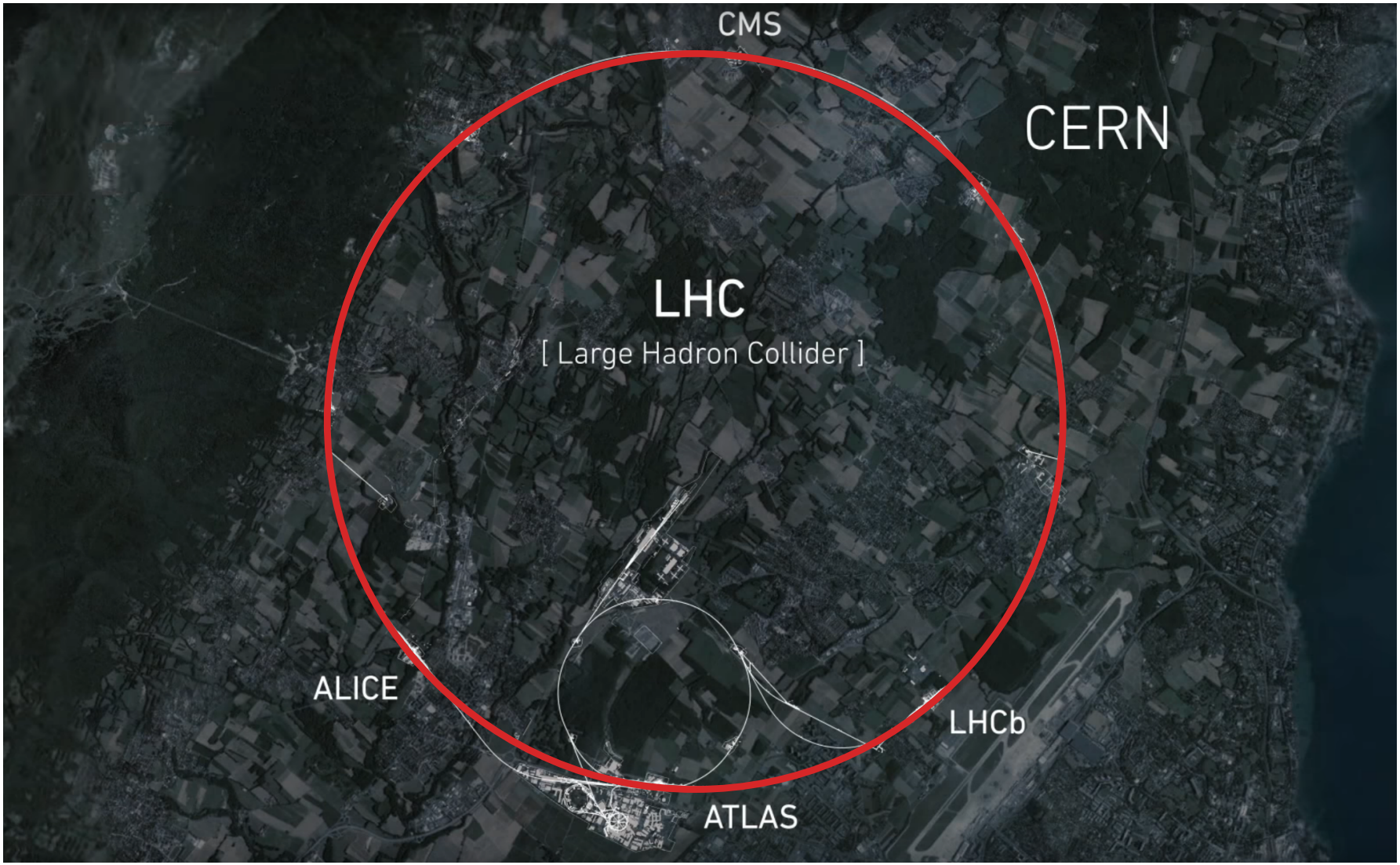
Le LHC, pré-accélération : PS (1959, 628 m, 25 GeV)



Le LHC, pré-accélération : SPS (1976, 7 km, 450 GeV)



Le LHC (2008, 27 km, 2×7 TeV)



Les enjeux du LHC

- Projet approuvé fin 1994.
- Tester le modèle standard.
- Observer, caractériser le boson de Higgs.

Les enjeux du LHC

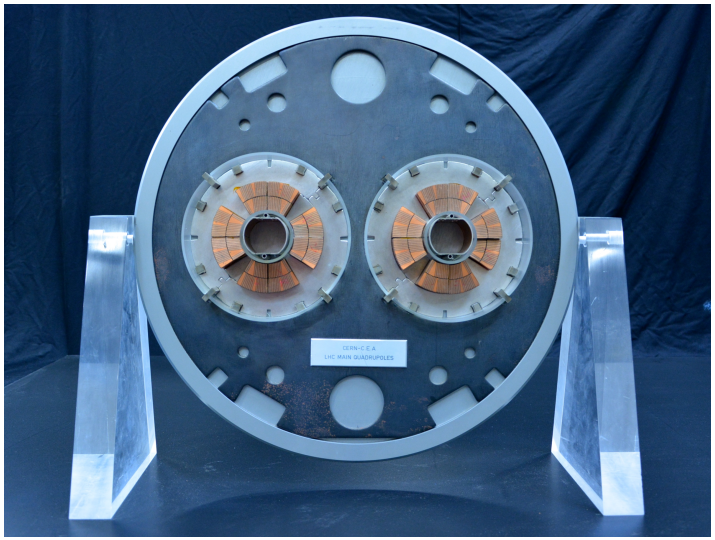
- Projet approuvé fin 1994.
- Tester le modèle standard.
- Observer, caractériser le boson de Higgs.
- Aller au-delà du modèle standard : tester la supersymétrie (SUSY), la théorie des cordes et d'autres modèles.
- Et bien d'autres ...

Caractéristiques du LHC

- 1200 aimants de $8{,}4\,\mathrm{T}$ supraconducteurs ($1{,}9\,\mathrm{K}$, plus froid que l'espace).

Caractéristiques du LHC

- 1200 aimants de $8{,}4\,\mathrm{T}$ supraconducteurs ($1{,}9\,\mathrm{K}$, plus froid que l'espace).



- Deux faisceaux de protons, un dans chaque sens.
- Le champ magnétique permet de courber leur trajectoire le long de l'anneau du LHC.

Caractéristiques du LHC : les faisceaux de protons

- 2808 paquets de protons par faisceau, $1{,}15 \times 10^{11}$ protons par paquet (avant collision).

Caractéristiques du LHC : les faisceaux de protons

- 2808 paquets de protons par faisceau, $1{,}15 \times 10^{11}$ protons par paquet (avant collision).
- 1 paquet = $30\,\mathrm{cm}$ de long, $\sim 1\,\mathrm{mm}$ de diamètre, $16\,\mu\mathrm{m}$ aux points d'interaction.

Caractéristiques du LHC : les faisceaux de protons

- 2808 paquets de protons par faisceau, $1{,}15 \times 10^{11}$ protons par paquet (avant collision).
- 1 paquet = $30\,\mathrm{cm}$ de long, $\sim 1\,\mathrm{mm}$ de diamètre, $16\,\mu\mathrm{m}$ aux points d'interaction.
- $25\,\mathrm{ns}$ entre chaque paquet $\Leftrightarrow 7{,}5\,\mathrm{m}$.
- Énergie portée par les deux faisceaux du LHC :

$$2 \times \underbrace{2808}_{\text{paquets/faisceau}} \times \underbrace{1{,}15 \times 10^{11}}_{\text{protons/paquet}} \times \underbrace{7 \times 10^{12}}_{\text{eV/proton}} \times \underbrace{1{,}6 \times 10^{-19}}_{\mathrm{J \cdot eV^{-1}}} = 723\,\mathrm{MJ}$$

Caractéristiques du LHC : les faisceaux de protons

- 2808 paquets de protons par faisceau, $1{,}15\times10^{11}$ protons par paquet (avant collision).
- 1 paquet = $30\,\mathrm{cm}$ de long, $\sim 1\,\mathrm{mm}$ de diamètre, $16\,\mu\mathrm{m}$ aux points d'interaction.
- $25\,\mathrm{ns}$ entre chaque paquet $\Leftrightarrow 7{,}5\,\mathrm{m}$.
- Énergie portée par les deux faisceaux du LHC :

$$2\times \underbrace{2808}_{\text{paquets/faisceau}} \times \underbrace{1{,}15\times10^{11}}_{\text{protons/paquet}} \times \underbrace{7\times10^{12}}_{\text{eV/proton}} \times \underbrace{1{,}6\times10^{-19}}_{\mathrm{J\cdot eV^{-1}}} = 723\,\mathrm{MJ}$$

- Énergie (cinétique) d'un TGV duplex ($m = 390\,\mathrm{t}$) à $220\,\mathrm{km/h}$:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\times 390\times10^3 \times \left(\frac{220}{3{,}6}\right)^2 = 728\,\mathrm{MJ}$$

- Consommation électrique équivalente au canton de Genève.

Caractéristiques du LHC : les collisions

- Les protons sont bien plus petits que le faisceau, $\sim 1\,\mathrm{fm} = 10^{-15}\,\mathrm{m}$.
- La plupart se croisent sans se voir $\rightarrow$ « seulement » 30 interactions par croisement.

Caractéristiques du LHC : les collisions

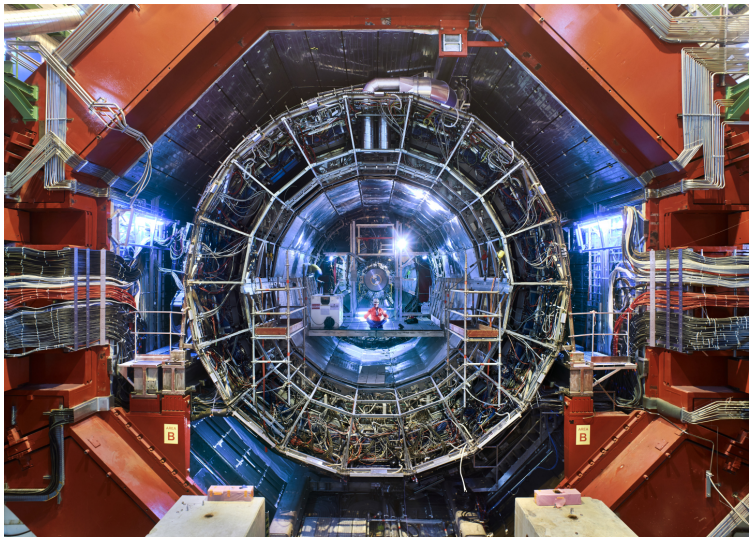
- Les protons sont bien plus petits que le faisceau, $\sim 1\,\mathrm{fm} = 10^{-15}\,\mathrm{m}$.
- La plupart se croisent sans se voir $\rightarrow$ « seulement » 30 interactions par croisement.
- 1 croisement de paquets toutes les $25\,\mathrm{ns} \Rightarrow$ 40 millions par seconde.
- Les faisceaux sont stables pendant une dizaine d'heures.
- Les protons ont alors parcouru l'équivalent d'un aller-retour Terre-Neptune.

Caractéristiques du LHC : les collisions

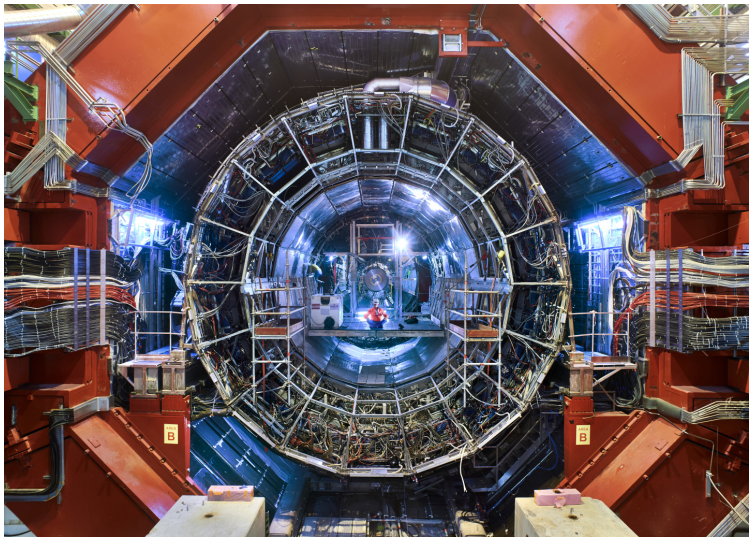
- Les protons sont bien plus petits que le faisceau, $\sim 1\,\mathrm{fm} = 10^{-15}\,\mathrm{m}$.
- La plupart se croisent sans se voir $\rightarrow$ « seulement » 30 interactions par croisement.
- 1 croisement de paquets toutes les $25\,\mathrm{ns} \Rightarrow$ 40 millions par seconde.
- Les faisceaux sont stables pendant une dizaine d'heures.
- Les protons ont alors parcouru l'équivalent d'un aller-retour Terre-Neptune.
- Objectif : savoir ce qu'il s'est passé lors des collisions.

Les quatre grandes expériences du LHC

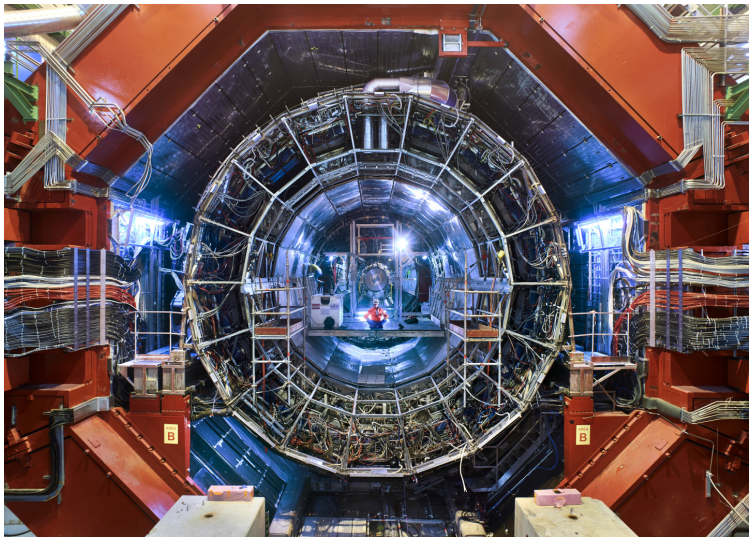
Les quatre grandes expériences du LHC

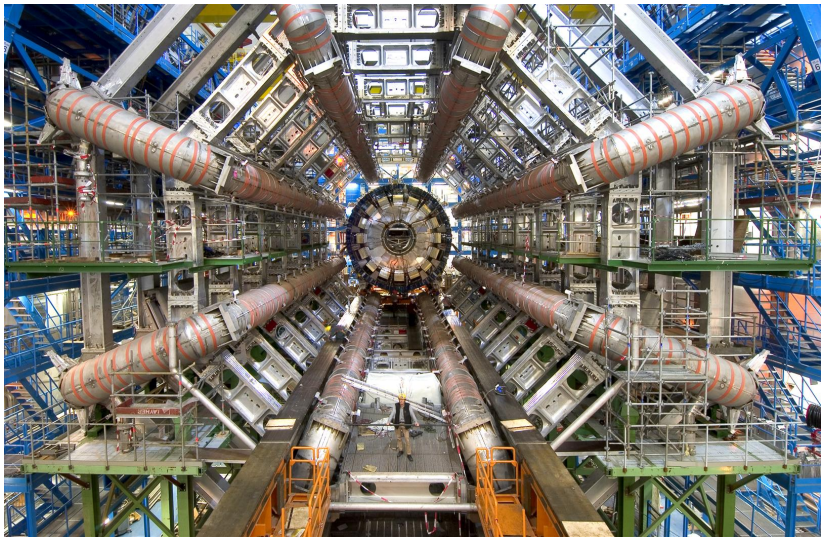


Les quatre grandes expériences du LHC

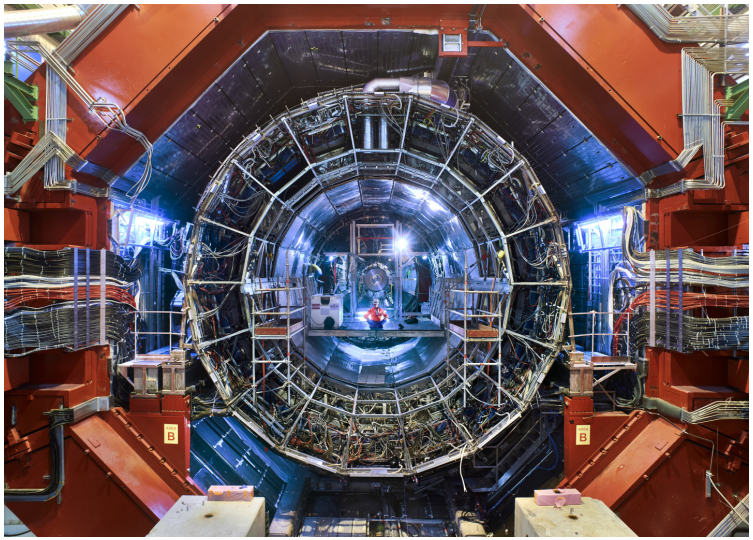


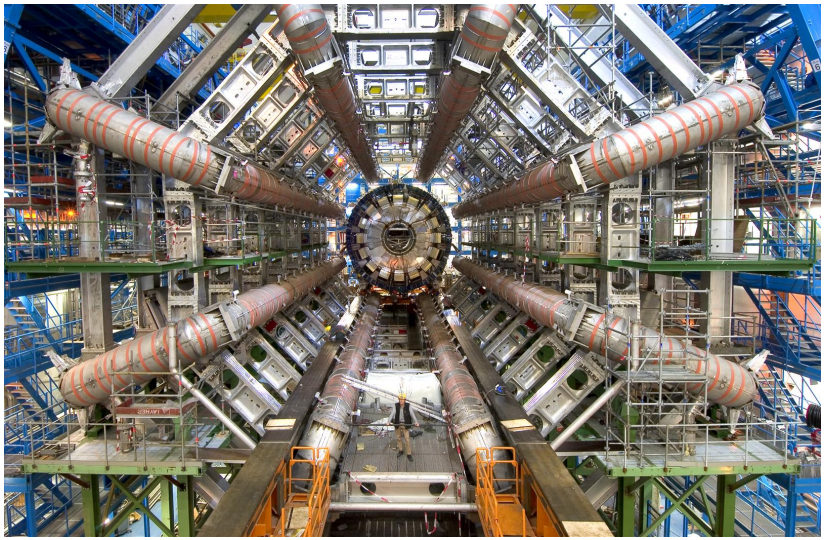
Les quatre grandes expériences du LHC

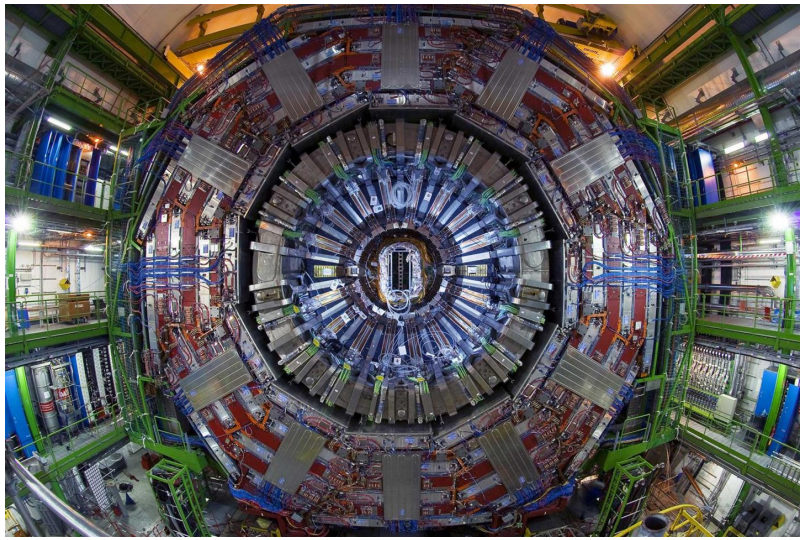


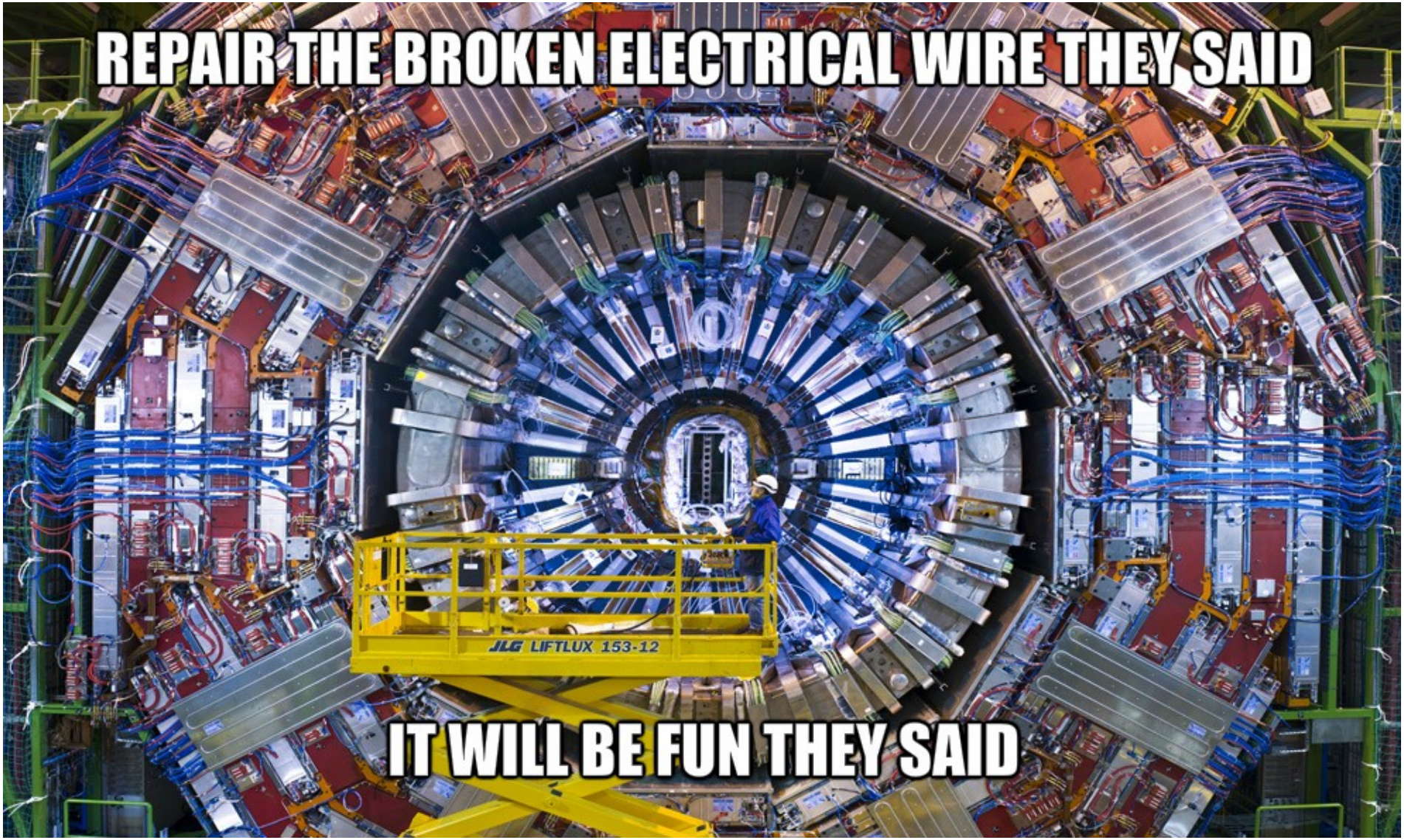


Les quatre grandes expériences du LHC








REPAIR THE BROKEN ELECTRICAL WIRE THEY SAID
JLG LIFTLUX 153-12
IT WILL BE FUN THEY SAID

Construction

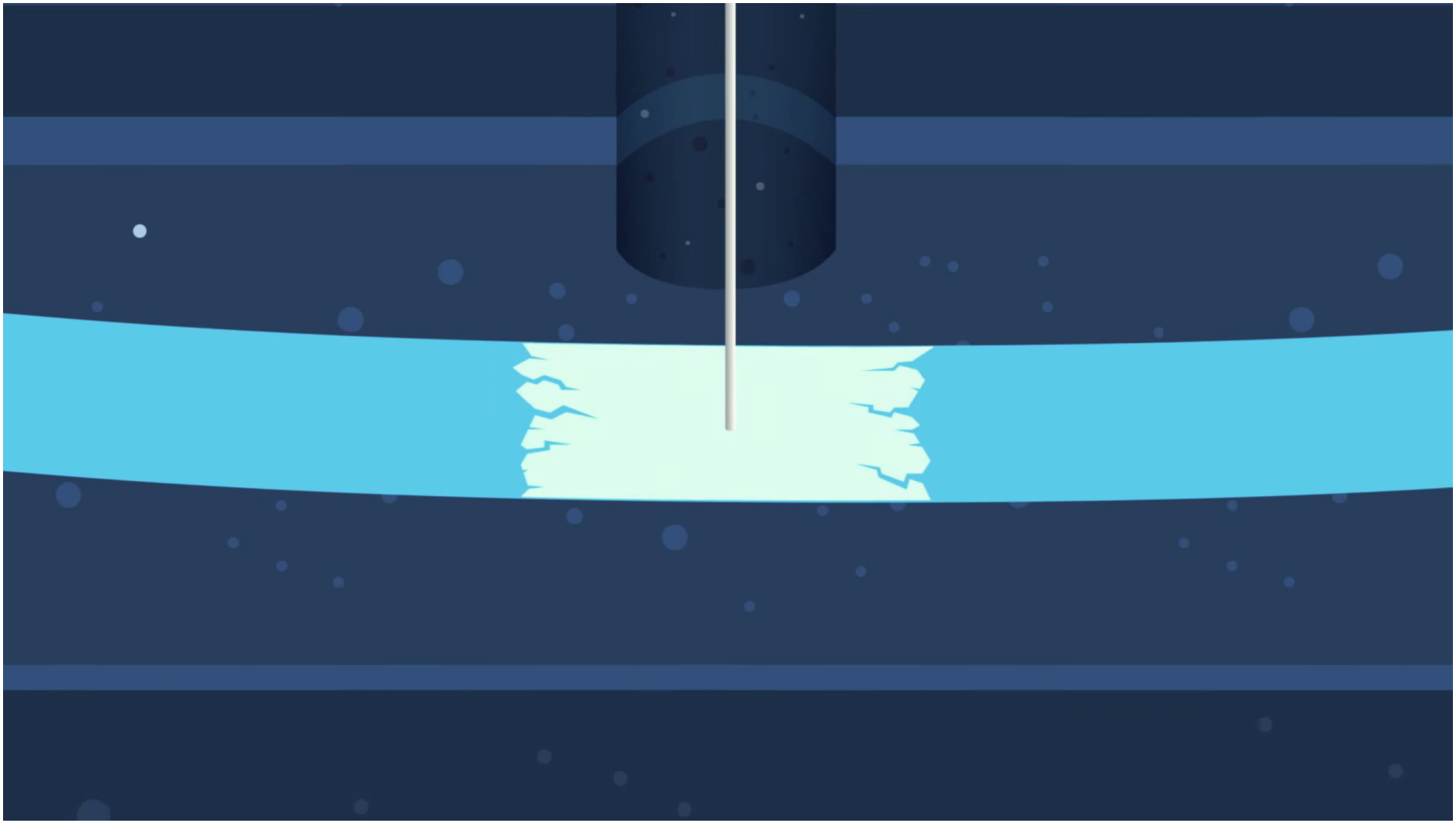
- Début des travaux à la fin des années 90 (ci-dessous le 18 mars 1998)

Construction

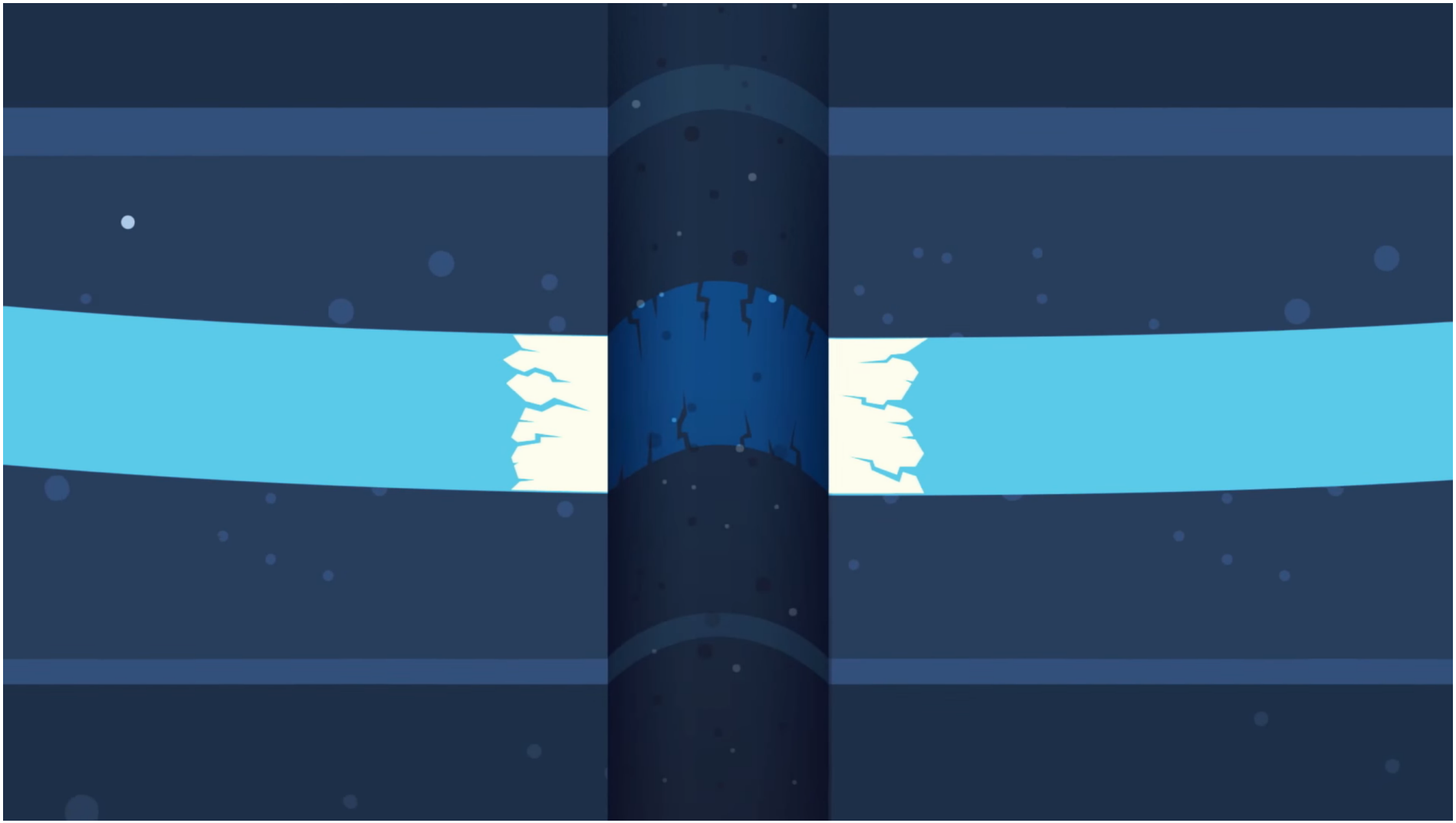
- Découverte des ruines d'une villa romaine

Construction : challenge de la nappe phréatique

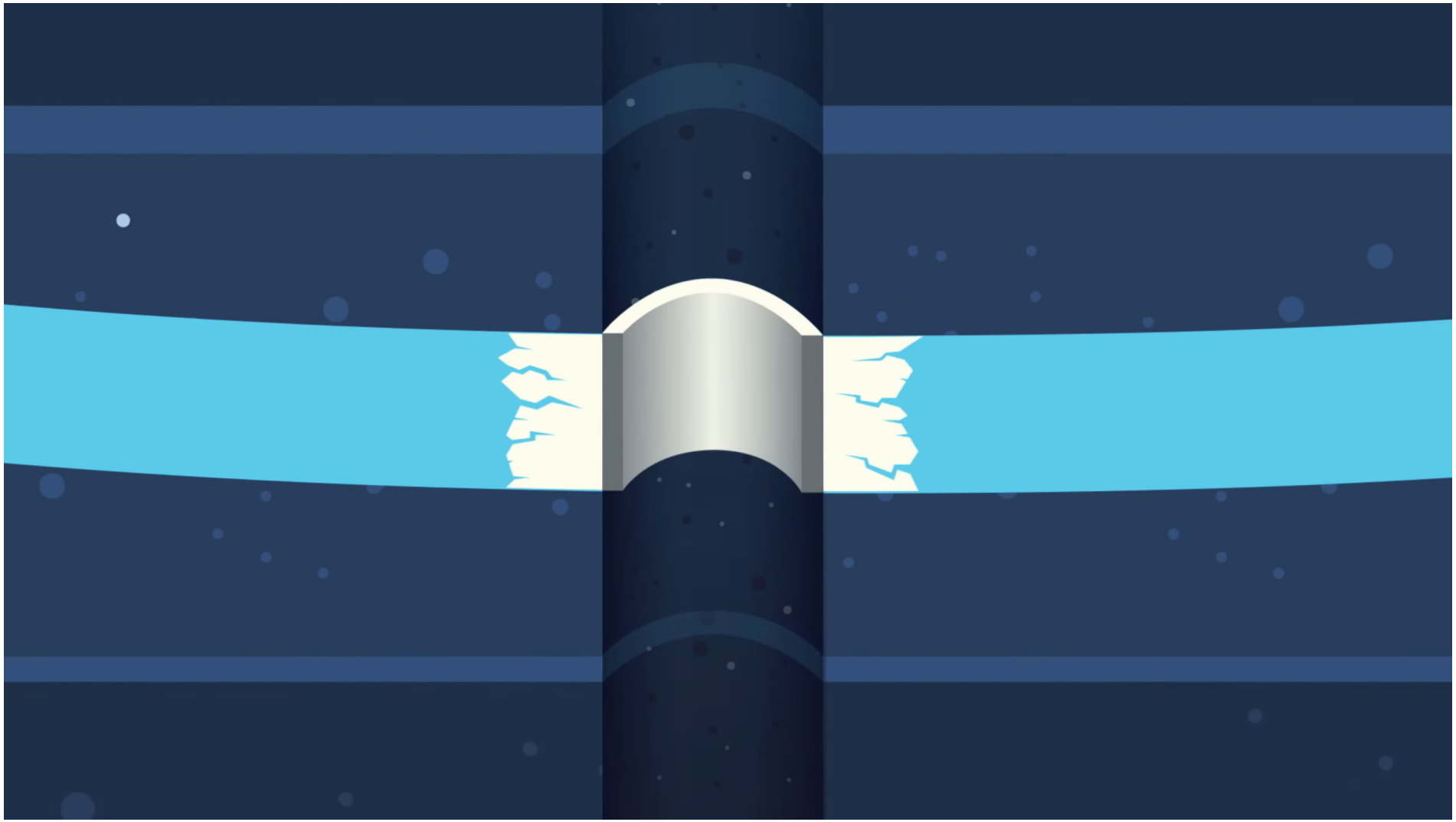
Construction : challenge de la nappe phréatique

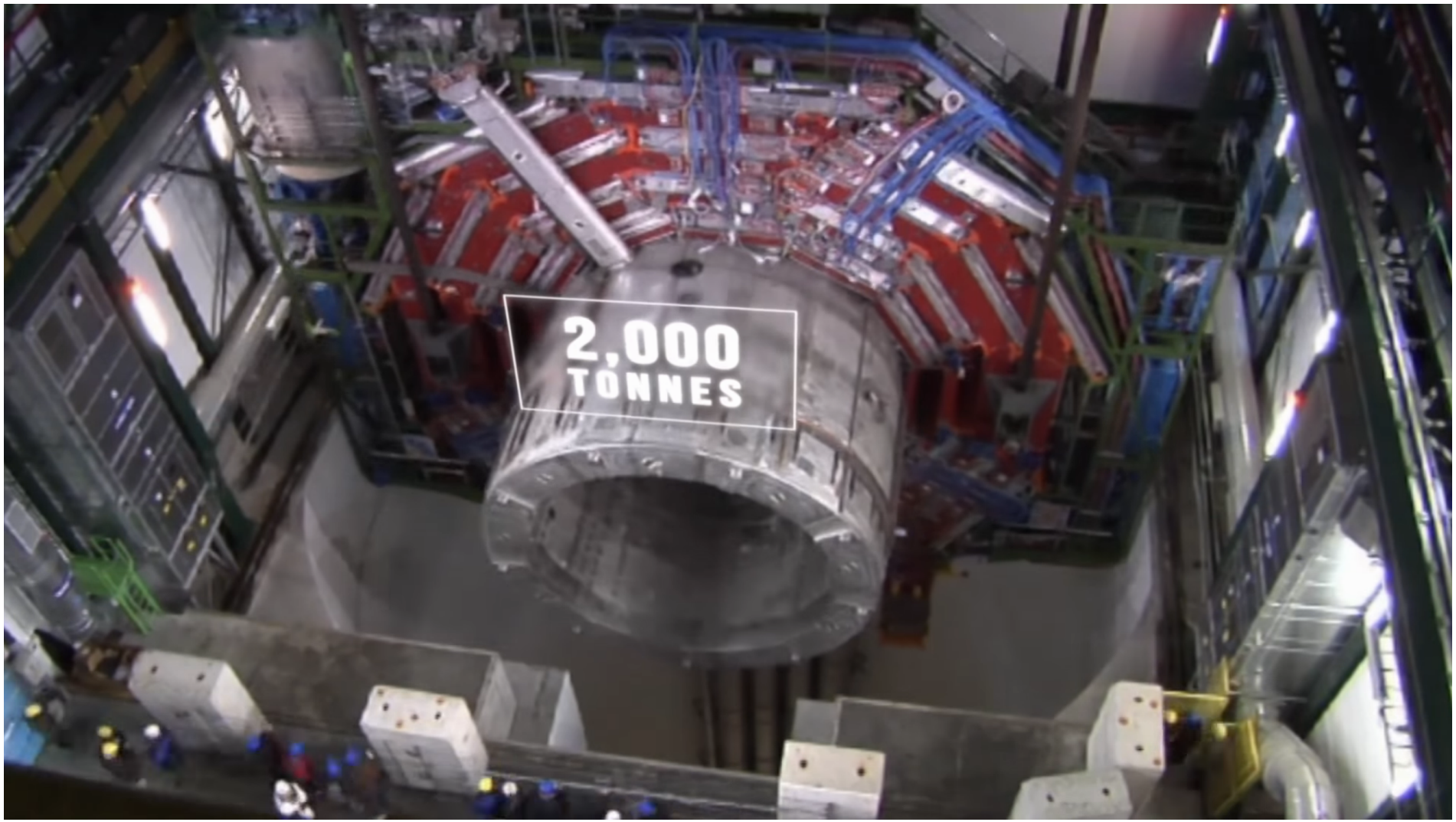


Construction : challenge de la nappe phréatique



Construction : challenge de la nappe phréatique




2,000
TONNES

CMS : une collaboration et un détecteur

- 2600 scientifiques dont 900 étudiants.
- 182 instituts dans 42 pays.

CMS : une collaboration et un détecteur

- 2600 scientifiques dont 900 étudiants.
- 182 instituts dans 42 pays.
- Détecteur cylindrique de $15\,\mathrm{m}$ de diamètre, $21{,}5\,\mathrm{m}$ de long, 14 000 tonnes.
- 550 millions de francs suisses.
- Plusieurs sous-détecteurs les uns autour des autres ... comme un oignon.

Le détecteur CMS – trajectographe

les particules chargées y laissent une trace de leur passage

$\longleftarrow 2\,\mathrm{m} \longrightarrow$

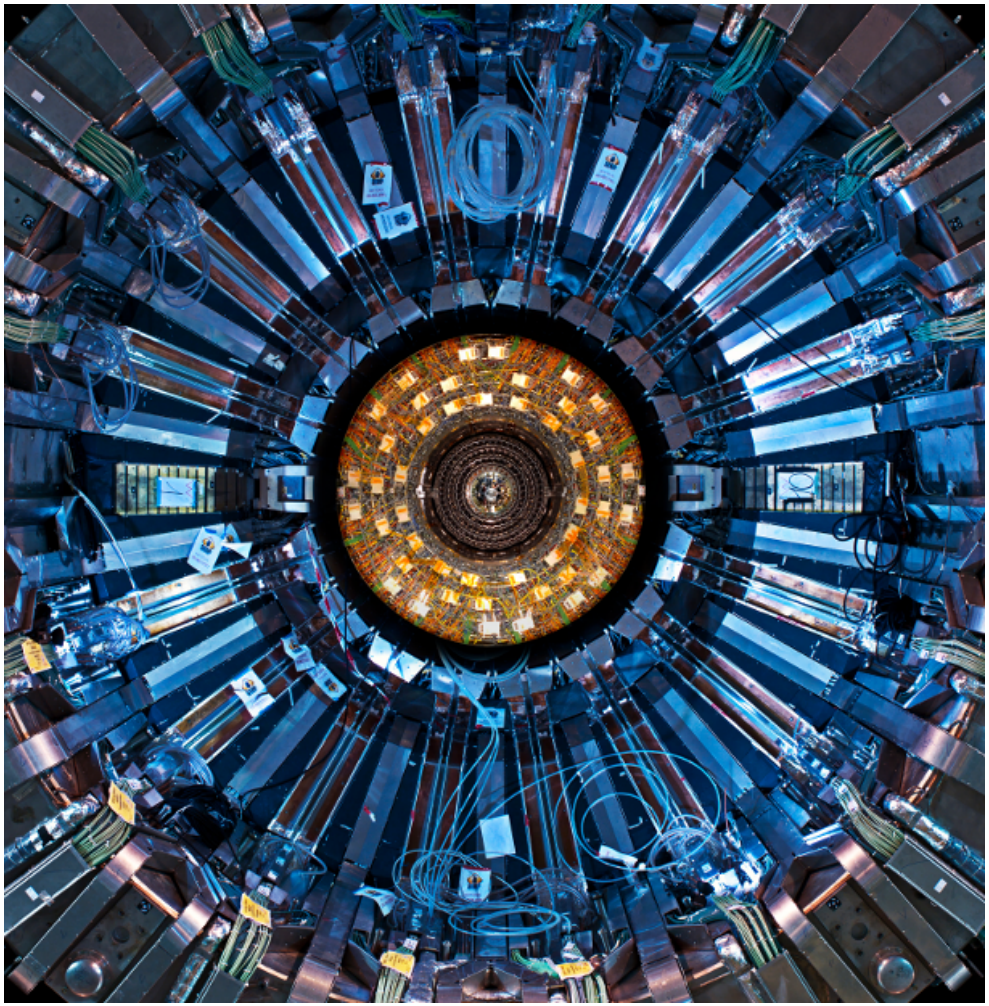
Le détecteur CMS – calorimètre électromagnétique (ECAL)

stoppe photons et électrons $\rightarrow$ mesure de leur énergie

$\longleftarrow$ 3 m $\longrightarrow$

Le détecteur CMS – calorimètre hadronique (HCAL)

stoppe les hadrons (protons, neutrons, ...) $\rightarrow$ mesure de leur énergie



$\longleftarrow$ 5 m $\longrightarrow$

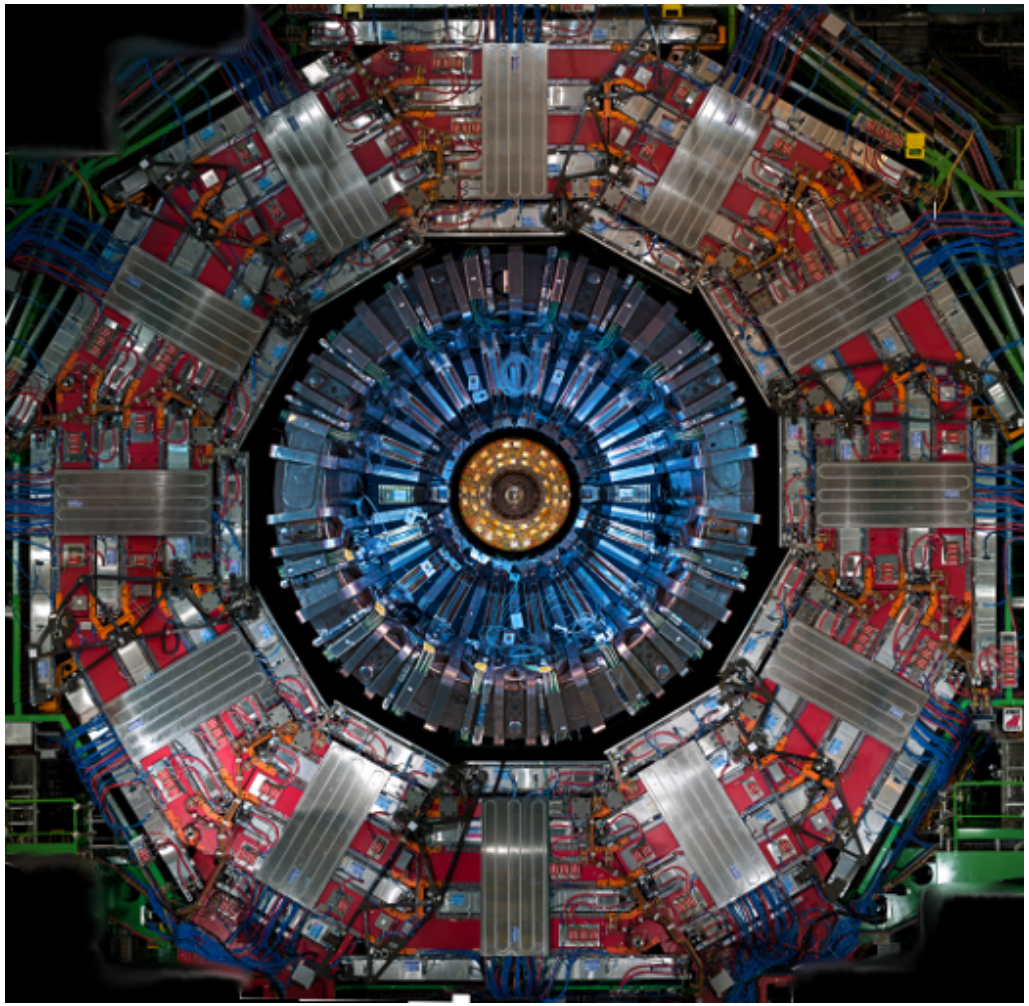
Le détecteur CMS – solénoïde supraconducteur

créé un champ magnétique de $4\,\mathrm{T}$ $\rightarrow$ courbe les trajectoires des particules chargées

$\longleftarrow 7\,\mathrm{m} \longrightarrow$

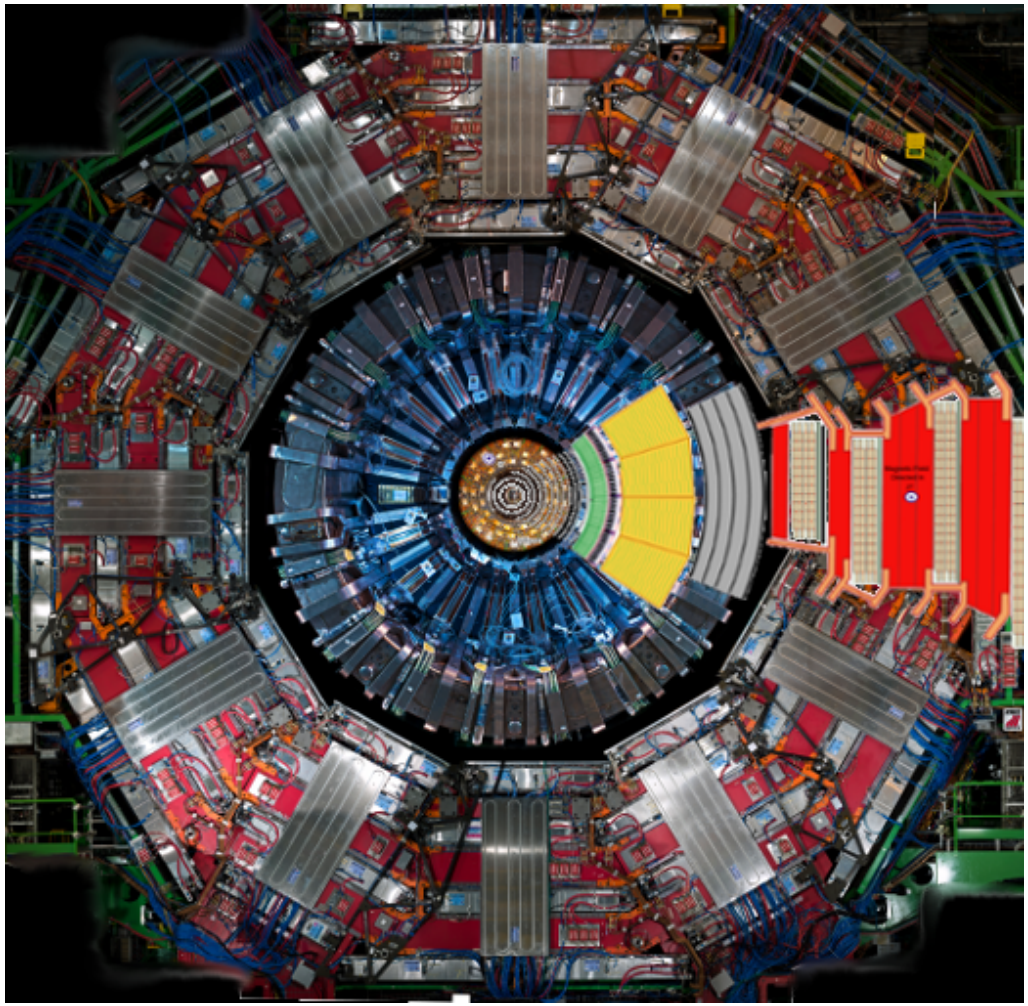
Le détecteur CMS – chambres à muons

les muons y laissent une trace de leur passage



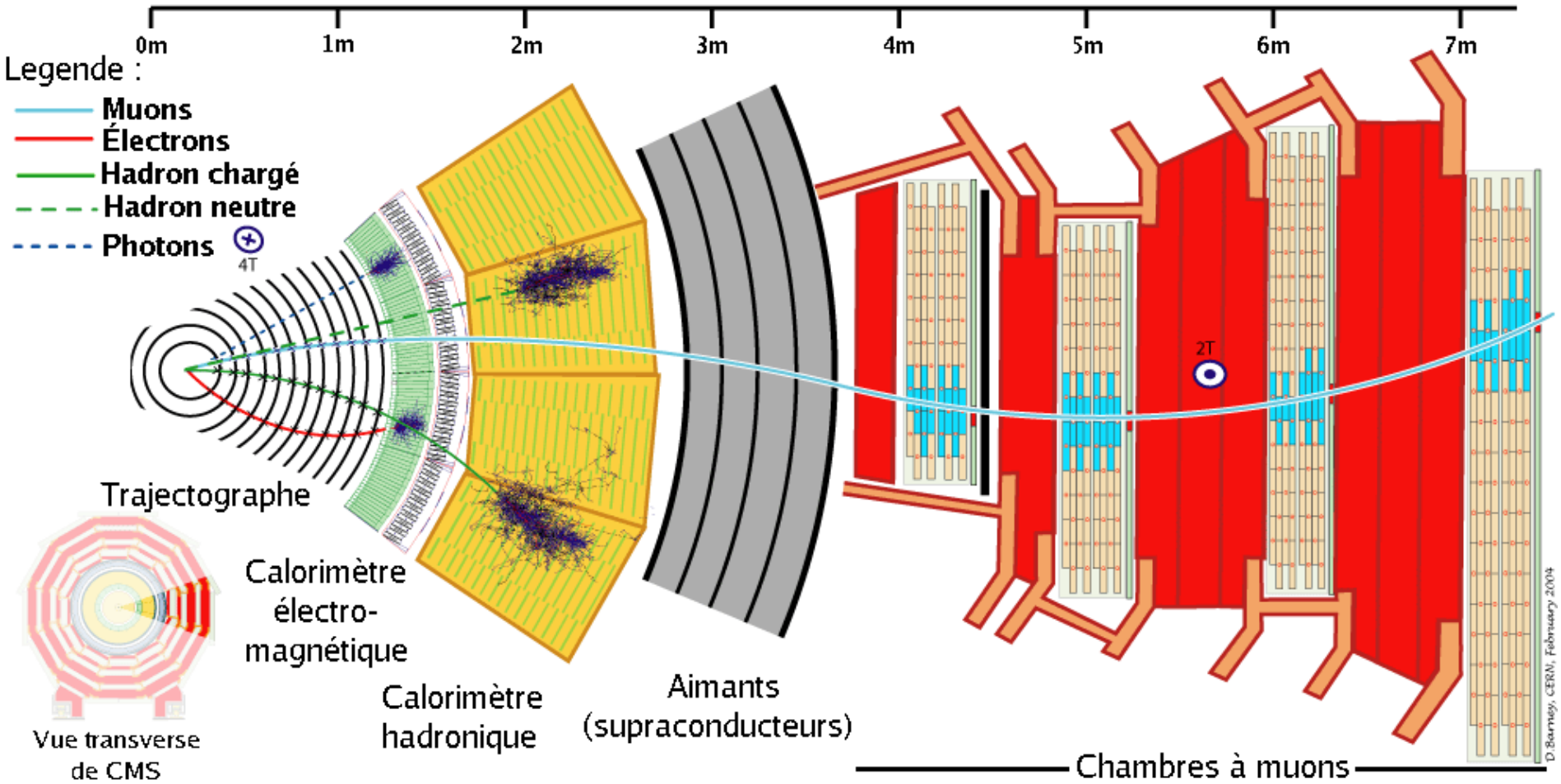
⟵ 15 m ⟶

Le détecteur CMS

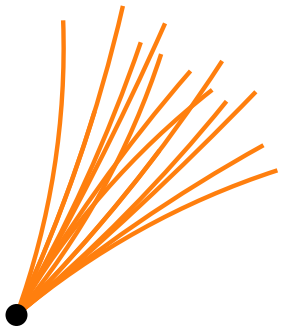


⟵ 15 m ⟶

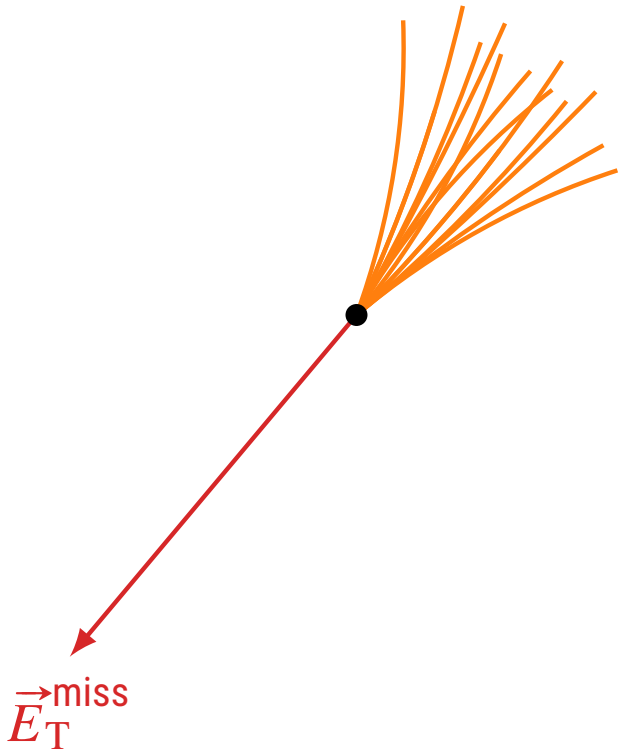
Le détecteur CMS



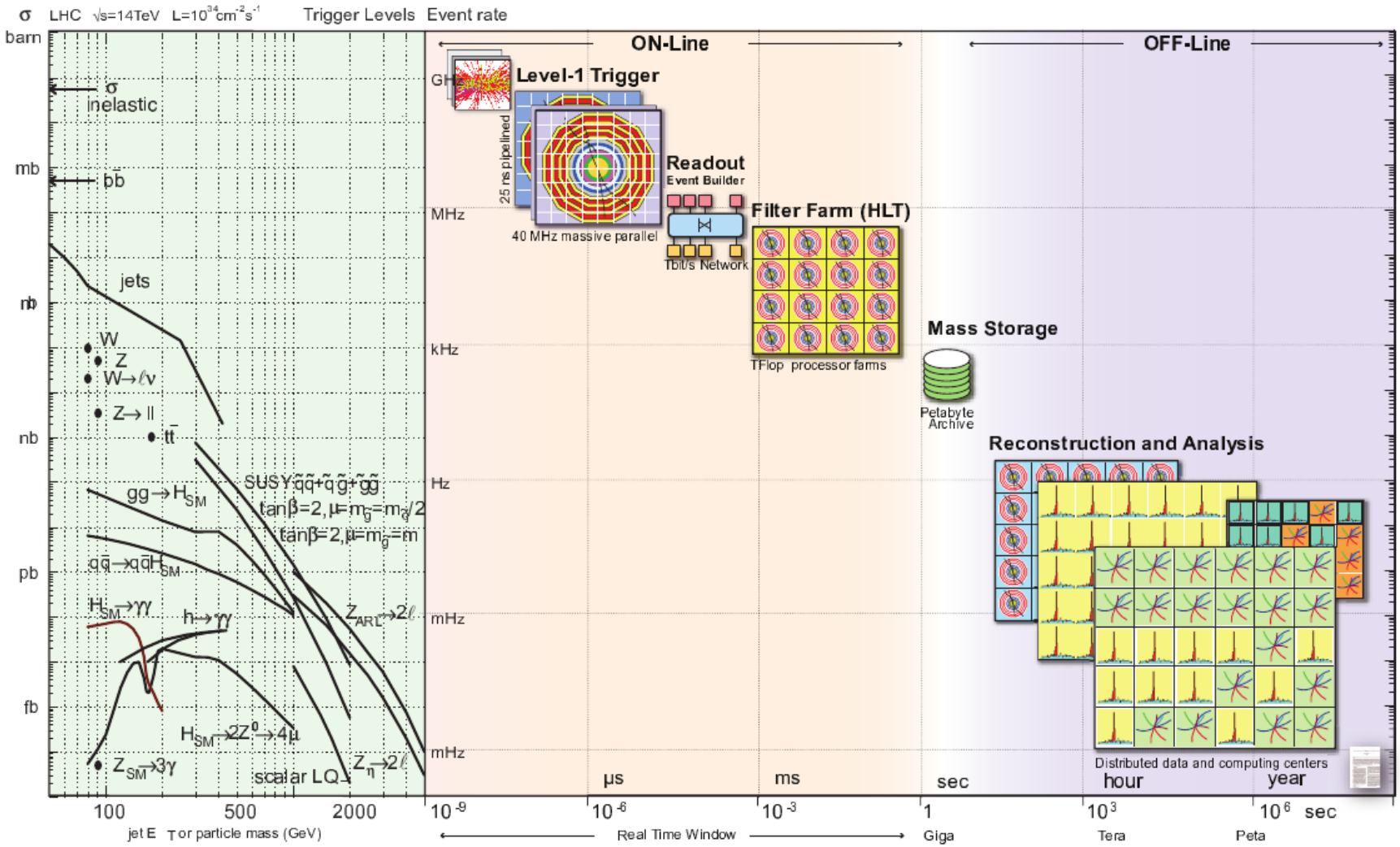
Les neutrinos et l'énergie transverse manquante (MET)



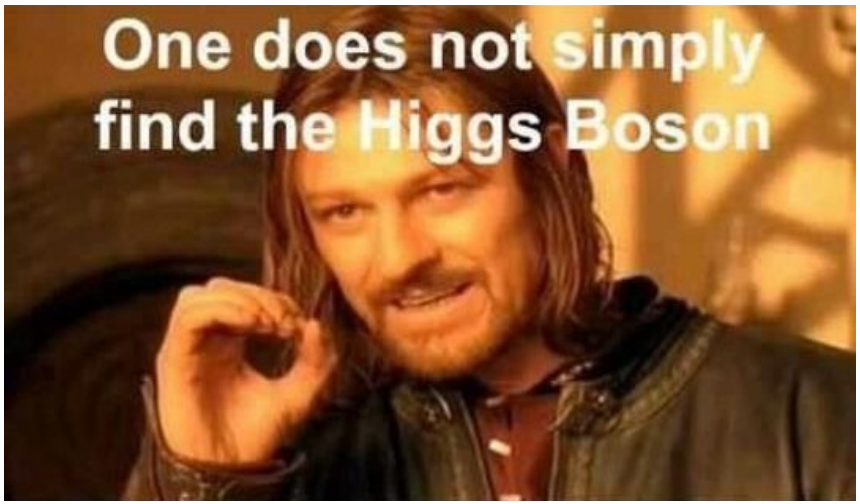
Les neutrinos et l'énergie transverse manquante (MET)



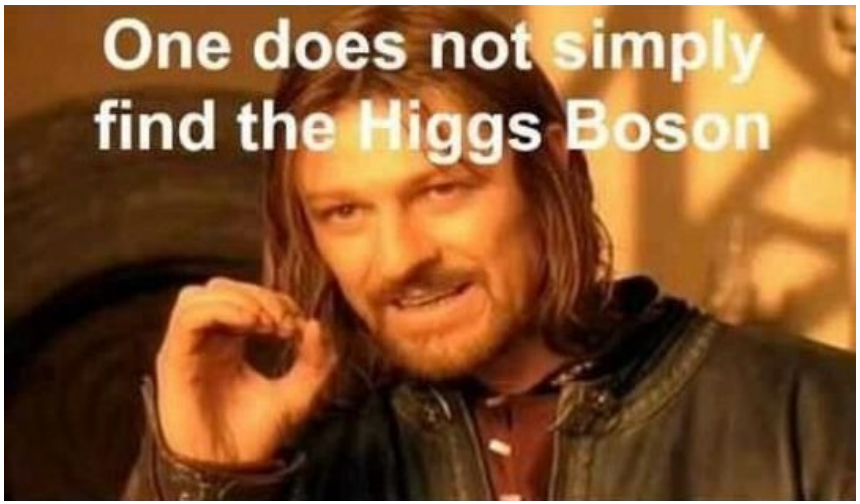
Trier et stocker les événements : 10 Go chaque seconde



Analyser les événements

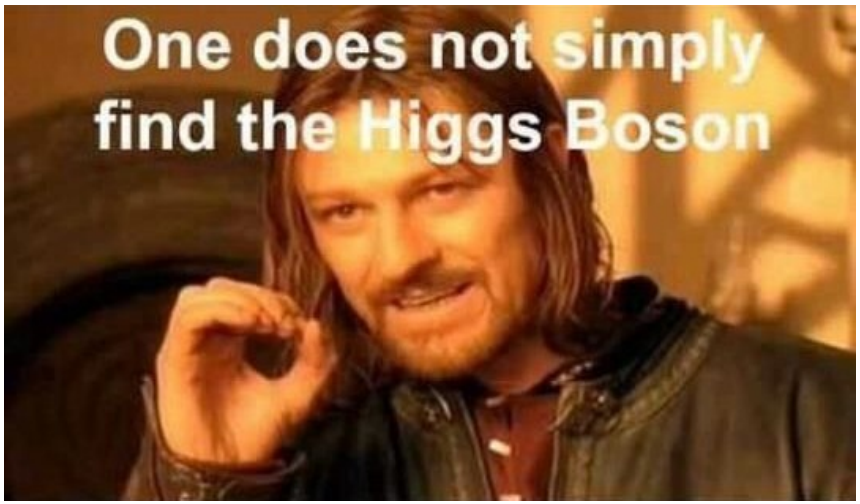


Analyser les événements



- On observe des événements pouvant contenir un Higgs.

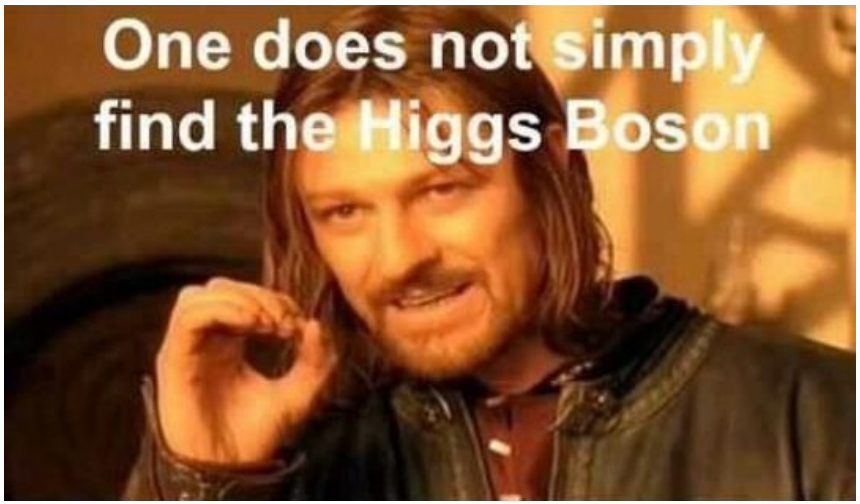
Analyser les événements



- On observe des événements pouvant contenir un Higgs.

- Expérience de comptage : combien d'événements semblent contenir un Higgs ?

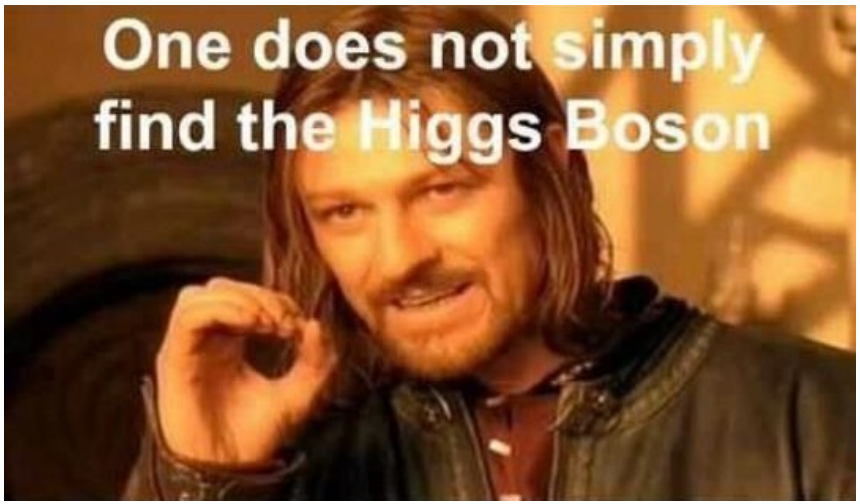
Analyser les événements



- On observe des événements pouvant contenir un Higgs.

- Expérience de comptage : combien d'événements semblent contenir un Higgs ?
- Comparer ce nombre au nombre d'événements qui sembleraient contenir un Higgs, si le Higgs n'existait pas.

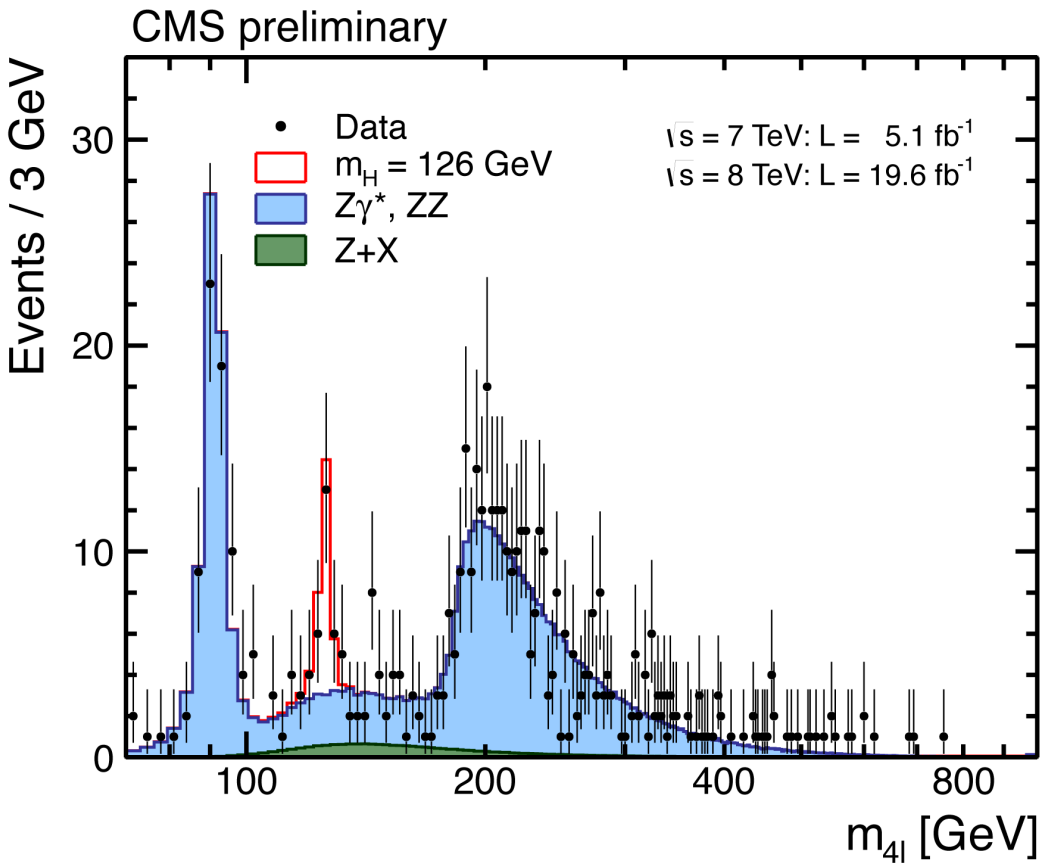
Analyser les événements



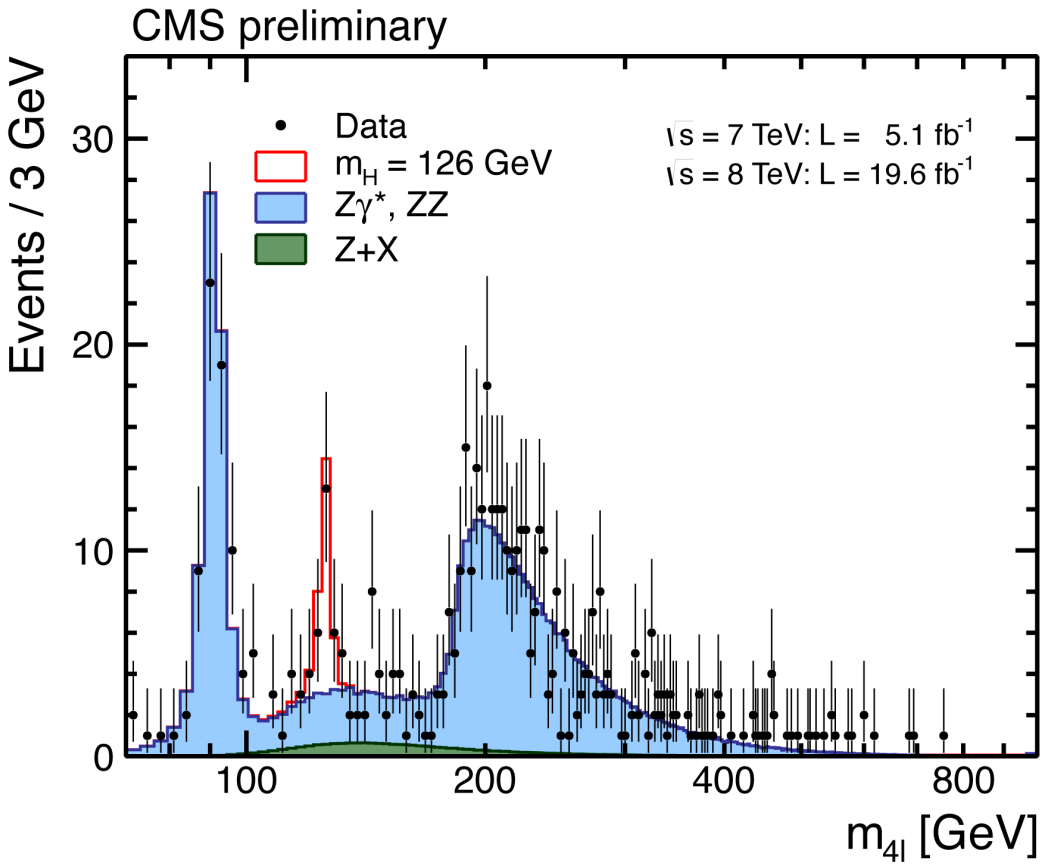
- On observe des événements pouvant contenir un Higgs.

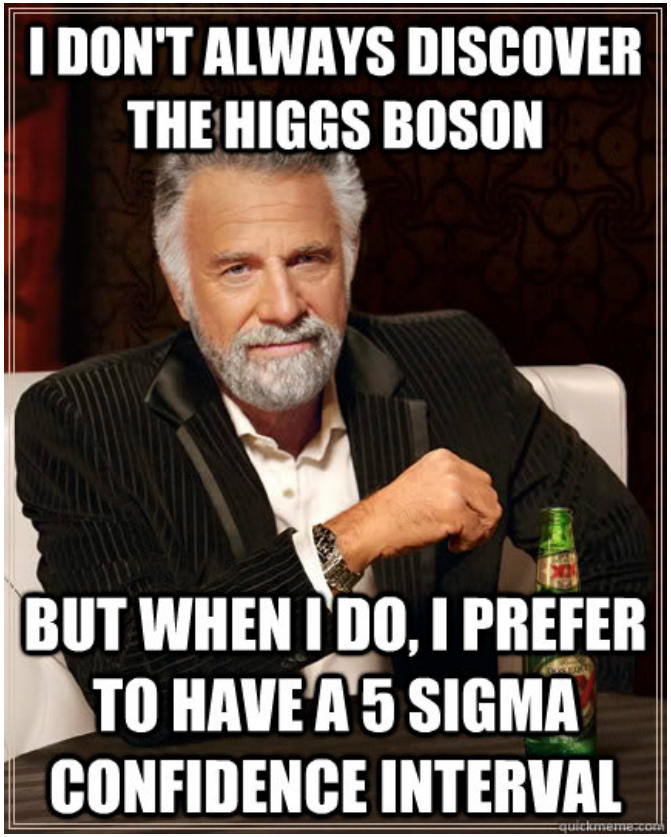
- Expérience de comptage : combien d'événements semblent contenir un Higgs ?
- Comparer ce nombre au nombre d'événements qui sembleraient contenir un Higgs, si le Higgs n'existait pas.
- S'il y a un écart suffisant, alors on a probablement trouvé le Higgs.

Découverte du Higgs

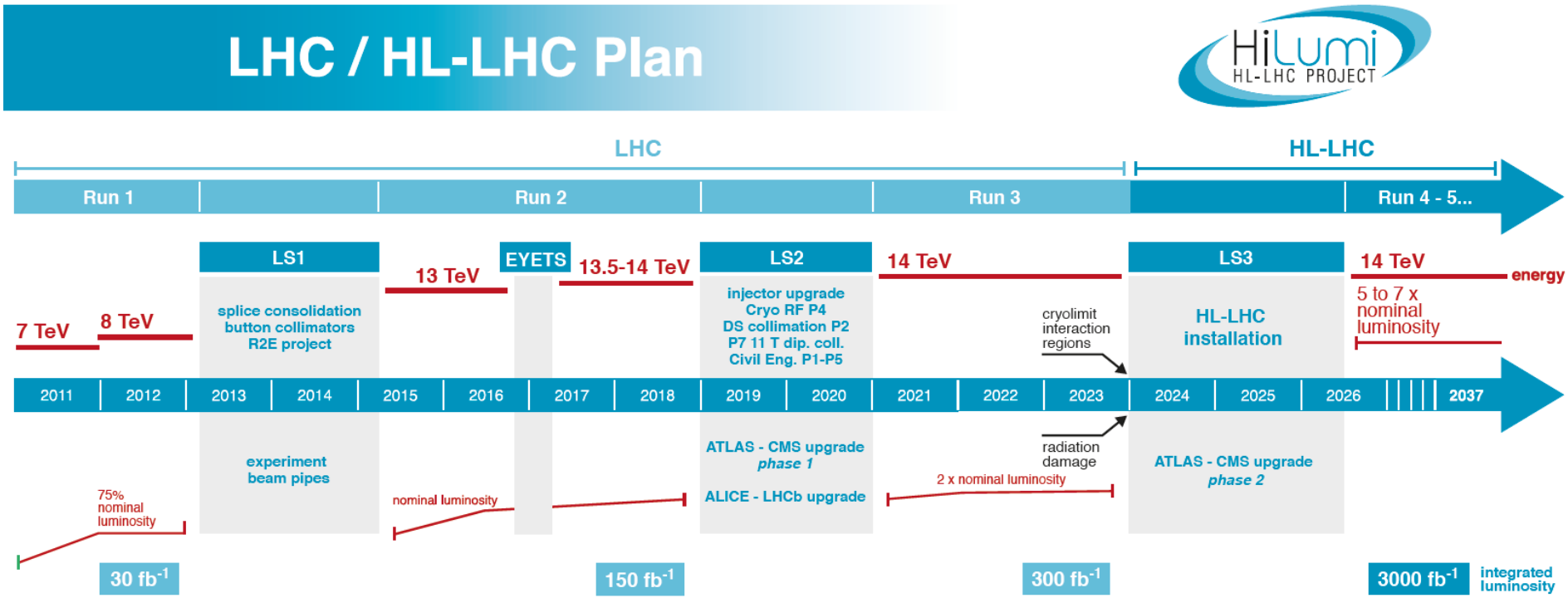


Découverte du Higgs





Prochaine étape ?



Merci pour votre attention !