



FUTURE
CIRCULAR
COLLIDER

Le projet FCC

L. Poggioli/luc.poggioli@cern.ch

- Physique des particules
 - Le Modèle Standard
- Accélérateurs
 - LHC
- Détecteurs
- Successeur du LHC
 - FCC

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

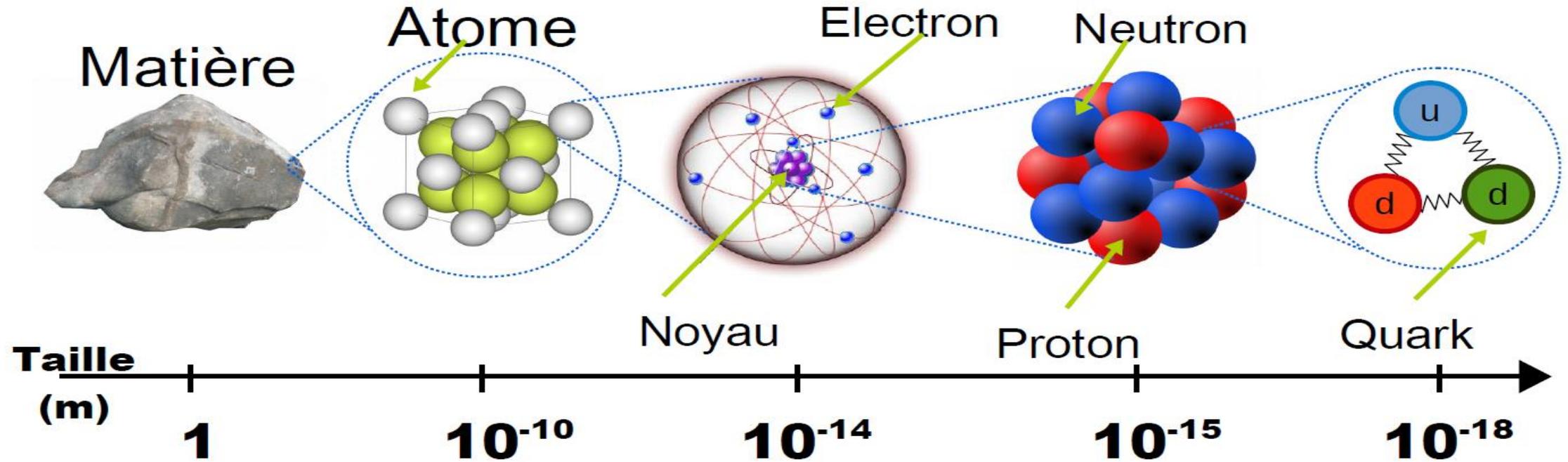
Au niveau expérimental

- Imaginer expérience pour valider/invalidier théorie
- S'assurer de la validité des résultats
 - Eliminer biais, sources d'erreurs
 - Statistiques
 - Systématiques
- En fonction des résultats
 - Asseoir théorie existante OU fournir éléments pour nouvelle théorie
- Aller-Retour 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 noyau GeV proton TeV ??

Les particules élémentaires

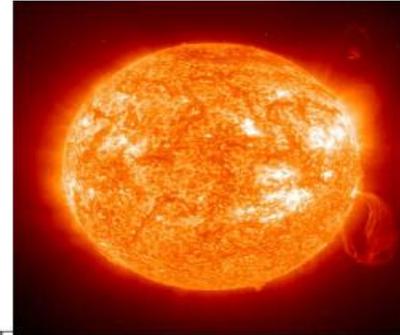
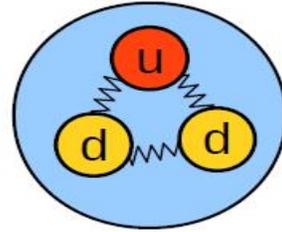


→ Les **électrons** et **quarks** (années 1960) sont des particules élémentaires : **sans sous-structure**

→ 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	Electro magnétique	Forte	Faible	Gravita- tionelle
Mediateur	Photon γ	Gluon g	3 bosons W^+ , W^- , Z	(graviton ?)
Intensité relative	1	100	10^{-12}	10^{-38}

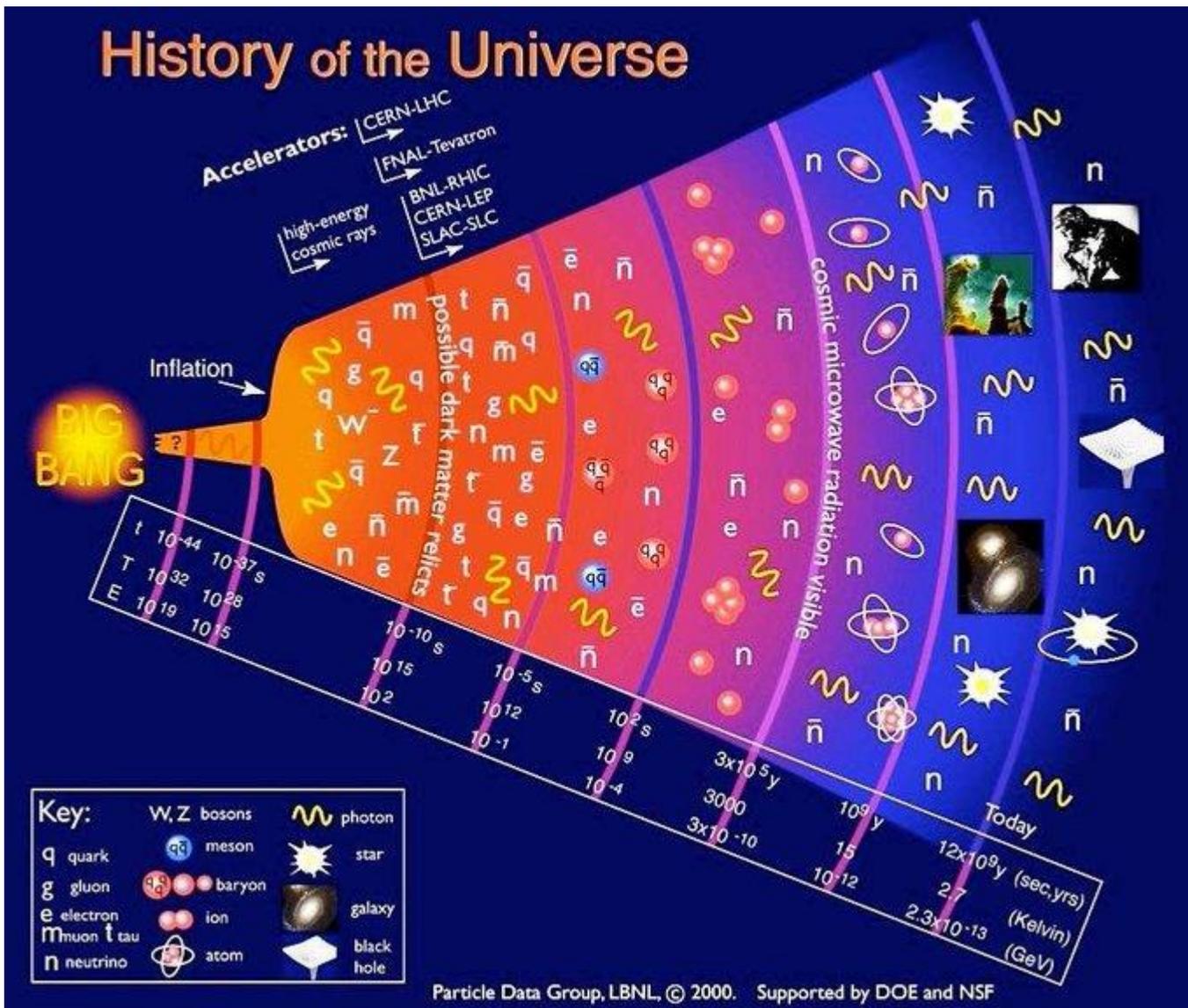
Les particules (Historique)

- Leptons : force faible & électromagnétique
 - Électron, Muon (Hess 1937), Tau (Perl 1977)
 - Neutrinos associés (Pauli 1930, Steinberger 1962)
 - ν_e introduit par Pauli pour comprendre la désintégration β
- Hadrons : force forte & électromagnétique
 - Plusieurs particules (ex. K, Ω , Λ) -> 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
 - γ (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 ∞ , très faible intensité
- Electromagnétique (Maxwell 1860)
 - Portée ∞ , unification électricité et magnétisme
- Faible (Becquerel 1896, Fermi 1933)
 - Courte portée, présente à l'échelle du noyau
 - Désintégration β , fusion dans les étoiles
- Forte (Rutherford 1911)
 - Courte portée, présente à l'échelle du noyau
 - Cohésion du noyau (répulsion des protons)

Notre Univers



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

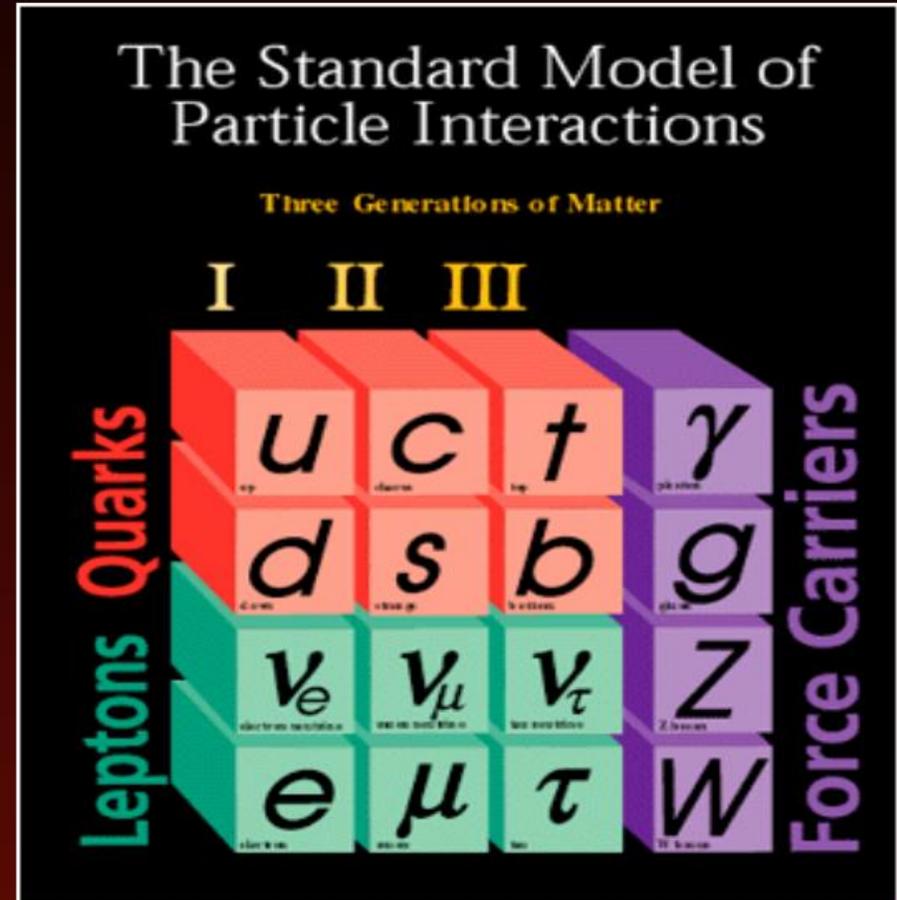
$10^{-37}s / 10^{15} \text{ GeV}$
 Soupe de particules élémentaires
 Interaction unique forte-faible-EM

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

300000 ans ->
 Formation des atomes
 L'Univers devient transparent
 Rayonnement fossile (CMB)

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 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

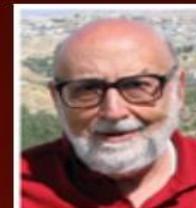
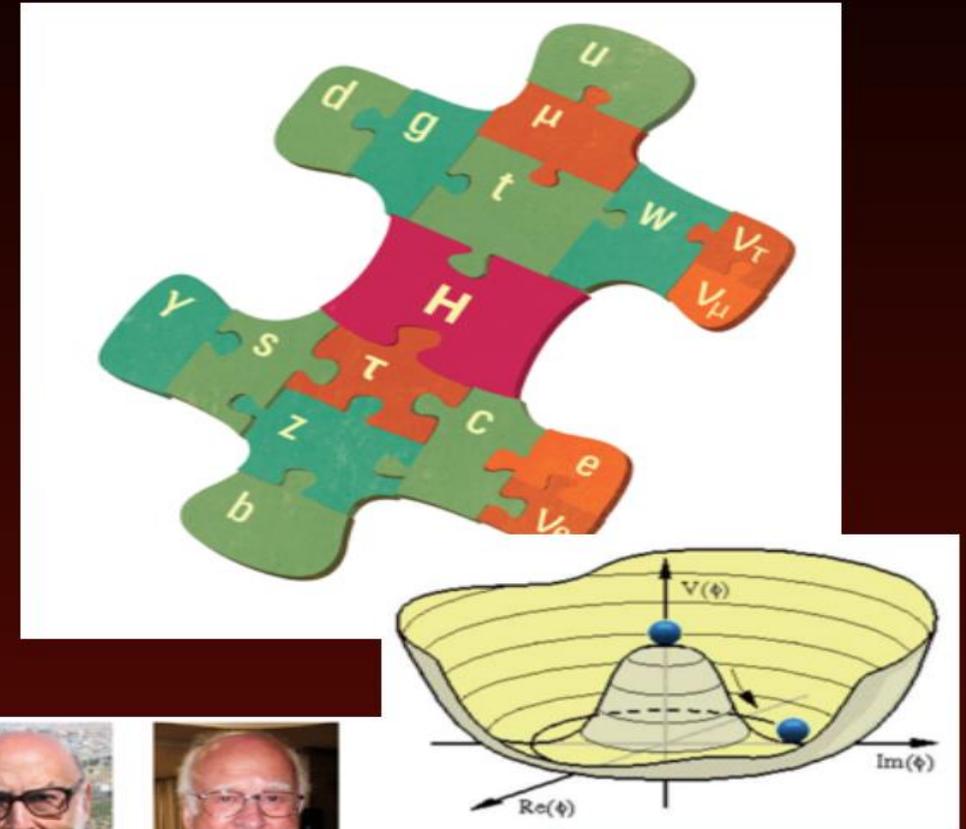


Photo: Prigolet via Wikimedia Commons
François Englert

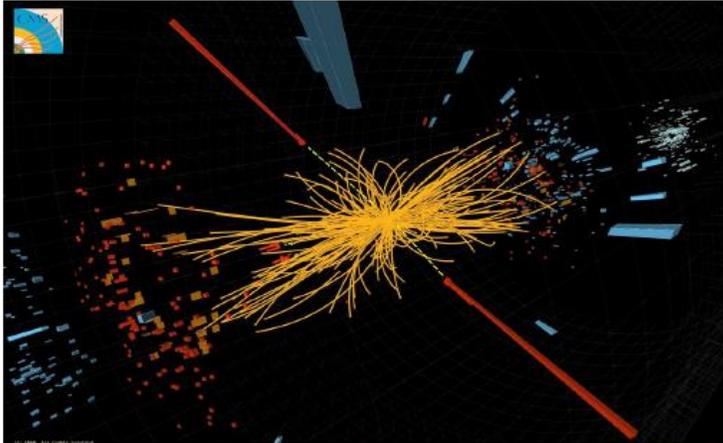


Photo: G-M Gruel via Wikimedia Commons
Peter W. Higgs



The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"

Le boson de Higgs



Prédit en 1964
Découvert en 2012 !



Planck, mars 2013

C'est tout ?

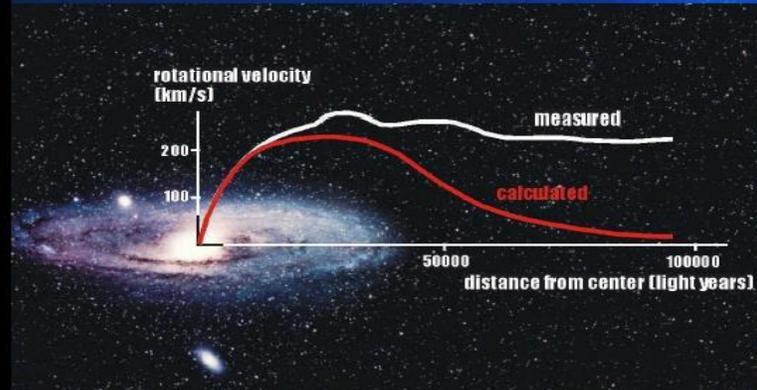
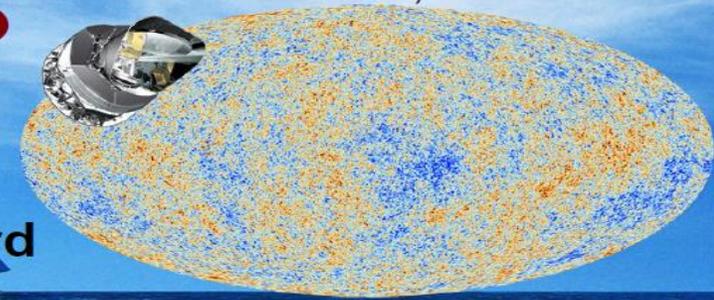
Nous et l'Univers visible

5% Modèle standard

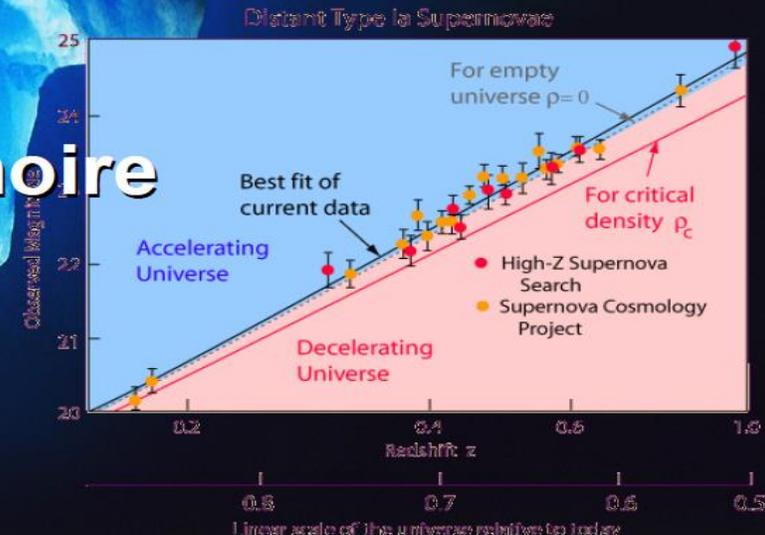
27% Matière noire

68% Énergie noire

Pas la moindre idée de son origine !



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



Le Higgs

- Questions 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) ?
- Le Higgs (et ses couplages) est 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 observe 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 (Neptune, quark top)
 - Nécessite moins d'énergie
 - Interprétation sensible aux hypothèses
 - Réclame des mesure de précision

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

Sources de particules

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

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

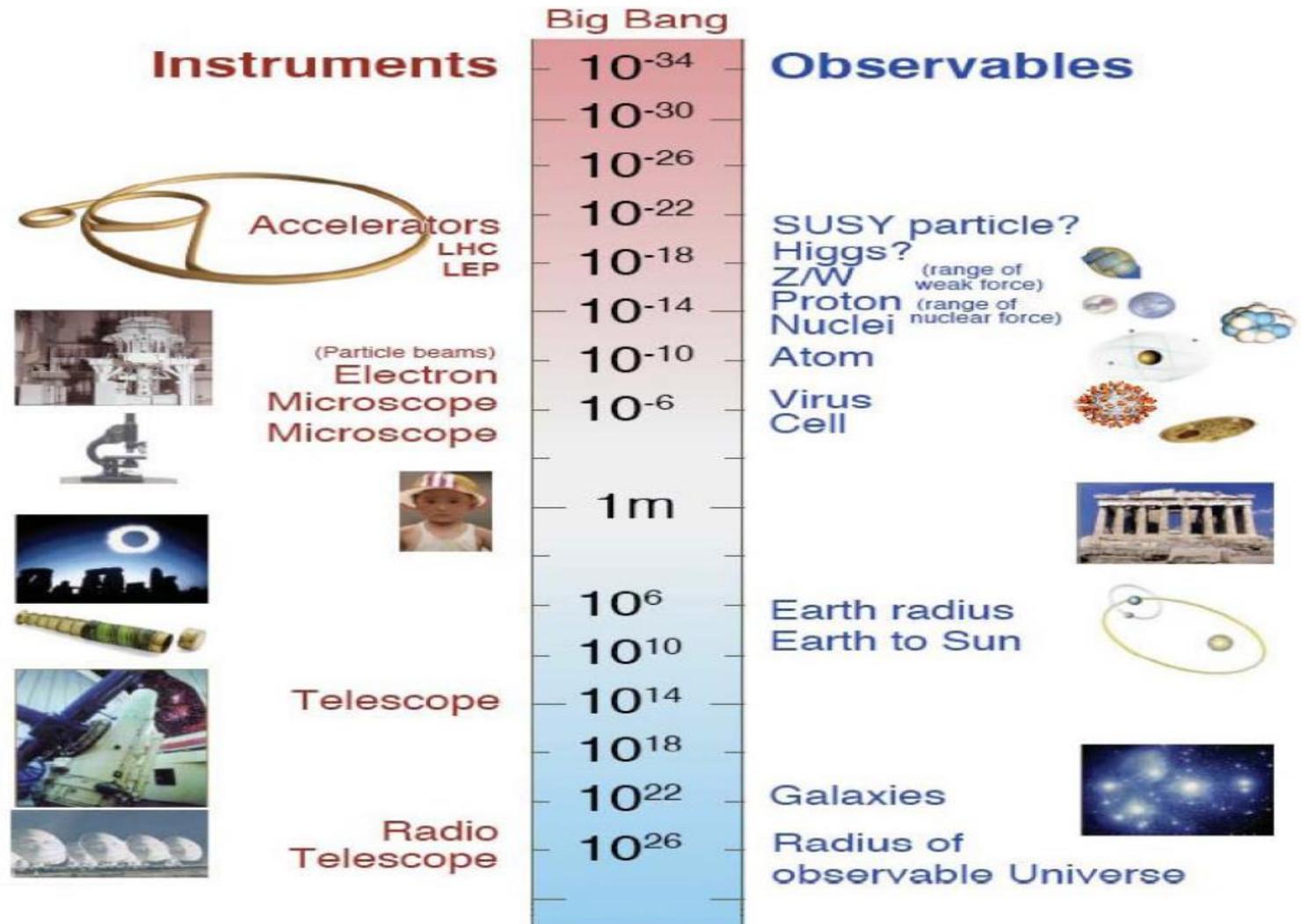
Pourquoi collisionner des particules ?

- 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

- ▶ $E = mc^2$



Accélérateurs de particules (1)

• Principe

- Accumulation de particules
 - Injecteur (accélérateur dédié)
 - Augmentation des collisions

- Accélération

- Via champ électrique

- Circulation

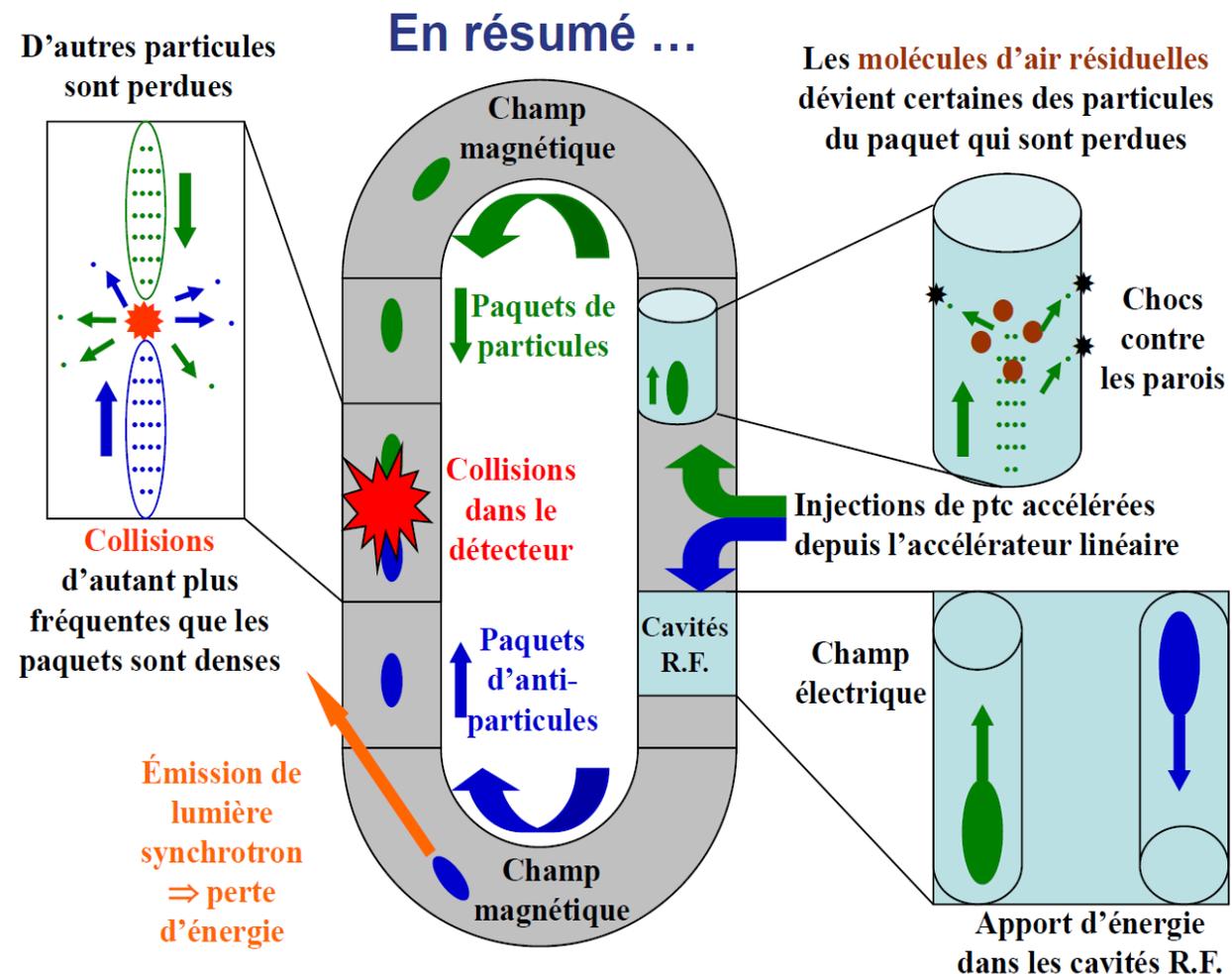
- Via champ magnétique

- Focalisation

- Via lentilles magnétiques

• 2 paramètres

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

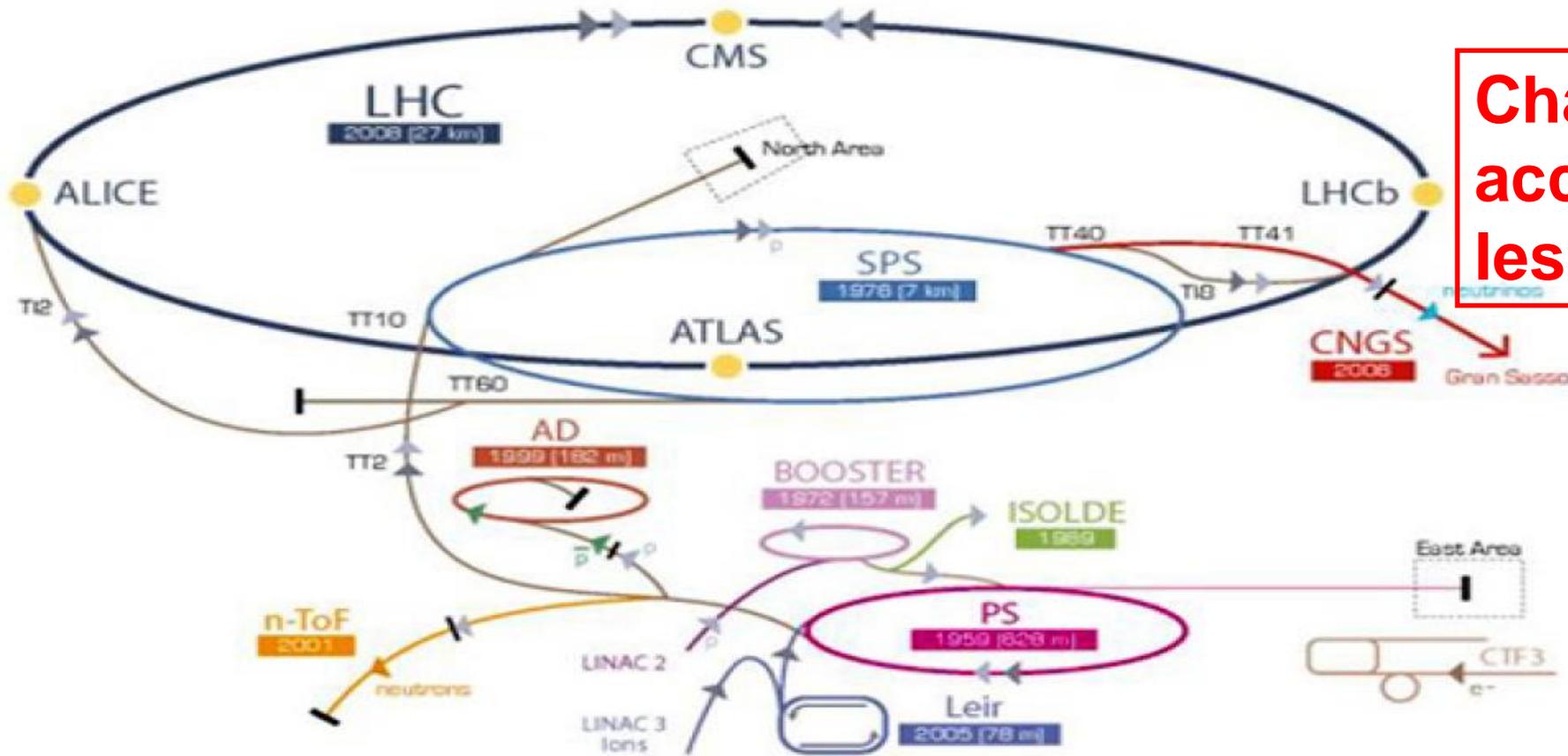


Accélérateurs de particules(2)

- Quelles particules accélérer
 - Proton-proton (Cf. LHC)
 - +
 - 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)
 - +
 - 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 !!**

Les accélérateurs du CERN



Chaque nouvel accélérateur utilise les précédents

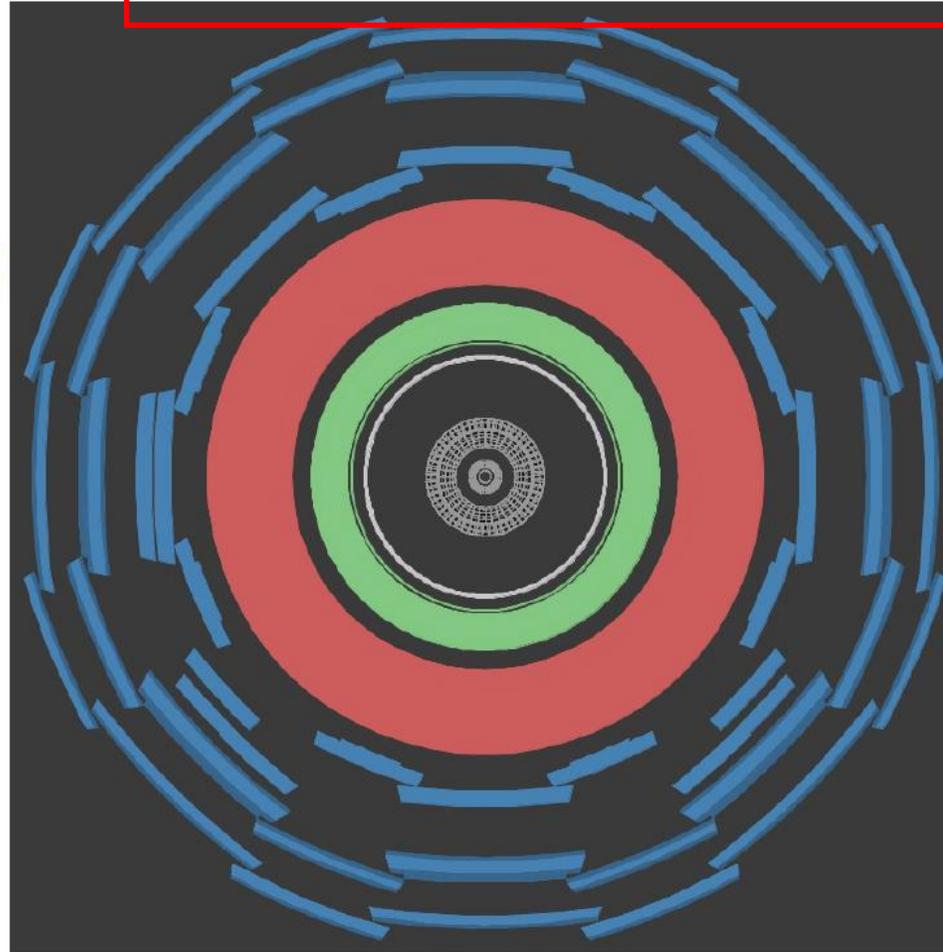
▶ p (protons) ▶ ions ▶ neutrons ▶ \bar{p} (antiproton) \leftrightarrow conversion proton/antiproton ▶ neutrinos ▶ électrons

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

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

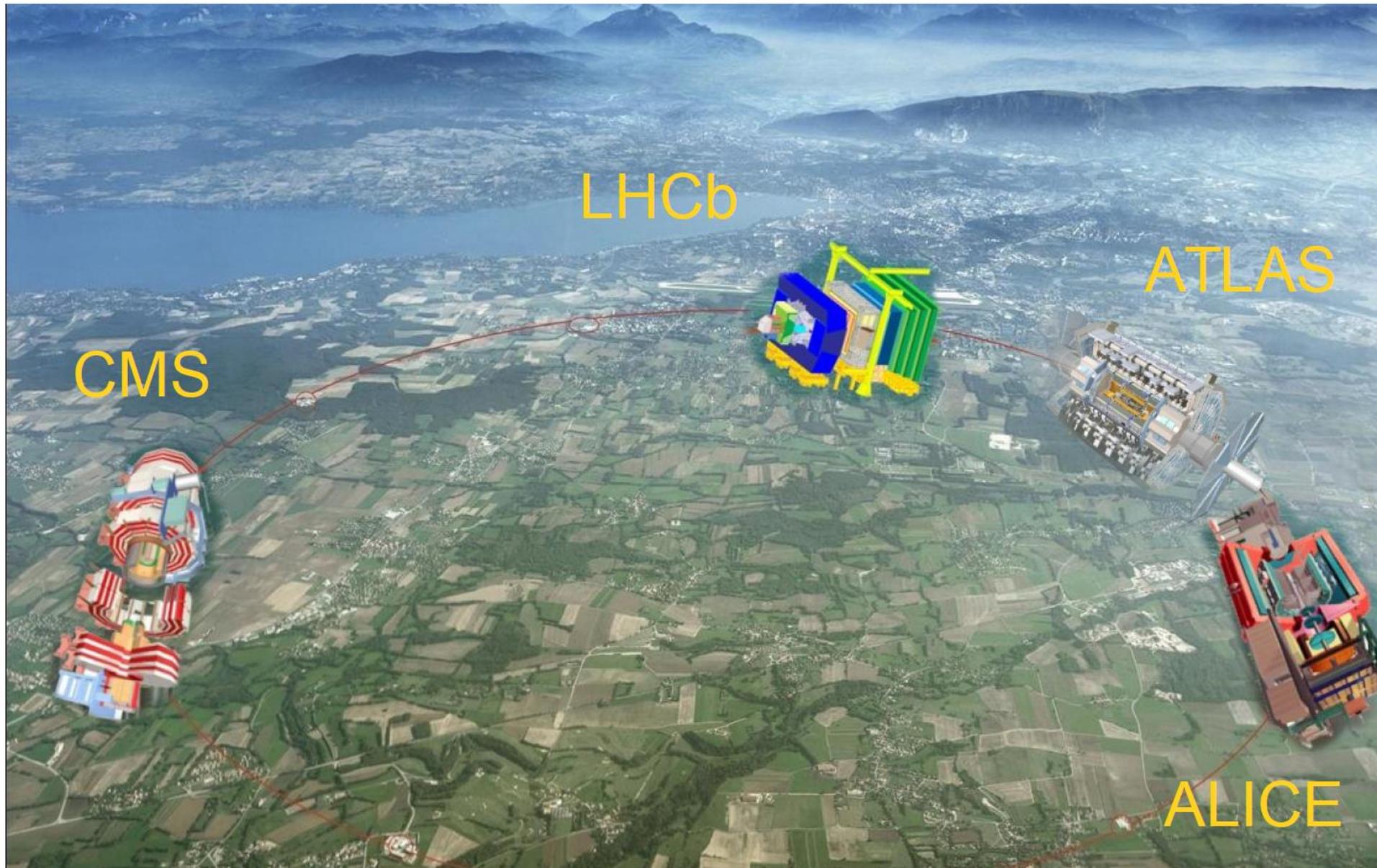
Observer/reconstruire/comprendre les résultats des collisions



Défis

- Mécanique
- Electronique
- Informatique

Le LHC (Large Hadron Collider)



Exemple : Le LHC (Large Hadron Collider)

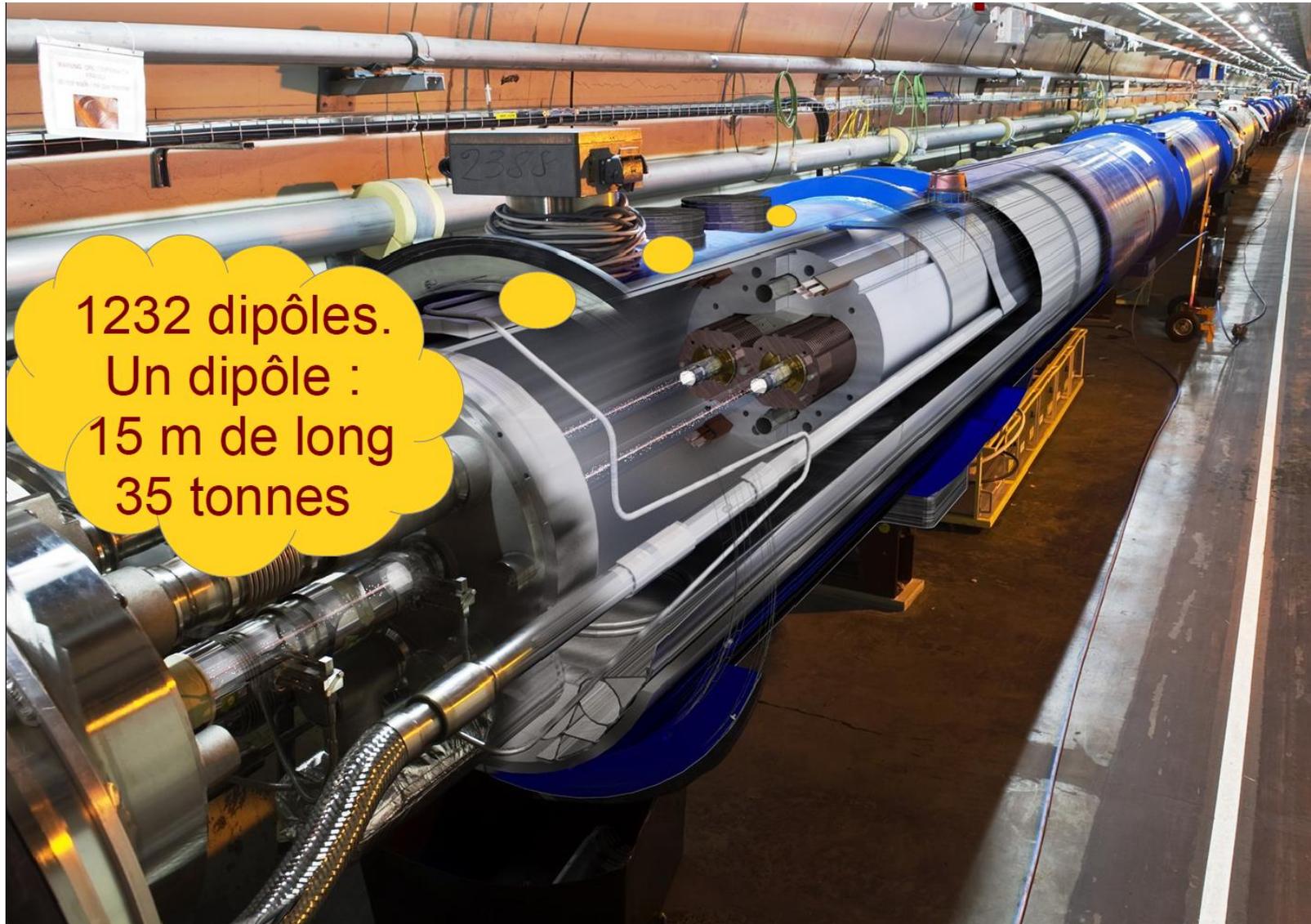


Exemple : Le LHC (Large Hadron Collider)



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.

Exemple : Le LHC (Large Hadron Collider)



Exemple : Le LHC (Large Hadron Collider)



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

Exemple : Le LHC (Large Hadron Collider)



Exemple : Le LHC (Large Hadron Collider)



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
 - -> Forcer à réfléchir différemment à la physique au-delà du Modèle Standard (BSM)
- Questions fondamentales non résolues
 - Matière Noire, Asymétrie Matière/Anti-matière, stabilité du Modèle Standard aux plus hautes énergies
- -> Pour les 30 ans à venir les progrès doivent venir de l'expérience
- Situation fascinante : Où chercher & Chercher quoi ?
 - Pour la 1^{re} 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
 - Plus de sensibilité, plus de précision, plus d'énergie

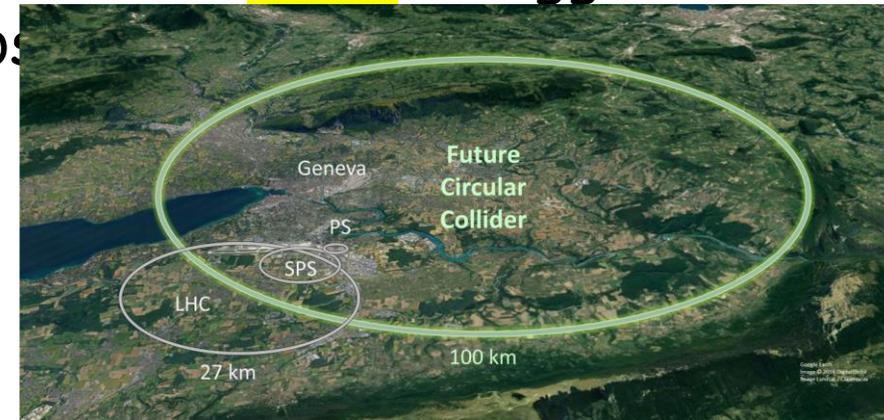
Scenarii/Projets

- Pourquoi pas de signe de nouvelle physique à l'échelle du TeV ?
- 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
 - 1st phase: FCC-*ee* (4 énergies : Z, WW, ZH, tt), comme usine à Higgs, Electrofaible (EW & top aux plus hautes luminosités)
 - 2nd 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 totalement intégré avec l'exploitation du HL-LHC

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 faiblement couplées
- Physique des saveurs
 - Enorme statistique 10^{12} bb evts
- **Aussi**
 - α_s à 10^{-4} précision, fragmentation, e couplage de Yukawa ($e^+e^- \rightarrow H$)

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: **SUCCESES!! (automne 2023)**

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:

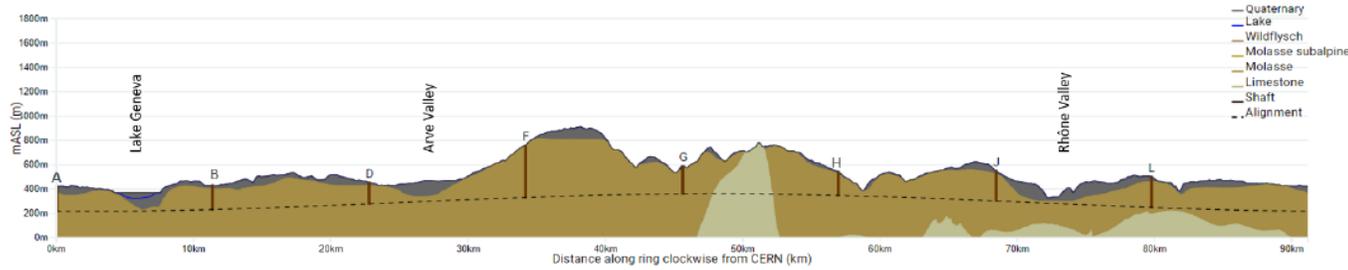
- Overall cost estimate & spending profile for stage 1 project

Environmental impact, socio-economic impact:

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

FCC FS : Génie civil

T. Watson @ Ancey FCC Physics '24



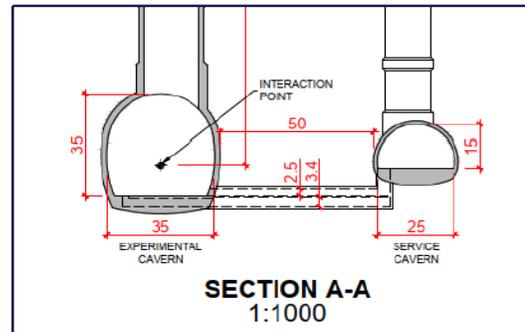
Shaft depths:

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

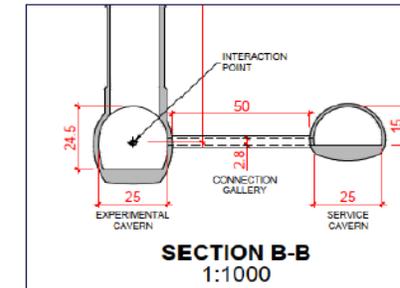


Tunnel Boring Machine (TBM)

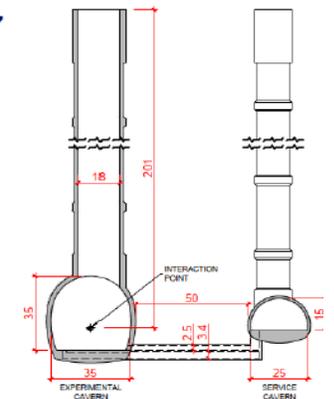
- Tunnel Boring Machines are designed to work almost continuously 24/7 other than periodic maintenance. Rate of 18m/day in the Molasse. 21-27 months to complete one sector → 8 years with two TBMs .
- 13 shafts
- 2/2 large/small caverns



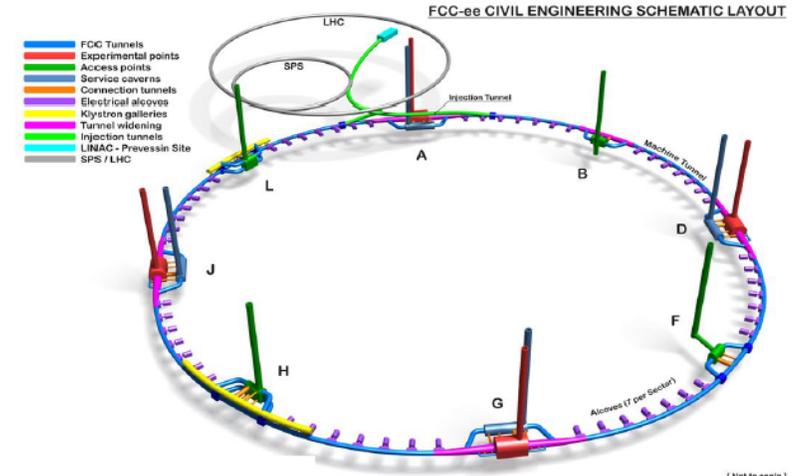
large cavern complex



small cavern complex



shaft @ exp. site



[Not to scale]

FCC FS : Considération environnementales

VI. POLITIQUE & CHERCHES

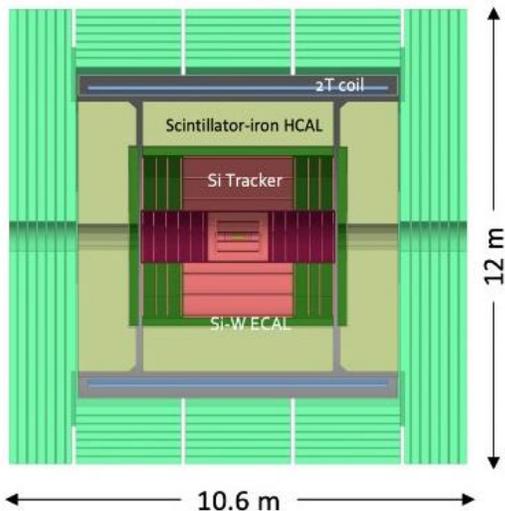
- **Excavated material** from FCC subsurface infrastructures: 6.5 Mm³ in situ, 8.4 Mm³ excavated
- **Priority : reuse, minimize disposal**
- 2021-2022: International competition “**Mining the Future**”, launched with the support of the EU Horizon 2020 grant, to find innovative and realistic ideas for 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: 5500m² 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

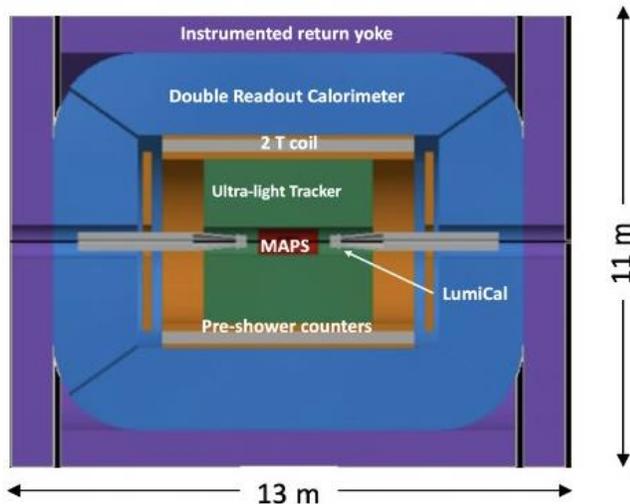
CLD



- 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
 - σ_p/p , σ_E/E
 - PID ($\mathcal{O}(10\text{ ps})$ timing and/or RICH)?

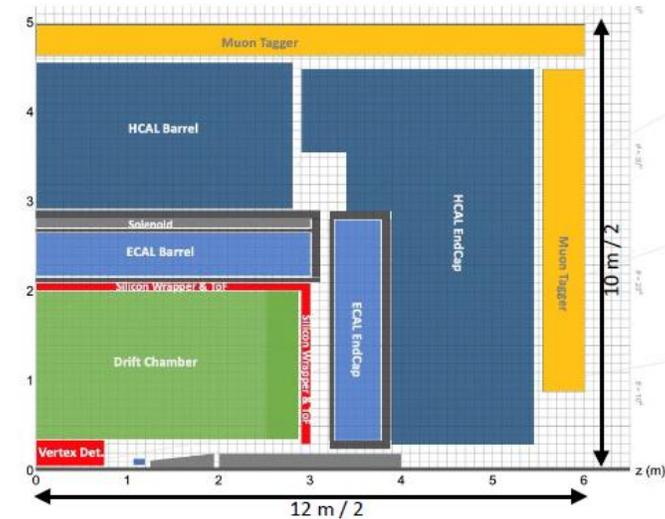


IDEA



- 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

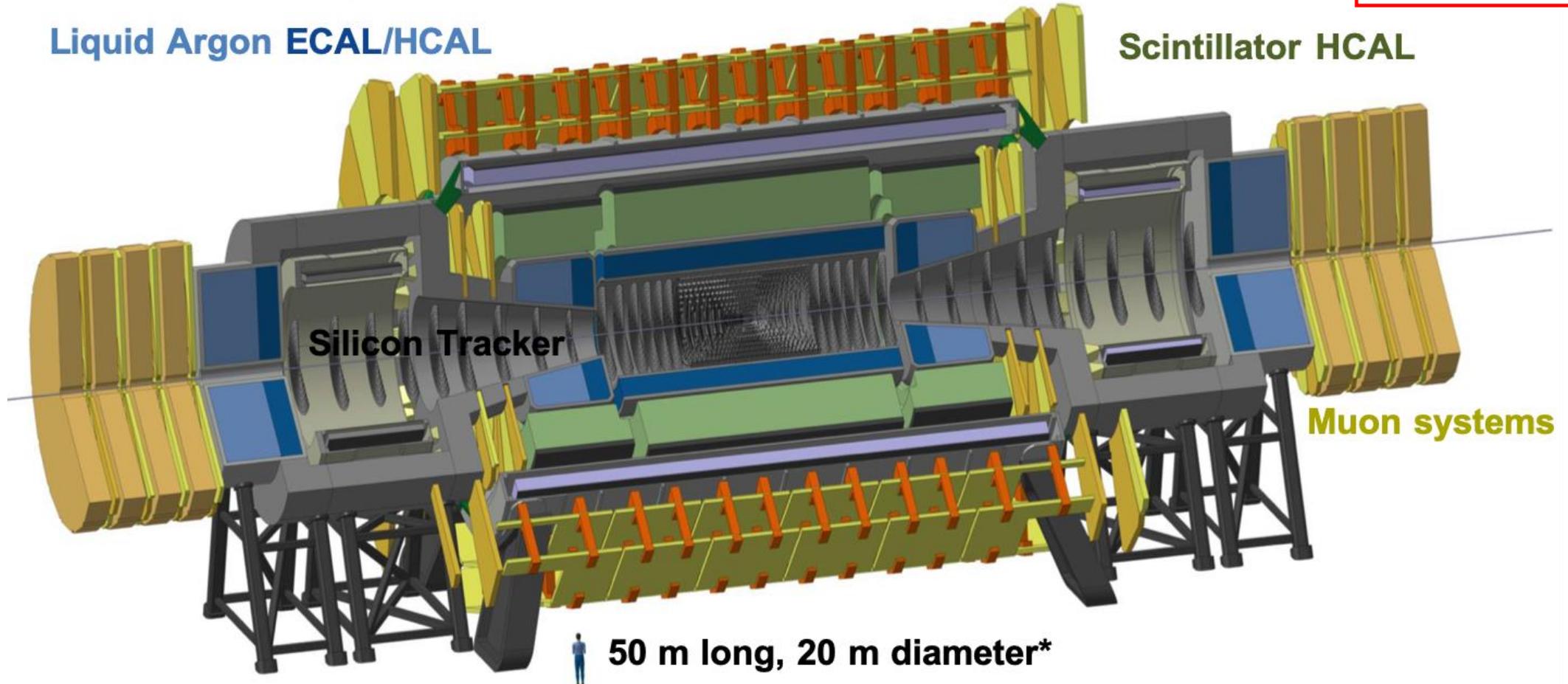
FCC-hh : Concept de détecteurs

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

Super-ATLAS

Liquid Argon ECAL/HCAL

Scintillator HCAL



Silicon Tracker

Muon systems

50 m long, 20 m diameter*

Base: Si tracker, LAr for EM, Scintillating tile + WLS + SiPM

FCC résumé

- Physique des particules
 - Donne une description & compréhension de l'Univers et de la matière la plus solide, complète et élégante
- 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