



FUTURE  
CIRCULAR  
COLLIDER

# Le projet FCC

Luc Poggioli/luc.poggioli@cern.ch

- Introduction : La Physique des particules
  - Le Modèle Standard
- Accélérateurs & Détecteurs
  - LHC (CERN)
- Successeur du LHC
  - FCC : Future Circular Collider (CERN)

Cf. Présentation de Didier lundi

# La Recherche fondamentale

- Observer
- Généraliser/abstraire
- Formaliser
  - Expliquer
  - Prédire
  - Unifier
- Exemples
  - La classification périodique des éléments
    - Compréhension et prédiction des réactions chimiques
  - La Gravitation

# La Recherche fondamentale

- Observer
- Généraliser/abstraire
- Formaliser
  - Expliquer
  - Unifier (quand c'est possible)
  - Prédire
- Exemples
  - La classification périodique des éléments
    - Compréhension et prédiction des réactions chimiques
  - La **Gravitation**

- Chute des corps
- Différents objets/vitesse/angle
- Force de pesanteur /accélération/Lois de Képler
- Attraction universelle (Newton)
- Découverte de Neptune

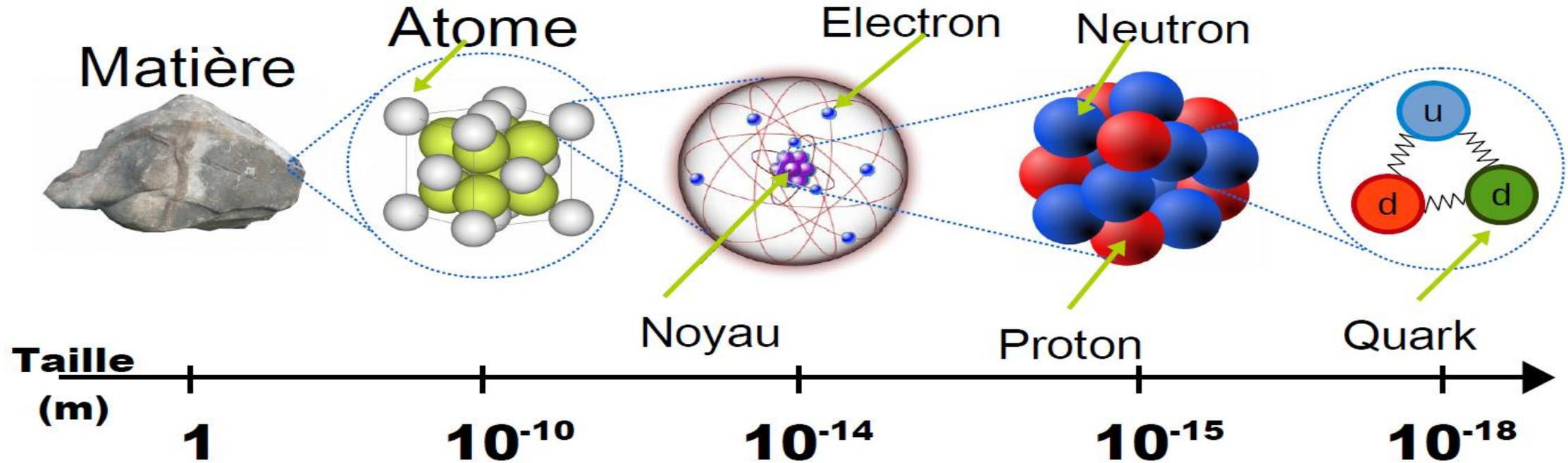
# Sur le terrain (au LPNHE)

- Concevoir **expérience** pour valider/invalidier **théorie**
- S'assurer de la validité des résultats
  - Extraire les **signaux** des **bruits** de fond
  - Eliminer biais, sources d'**erreurs**
    - Statistiques
    - Systématiques
- En fonction des résultats
  - Asseoir théorie existante **OU** fournir éléments pour nouvelle théorie
- Aller-Retours constants entre expérience/théorie

# La physique des particules

- But
  - Compréhension des forces fondamentales qui régissent l'Univers
- Moyens
  - Étude des constituants ultimes de la matière et de leurs interactions
    - Éliminer les effets collectifs (atomiques, nucléaires) et accéder aux forces fondamentales
- Comment
  - Regarder à très petite distance/très haute énergie/très haute température/très tôt dans l'histoire de l'Univers
  - Echelles d'énergie
    - eV atome MeV ( $\times 10^6$ ) noyau GeV ( $\times 10^9$ ) particules élémentaires TeV ( $\times 10^{12}$ )

# Les particules élémentaires

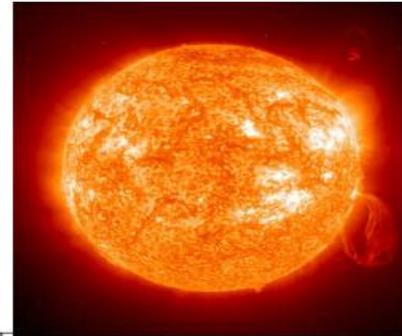
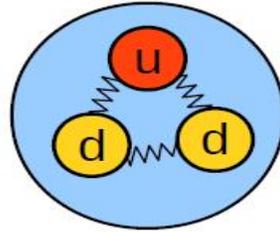


→ Les **électrons** et **quarks** (années 1960) sont des particules élémentaires : **sans sous-structure**

→ Masse  $\sim 10^{-30}$  kg, taille  $< 10^{-18}$  m !

# Les interactions

Nous décrivons la nature par **4 interactions fondamentales**, qui résultent de l'échange de **particules médiatrices**



Interaction	<b>Electro magnétique</b>	<b>Forte</b>	<b>Faible</b>	Gravita- tionelle
Mediateur	Photon $\gamma$	Gluon $g$	3 bosons $W^+$ , $W^-$ , $Z$	(graviton ?)
Intensité relative	1	100	$10^{-12}$	$10^{-38}$

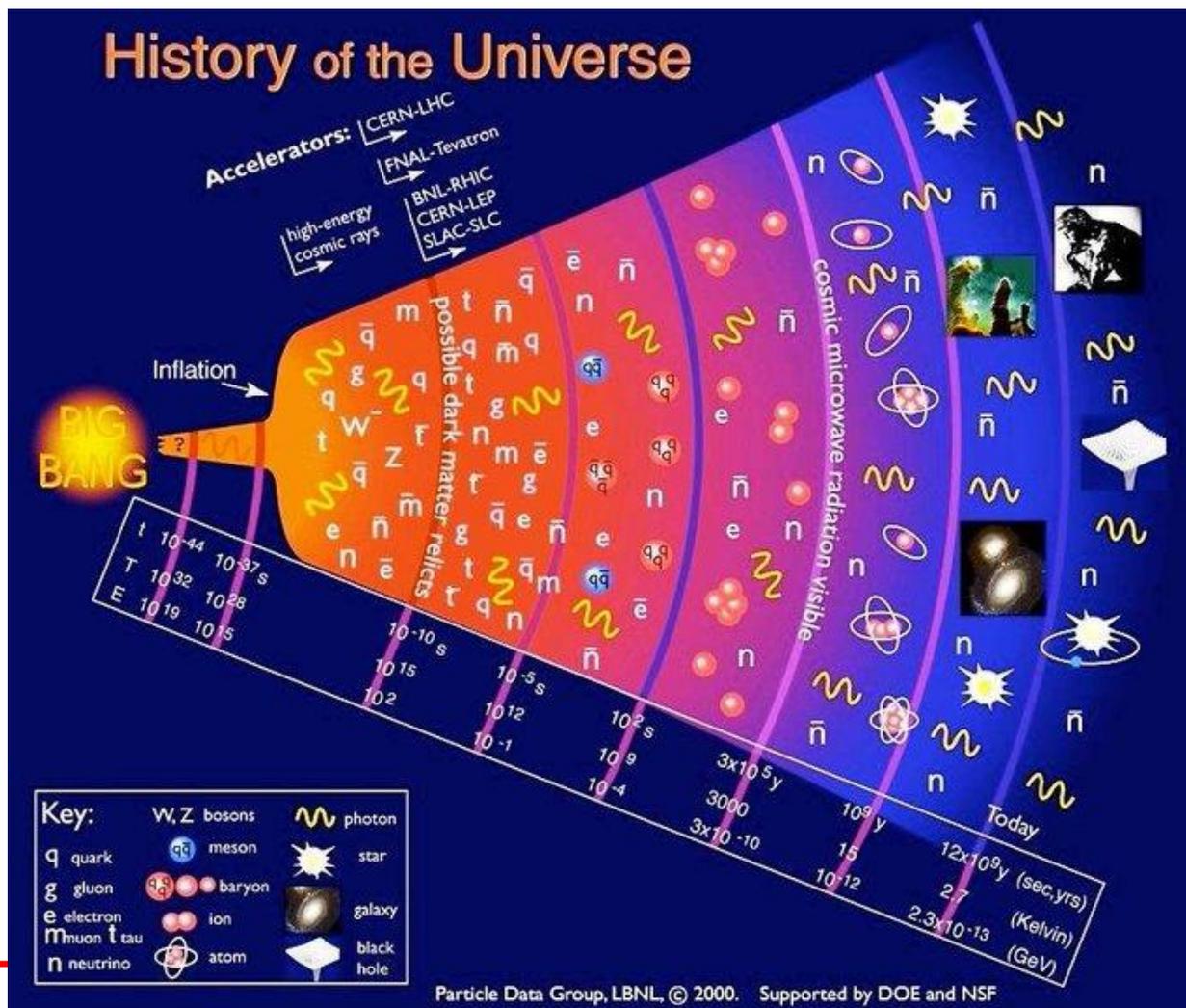
# Les particules (Historique)

- **Matière** : Leptons : force faible & électromagnétique
  - Électron, Muon (Hess 1937), Tau (Perl 1977)
  - Neutrinos associés (Pauli 1930, Steinberger 1962)
    - $\nu_e$  introduit par Pauli pour comprendre la désintégration  $\beta$
- **Matière** : Hadrons : force forte & électromagnétique
  - Plusieurs particules (ex. K,  $\Omega$ ,  $\Lambda$ ) -> Modèle des quarks (Gell-Mann 1964) puis des partons (Feynman 1970)
    - 6 quarks fabriquent tous les hadrons
    - u, d, s, c (Richter Ting 1974), b (Lederman 1976), t (1994)
- **Vecteurs** de force
  - $\gamma$  (élect.), W/Z (Faible Rubbia 1983), Gluon (forte)
  - W/Z massifs car force à courte portée

# Les Interactions (Historique)

- Gravitation (Newton 1687, Einstein 1915)
    - Portée  $\infty$ , très faible intensité
  - Electromagnétique (Maxwell 1860)
    - Portée  $\infty$ , unification électricité et magnétisme
  - Faible (Becquerel 1896, Fermi 1933)
    - Courte portée, présente à l'échelle du noyau
    - Désintégration  $\beta$ , fusion dans les étoiles
  - Forte (Rutherford 1911)
    - Courte portée, présente à l'échelle du noyau
    - Cohésion du noyau (répulsion des protons)
- Unification interactions électromagnétique, faible, forte

# Notre Univers



$10^{-44}s / 10^{19} GeV$   
 Supercordes ?  
 4 interactions unifiées

$10^{-37}s / 10^{15} GeV$   
 Soupe de particules élémentaires  
 Interaction unique forte-faible-EM

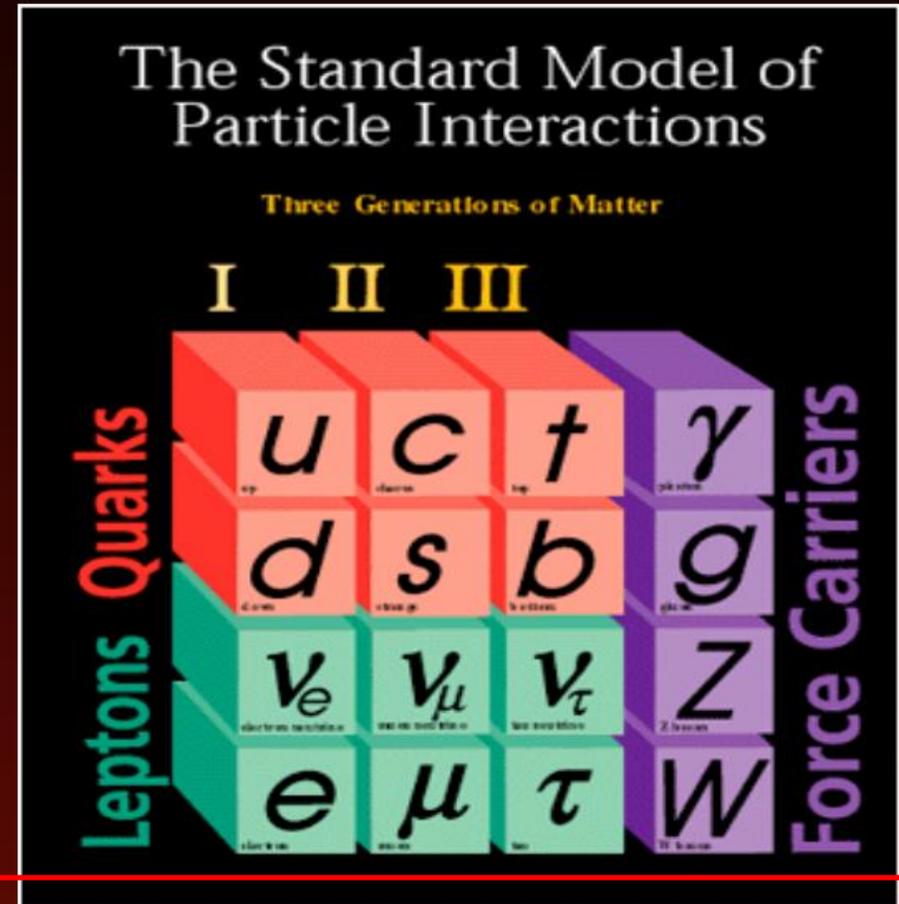
$10^{-10}s / 1000 GeV$   
 L'échelle du LHC

300000 ans → maintenant  
 Formation des atomes  
 L'Univers devient transparent  
 Rayonnement fossile (CMB)

**Les infinis se rejoignent :  
 Regarder loin = regarder tôt = regarder à petite distance = regarder à haute énergie**

# Le Modèle Standard

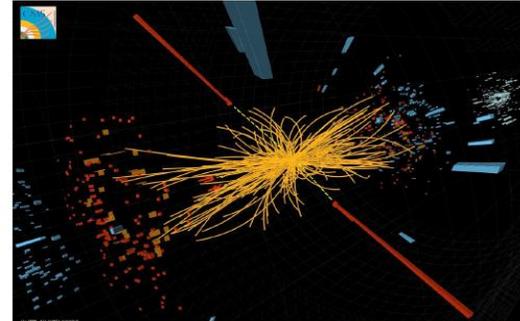
- Magnifique synthèse de nos connaissances en physique des particules
- Classifie les particules
- Provient de la théorie des champs quantiques: unification de la mécanique quantique et de la relativité restreinte
- Basé sur des concepts de symétrie
- Prédications très précises, grand succès depuis son élaboration!
- Fermions,  $\text{spin}=1/2$
- Bosons,  $\text{spin}=1$
- Boson de Higgs,  $\text{spin}=0$



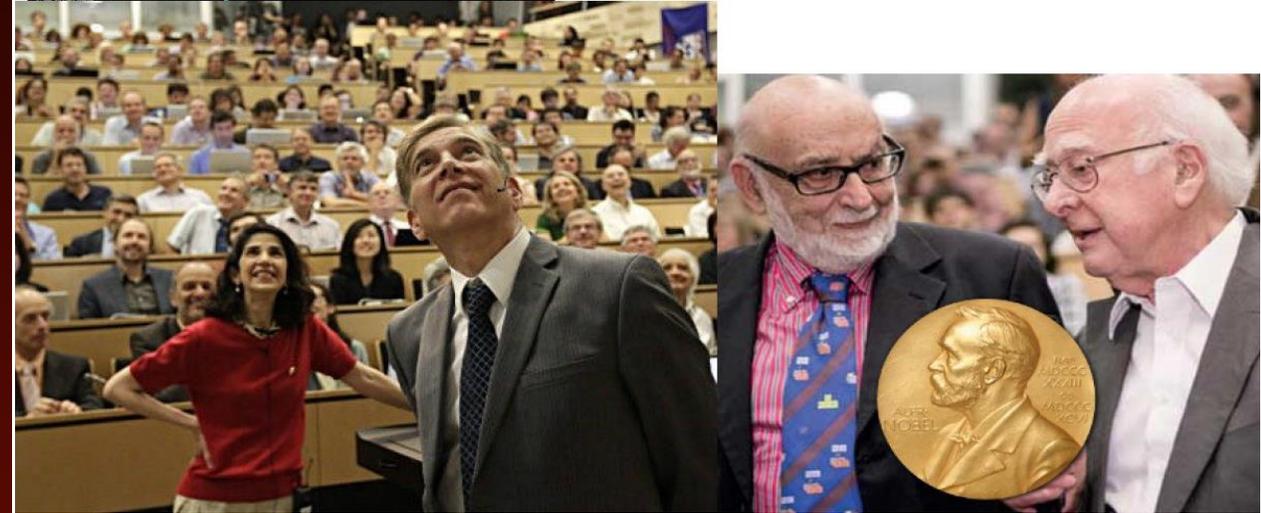
**Unification des interactions électromagnétique, faible et forte !!**

# Le Modèle Standard au complet

- Par certaines assumption de symétrie dans le Modèle Standard, les particules seraient toutes **sans** masse...
- En introduisant un nouveau champ: le **boson de Higgs**, cela a pour effet de briser cette symétrie et de donner une **masse** aux particules!
- Ce mécanisme a été prouvé en 2012 avec la découverte expérimentale du boson de Higgs dans l'expérience ATLAS et CMS au CERN.
- Prix Nobel 2013: Higgs et Englert



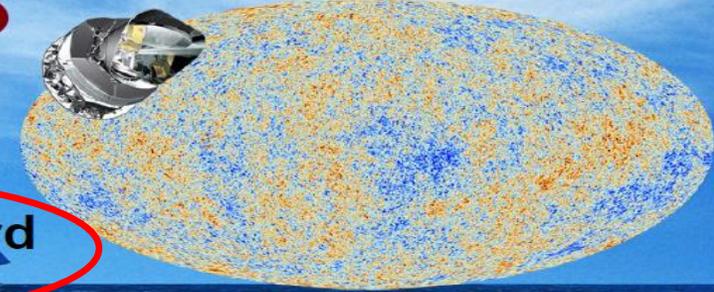
**Prédit en 1964  
Découvert en 2012 !**



Planck, mars 2013

# C'est tout ?

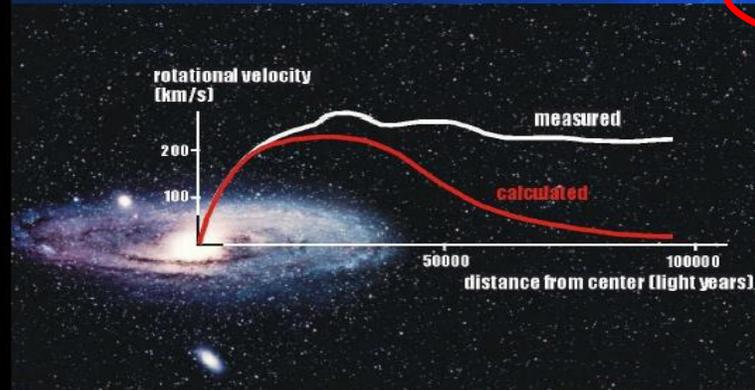
Nous et l'Univers visible



5% Modèle standard

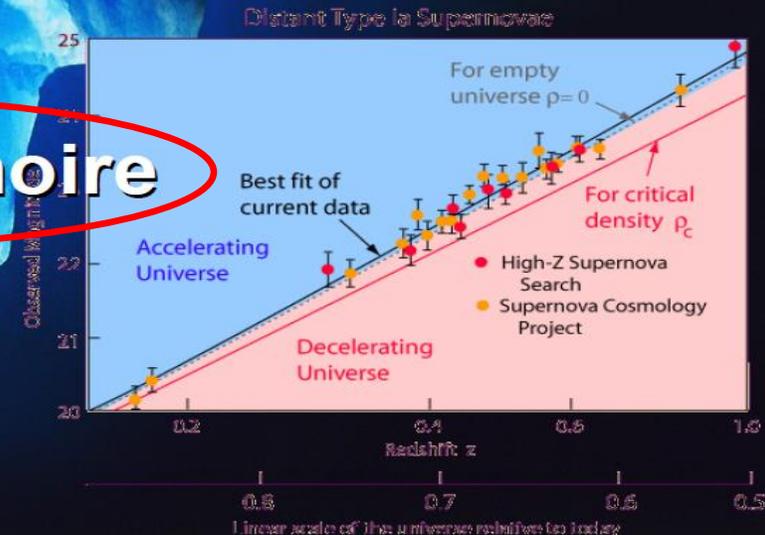
27% Matière noire

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



68% Énergie noire

Pas la moindre idée de son origine !



# Le boson de Higgs

- Questions ouvertes sur le Higgs
  - Composé, élémentaire ?
  - Rôle dans le Big Bang & évolution de l'Univers ?
  - Réponses aux questions ouvertes dans le Modèle Standard (Inflation, Matière Noire, Baryogénèse) ?
- Higgs : essentiel pour comprendre la structure profonde de la Matière/Univers car il donne la masse aux particules
  - $m_W, m_Z \leftrightarrow$  durée de vie des étoiles
  - $m_e$  (taille des atomes),  $m_u$  &  $m_d$  (stabilité du noyau)
  - Ce qu'il s'est passé à  $10^{-10}s$
  - Asymétrie matière/anti-matière

# Découvertes : Directe & Indirecte

- Directe

- On **produit** directement une nouvelle particule (Higgs, quark top, Bosons W & Z)
- Permet des études détaillées (taux, modes de désintégration)
- **Moins sensible** aux hypothèses du modèle théorique
- Mais réclame de l'**énergie** pour produire ces particules ( $E=mc^2$ )

- Indirecte

- Déviation aux prédictions théoriques dues à l'existence de nouvelles particules (Cf. Neptune, quark top)
- Nécessite moins d'énergie
- Interprétation **sensible** aux hypothèses
- Réclame des mesure de **précision**

**Le projet FCC  
combine les deux !!**

# Pourquoi collisionner des particules ?

- Pour voir des objets plus petits, il faut une énergie plus élevée :
  - ▶ longueur d'onde associée  $\lambda = h/p$
- Pour créer des particules plus lourdes
  - ▶  $E = mc^2$
- Reproduire en laboratoire les interactions au niveau élémentaire
  - pour s'affranchir des effets collectifs (atomiques, nucléaire)
  - Contrôle et compréhension facilités
    - Rôle de l'accélérateur de particules
- Accélérateur puissant (**lumineux**) car recherche de phénomènes rares

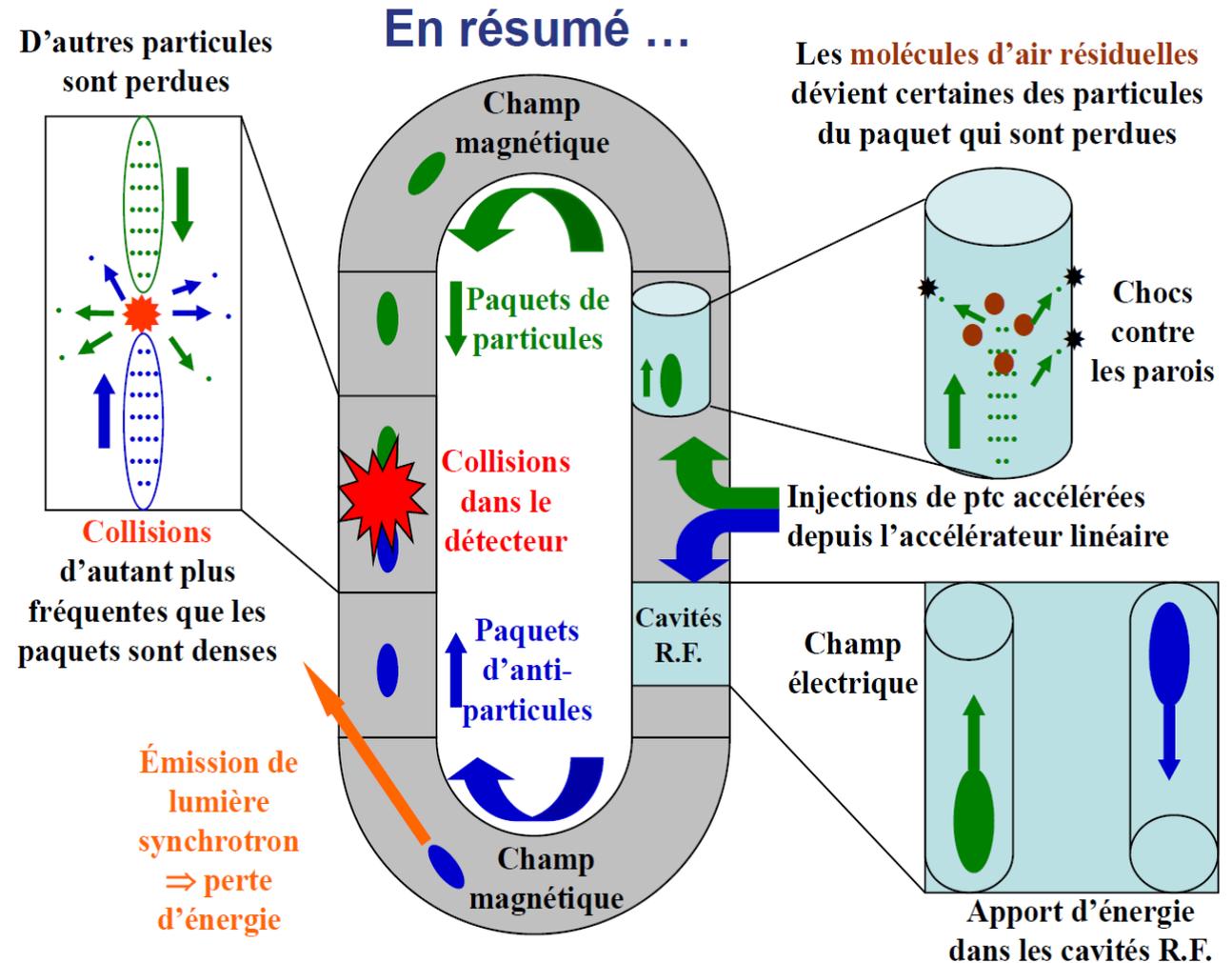
# Accélérateurs de particules : Principe

## • Principe

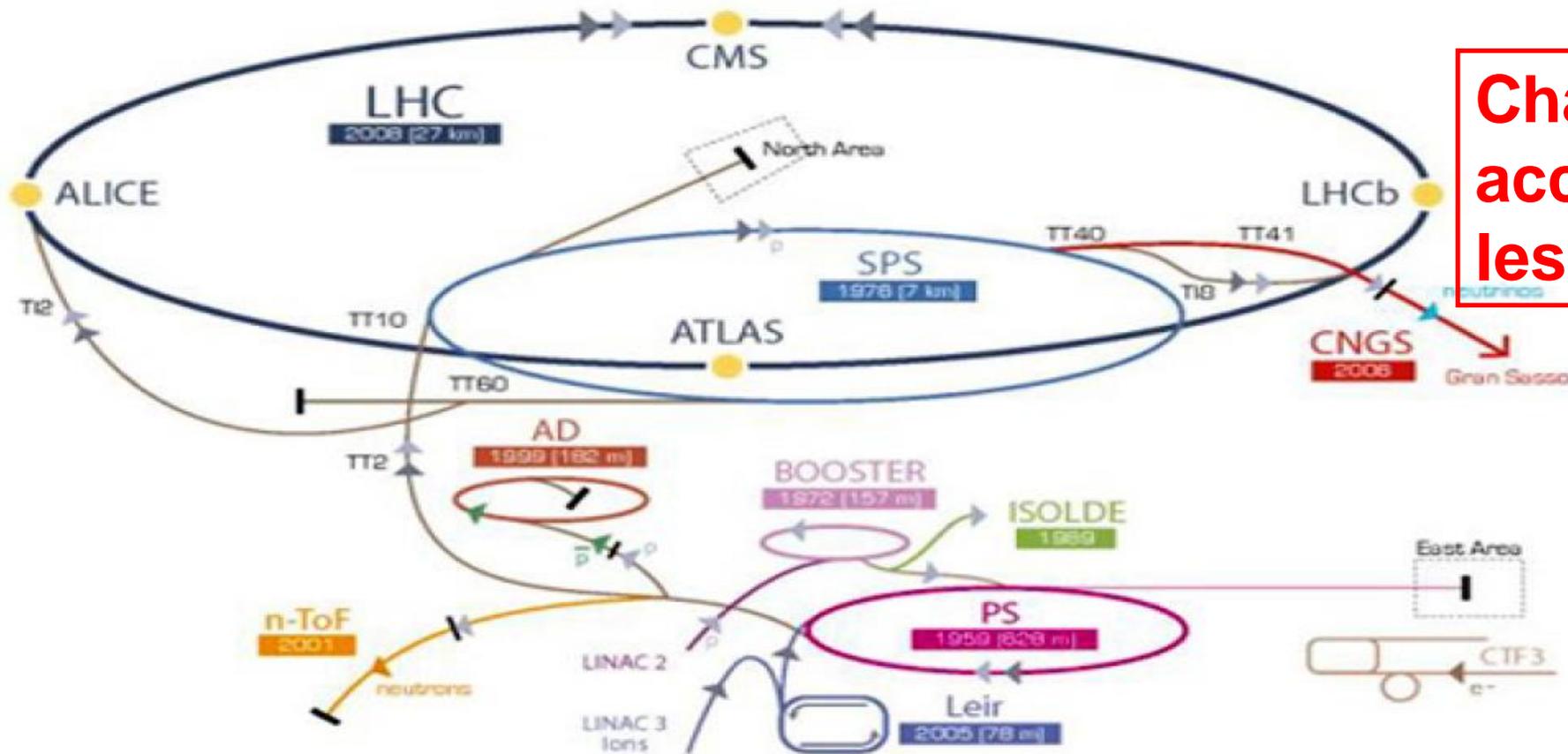
- Accumulation de particules
  - Injecteur (accélérateur dédié)
  - Augmentation des collisions
- Accélération
  - Via champ **électrique**
- Circulation
  - Via champ **magnétique**
- Focalisation
  - Via lentilles magnétiques

## • 2 paramètres

- **Energie** des particules et **Luminosité** (nombre de collisions/seconde)



# Les accélérateurs du CERN



**Chaque nouvel accélérateur utilise les précédents !!**

▶ p (protons)   ▶ ions   ▶ neutrons   ▶  $\bar{p}$  (antiproton)    $\leftrightarrow$  conversion proton/antiproton   ▶ neutrinos   ▶ electrons

LHC Large Hadron Collider   SPS Super Proton Synchrotron   PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator   CTF3 Clic Test Facility   CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso   ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring   LINAC LINear ACcelerator   n-ToF Neutrons Time Of Flight

# Accélérateurs de particules : Types

- Type : Linéaire ( $e^+e^-$ ) ou circulaire ( $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$ , proton-proton)

- Quelles particules accélérer ?

- Proton-proton (Cf. LHC 2008-2041)

Circulaire

- +

- Energie la plus haute accessible → Grand potentiel de découverte
- Proton est composite → permet de 'collisionner' ~ 200 types de collisions différentes

- -

- Etat initial complexe & Environnement complexe → découvertes & mesures difficiles
- Détecteurs compliqués

- Electron-Positron (Cf. LEP au CERN 1989-2000)

Linéaire ou circulaire

- Circulaire : plus lumineux, limité en énergie

- +

- Etat initial propre → Mesures de précision

- -

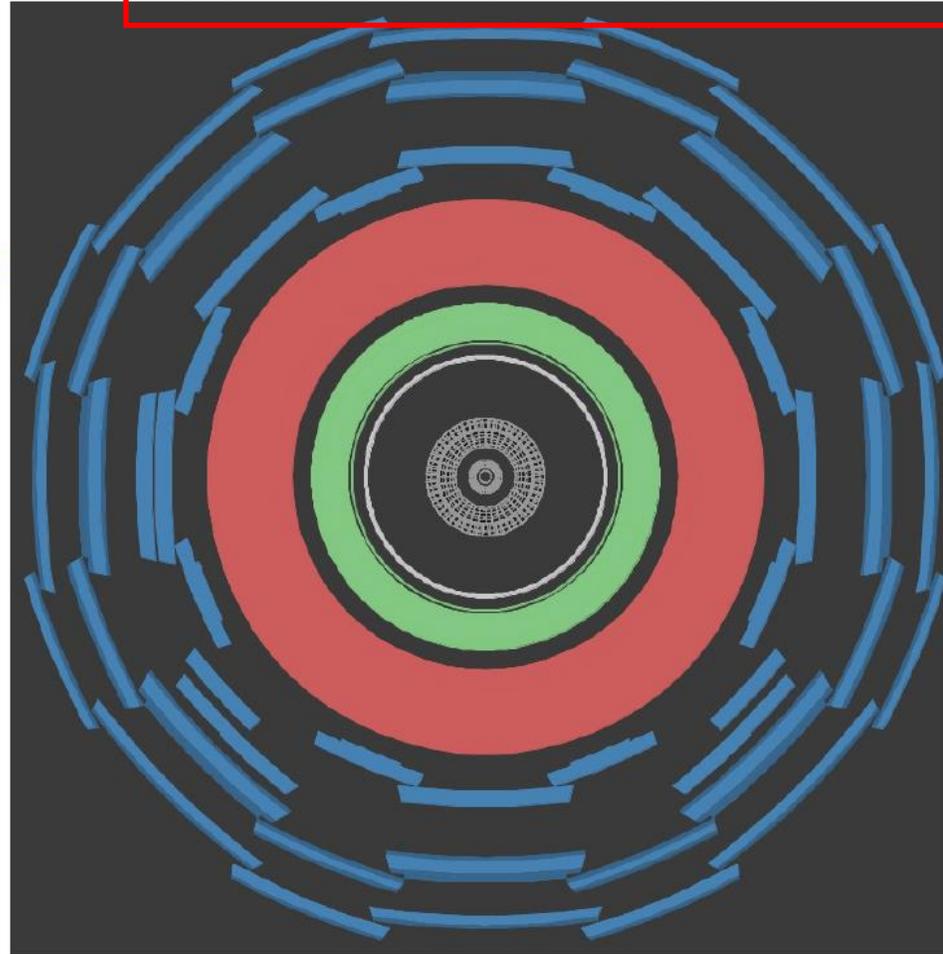
- Exige des détecteurs très précis
- Limité en énergie accessible (rayonnement dans les virages)

**Le projet FCC  
combine les deux !!**

# Détecteurs de particules : Principe

- Détecteur interne (trajectographe)
  - Mesure charge et impulsion des particules chargées, dans un champ magnétique
- Calorimètre électromagnétique
  - Mesure l'énergie des électrons, positrons et photons
- Calorimètre hadronique
  - Mesure l'énergie des hadrons (particules contenant des quarks), comme les protons, neutrons, pions, etc.
- Détecteur à muons
  - Mesure la charge et l'impulsion des muons

**Observer/reconstruire/comprendre les résultats des collisions**



## **Défis**

- Mécanique
- Electronique
- Informatique

# Le LHC (Large Hadron Collider) du CERN



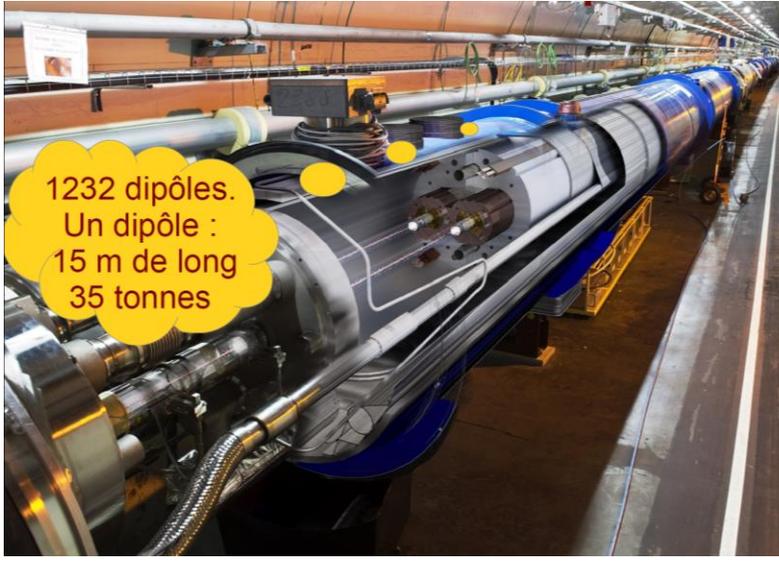
# Exemple : Le LHC (Large Hadron Collider)



27 km de circonférence  
100 m sous terre



Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol,  
mais il y en a 2800 paquets de 100 milliards !  
▶ Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.



1232 dipôles.  
Un dipôle :  
15 m de long  
35 tonnes



Protons voyageant à  
99,9999991%  
de la vitesse de la lumière  
soit 11000 tours  
par seconde



Vide presque parfait ( $10^{-13}$  atm) :  
pression 10 fois plus faible  
que sur la Lune



Le plus grand congélateur : 1,9 K (-271 °C),  
plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K),  
avec de l'hélium superfluide  
pour rendre les câbles supraconducteurs  
et générer un champ magnétique de 8,3 T  
(200000 fois le champ magnétique terrestre)

# Situation à la fin du LHC (2041)

- Probablement **pas de nouvelle physique** découverte
  - -> Réfléchir différemment à la physique au-delà du Modèle Standard
- Questions fondamentales **non résolues**
  - Matière Noire, Asymétrie Matière/Anti-matière, stabilité du Modèle Standard aux plus hautes énergies
- -> Les progrès futures doivent venir de l'expérience
- Situation fascinante : Où chercher & Chercher quoi ?
  - Pour la 1<sup>re</sup> fois depuis la théorie de Fermi (~**1935**) nous n'avons **pas d'échelle** de masse/énergie (W, Z, c, b, t, H, ???)
  - > La prochaine machine doit être versatile avec

**Plus de sensibilité, plus de précision, plus d'énergie**

# Scenarii/Projets

- Pourquoi pas de signe de nouvelle physique à l'échelle du LHC ?
- 2 scenarii, 1 projet
  - Masse au-delà de l'énergie du LHC
  - Masse accessible au LHC, mais les nouvelles particules interagissent faiblement
  - Pour couvrir ces 2 scenarii, il faut
    - **Précision**: Haute statistique, détecteurs performants & conditions expérimentales propres (FCC-ee)
    - **Sensibilité** aux particules interagissant faiblement: idem
    - **Exploration** aux plus hautes masses/énergies : (FCC-hh)

**FCC (ee+hh): projet le plus réaliste & complet pour répondre**

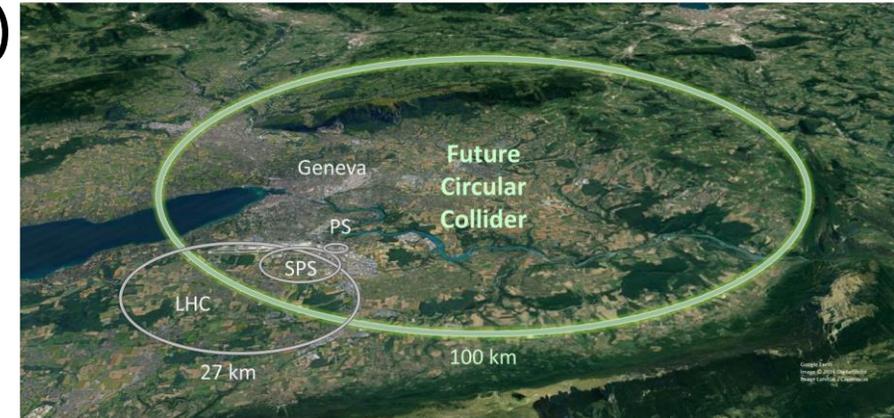
# Future Circular Collider (FCC)

- Concept

- Projet FCC inspiré par le succès du programme au LEP-LHC au CERN
- Dans un nouveau tunnel ~91 km circonférence
  - 1<sup>st</sup> phase: FCC-*ee* (4 énergies : Z, WW, ZH, tt), comme usine à Higgs, Electrofaible (repousser la frontière en intensité)
  - 2<sup>nd</sup> phase: FCC-*hh* (~100 TeV, Cf. LHC 14 TeV) pour repousser la frontière en énergie

- Points marquants

- Démarrage ~ 2045 (*ee*) ~ 2070 (*hh*)
- Les 2 phases partagent le génie civil & infrastructures
- Réutilisation optimale des infrastructures du CERN existantes
- Projet intégré avec l'exploitation du HL-LHC (haute luminosité)



# Le projet FCC-**ee**: Physique

- **Explorer** échelle d'énergie 10-100 TeV par des mesures de **précision**
  - 20-100 gain en précision sur paramètres électrofaibles équivalent à gain x5-10 en masse
  - Très haute statistique :  $10^{12}$  Z (LEP  $\times 10^5$ ),  $10^6$  H,  $10^8$  WW,  $10^6$  tt
- **Découverte** possible de nouvelles particules aux plus hautes masses
  - Matière noire, particules interagissant faiblement
- **Avantage des machines circulaires à basse-moyenne énergie**
  - Meilleure luminosité  $\rightarrow$  meilleure statistique
  - Plusieurs détecteurs possibles (x2 ou x4)

Pour bénéficier de la statistique & richesse du programme de physique  $\rightarrow$  énormes contraintes sur les **détecteurs**

# FCC-hh

- Bases
  - pp dans le tunnel FCC
  - 100(120) TeV énergie de collision selon la technologie des aimants
  - Démarrage ~ 2070
- Potentiel de physique
  - Découverte de nouvelles particules
    - Exploration directe de nouvelle physique -> 40 TeV incluant toute indication via les mesures de précision au FCC-ee
  - Repousser une fois pour toutes les limites de la Supersymétrie
    - Théorie unificatrice qui intègre la Gravitation
    - Gain x 10 sur les limites du LHC
  - Usine à Higgs
    - Production de  $10^{10}H$ ,  $> 10^7 HH$ )
    - Désintégrations rares, couplage HHH

# FCC Etude de Faisabilité (FS)

- **FCC FS (2021-2026)**

- Revue à mi-parcours: **SUCCESSION!! (automne 2023)**

- Evaluation finale mi-2025 pour la **Stratégie Européenne**

- **TOUS** les aspects évalués

## **Infrastructure & placement**

- Preferred placement and progress with host states (territorial matters, initial states, dialogue, etc.)
- Updated civil engineering design (layout, cost, excavation)
- Preparations for site investigations

## **Technical Infrastructure**

- Requirements on large technical infrastructure systems
- System designs, layouts, resource needs, cost estimates

## **Accelerator design FCC-ee and FCC-hh**

- FCC-ee overall layout with injector
- Impact of operation sequence: Z, W, ZH,  $t\bar{t}$  vs start at ZH
- Comparison of the SPS as pre-booster with a 10-20 GeV linac
- Key technologies and status of technology R&D program
- FCC-hh overall layout & injection lines from LHC and SC-SPS

## **Physics, experiments, detectors:**

- Documentation of FCC-ee and FCC-hh physics cases
- Plans for improved theoretical calculations to reduce theoretical uncertainties towards matching FCC-ee statistical precision for the most important measurements.
- First documentation of main detector requirements to fully exploit the FCC-ee physics opportunities

## **Organisation and financing:**

- Overall cost estimate & spending profile for stage 1 project

## **Environmental impact, socio-economic impact:**

- Initial state analysis, carbon footprint, management of excavated materials, etc.
- Socio-economic impact and sustainability studies

# FCC : Accélérateur

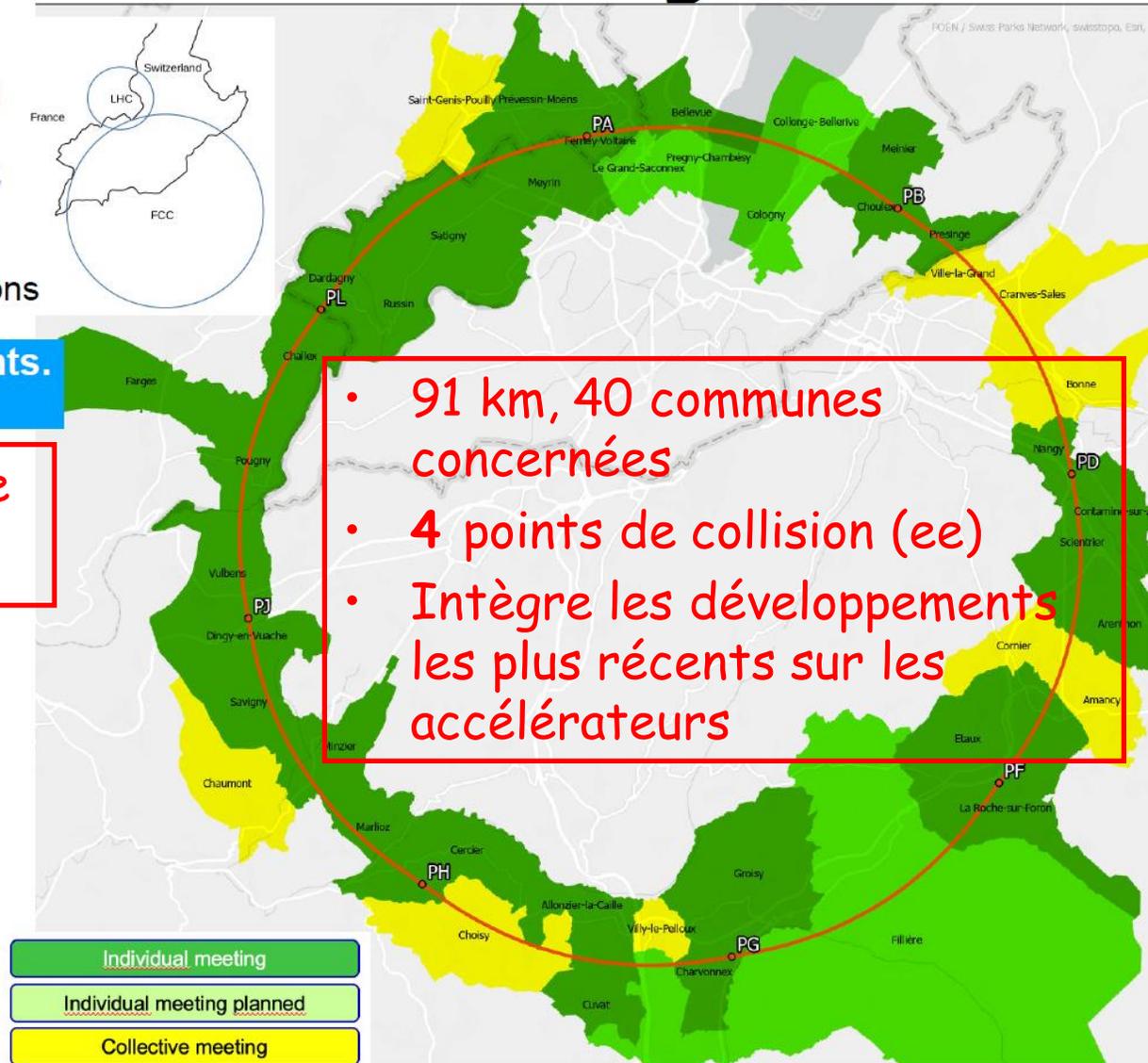
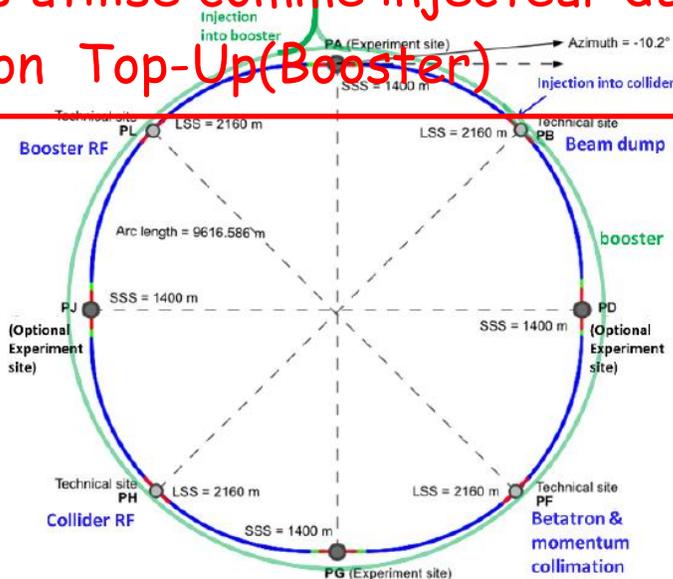
M. Benedikt @ CERN 13.02.24

Layout chosen out of ~ 100 initial variants, based on **geology** and **surface constraints** (land availability, access to roads, etc.), **environment**, (protected zones), **infrastructure** (water, electricity, transport), **machine performance** etc.

“Avoid-reduce-compensate” principle of EU and French regulations

Overall lowest-risk baseline: 90.7 km ring, 8 surface points.  
Whole project now adapted to this placement

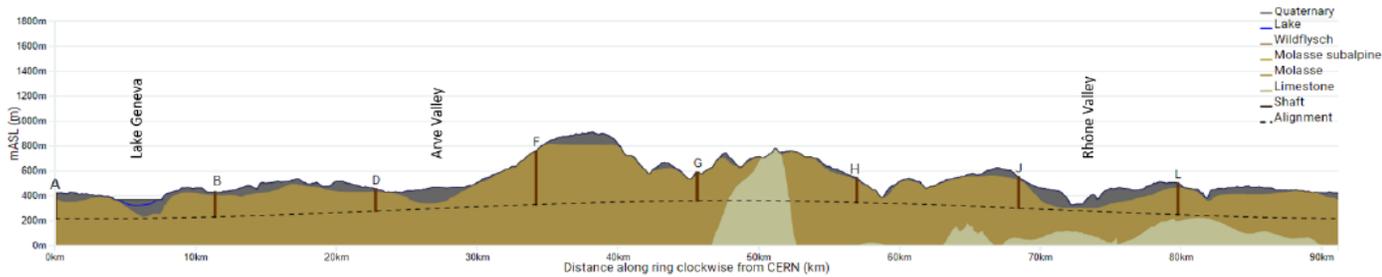
LHC pas utilisé comme injecteur du FCC-ee  
Injection Top-Up(Booster)



- 91 km, 40 communes concernées
- 4 points de collision (ee)
- Intègre les développements les plus récents sur les accélérateurs

# FCC : Génie civil

T. Watson @ Annecy FCC Physics '24



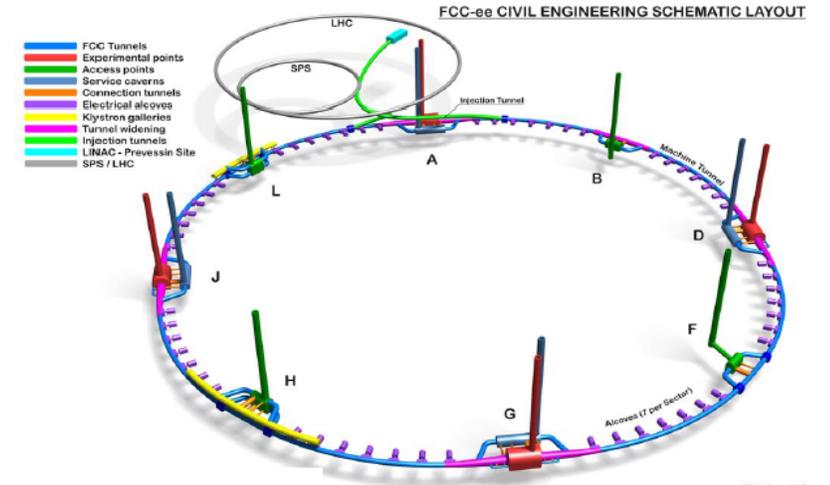
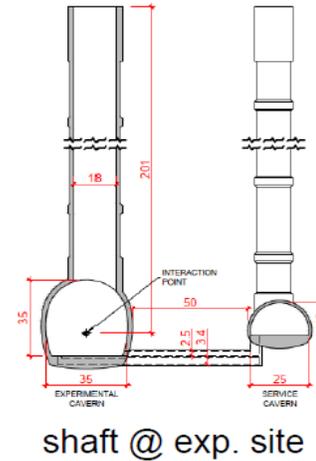
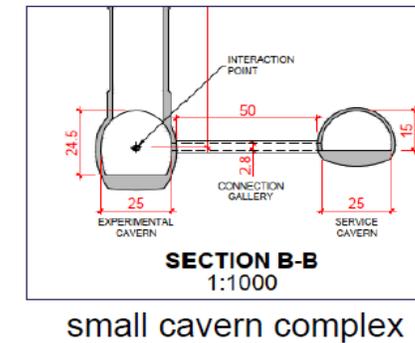
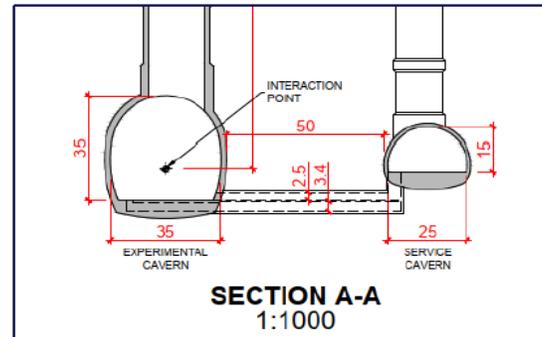
Shaft depths:

A: 201 m    B: 201 m    D: 181 m    F: 400 m    G: 226 m    H: 235 m    J: 253 m    L: 250 m



Tunnel Boring Machine (TBM)

- Tunnel Boring Machines are designed to work almost continuously 24/7 other than periodic maintenance. Rate of 18m/day in the Molasse. 21-27 months to complete one sector → 8 years with two TBMs .
- 13 shafts
- 2/2 large/small caverns



[ Not to scale ]

# FCC : Considération environnementales

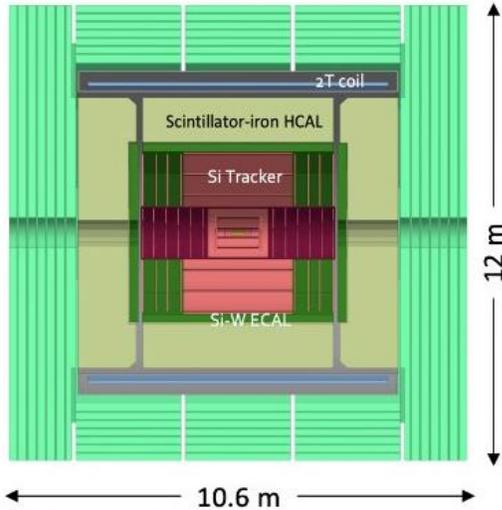
- **Excavated material** from FCC subsurface infrastructures: 6.5 Mm<sup>3</sup> in situ, 8.4 Mm<sup>3</sup> excavated
- **Priority : reuse, minimize disposal**
- 2021-2022: International competition “**Mining the Future**”, launched with the support of the EU Horizon 2020 grant, to find innovative and realistic ideas for the reuse of molasse (96% of excavated materials)
- 2023: “**OpenSky Laboratory**” project: Objective - Develop and test an innovative process to transform sterile “molasse” into fertile soil for agricultural use and afforestation. launched in Jan. 2024: 5500m<sup>2</sup> near LHC P5 in Cessy (FR). Trial with 5 000t of excavated local molasse → convert it to arable soil (agricultural/forestry)

- **Heat:**
  - heating for local houses
  - cheese factories in Jura and Haute-Savoie expressed special interest



# FCC-ee : Concepts de détecteurs

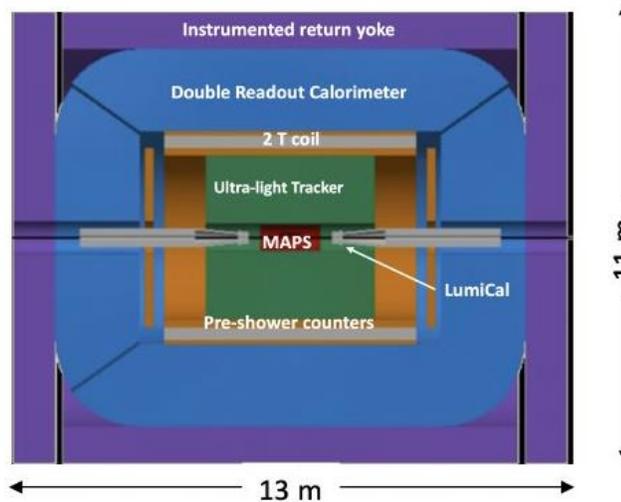
CLD



- Well established design
  - ILC -> CLIC detector -> CLD
- Full Si vtx + tracker
- CALICE-like calorimetry;
- Large coil, muon system
- Engineering still needed for operation with continuous beam (no power pulsing)
  - Cooling of Si-sensors & calorimeters
- Possible detector optimizations
  - $\sigma_p/p$ ,  $\sigma_E/E$
  - PID ( $\mathcal{O}(10$  ps) timing and/or RICH)?

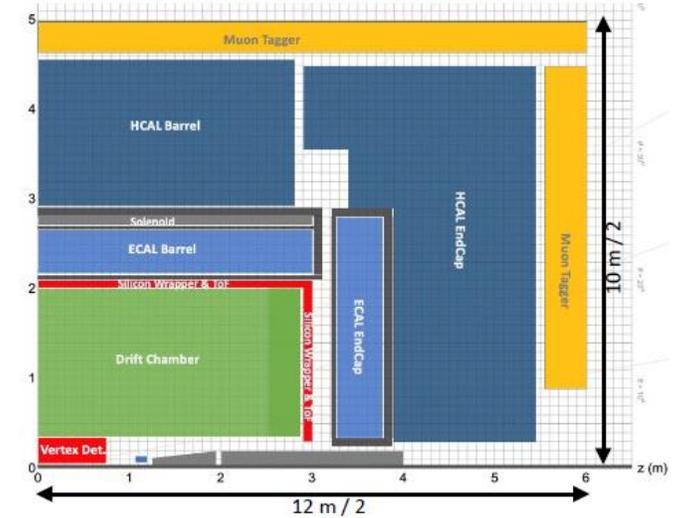


IDEA



- A bit less established design
  - But still ~15y history
- Si vtx detector; ultra light drift chamber with powerful PID; compact, light coil;
- Monolithic dual readout calorimeter;
  - Possibly augmented by crystal ECAL
- Muon system
- Very active community
  - Prototype designs, test beam campaigns, ...

ALLEGRO



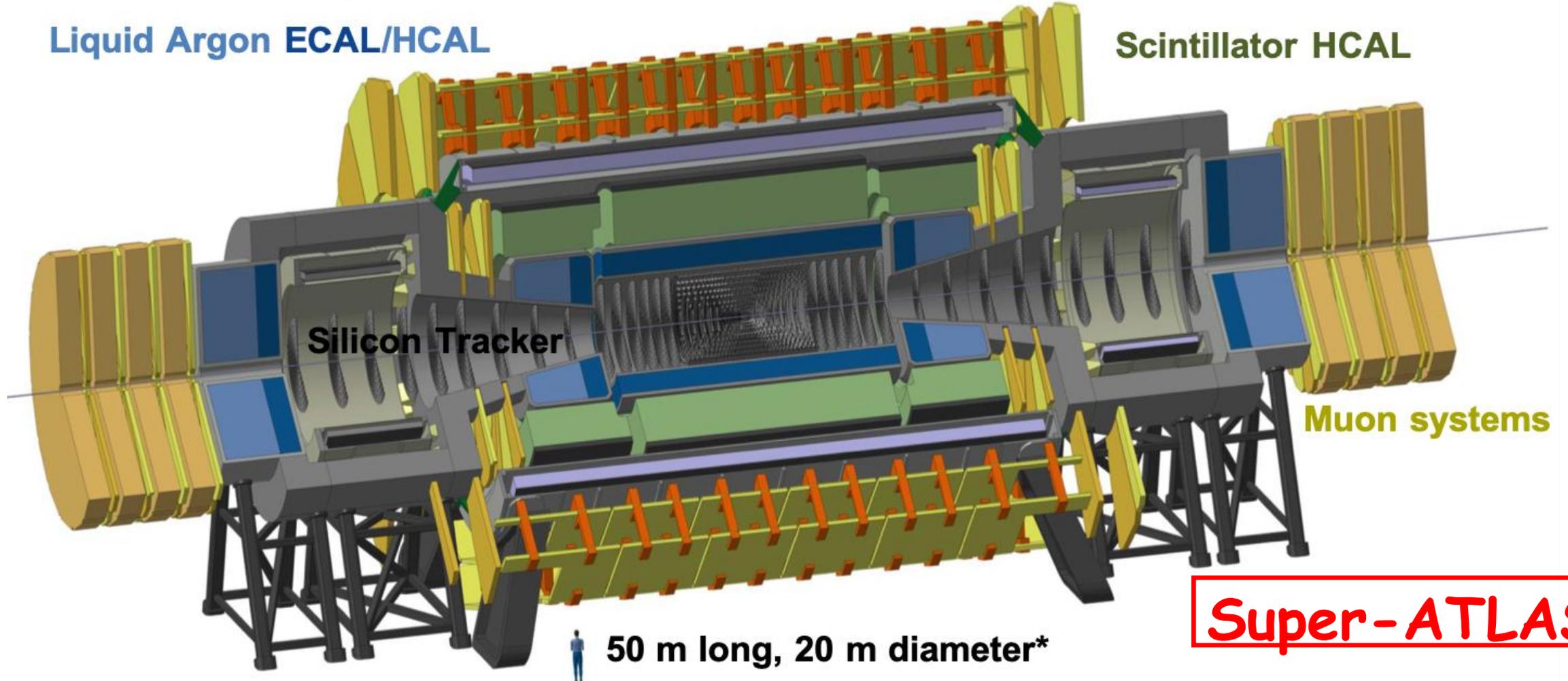
- The “new kid on the block”
- Si vtx det., ultra light drift chamber (or Si)
- High granularity Noble Liquid ECAL as core
  - Pb/W+LAR (or denser W+LKr)
- CALICE-like or TileCal-like HCAL;
- Coil inside same cryostat as LAR, outside ECAL
- Muon system.
- Very active Noble Liquid R&D team
  - Readout electrodes, feed-throughs, electronics, light cryostat, ...
  - Software & performance studies

# FCC-hh : Concept de détecteurs

4T, barrel/forward solenoids  $\Phi \approx 10/6$  m, unshielded

Liquid Argon ECAL/HCAL

Scintillator HCAL



Silicon Tracker

Muon systems

50 m long, 20 m diameter\*

**Super-ATLAS**

# FCC résumé

- Physique des particules
  - Donne une description & compréhension de l'Univers et de la matière la plus solide, **complète et élégante et prédictive**
- Collisionneurs
  - Les **collisionneurs** sont les microscopes les plus puissants à notre disposition pour étudier la Nature aux plus petites échelles & aux premiers instants de l'Univers. Ils continueront à fournir une **compréhension** quantitative pour progresser
- FCC
  - Machine la plus complète pour aller de l'avant en l'absence de repères. Combine **précision** (FCC-ee) et **exploration** (FCC-hh)
  - Défis excitants de la physique aux détecteurs
  - 2045 c'est demain. L'**avenir** se prépare dès aujourd'hui