

Accélérateurs et collisionneurs

Elisabeth Petit
CPPM



Ecole IN2P3 d'instrumentation
"Techniques de base des détecteurs"
Fréjus, 10-15 mars 2024



NUCLÉAIRE
& PARTICULES

- ◆ Généralités
- ◆ Principe des accélérateurs de particules
 - production des particules
 - accélération/déviation
- ◆ Différents types de collisionneurs
 - ee/pp
 - résumé temporel
- ◆ Notion de luminosité
- ◆ Le LHC

Généralités

Principe des accélérateurs de particules

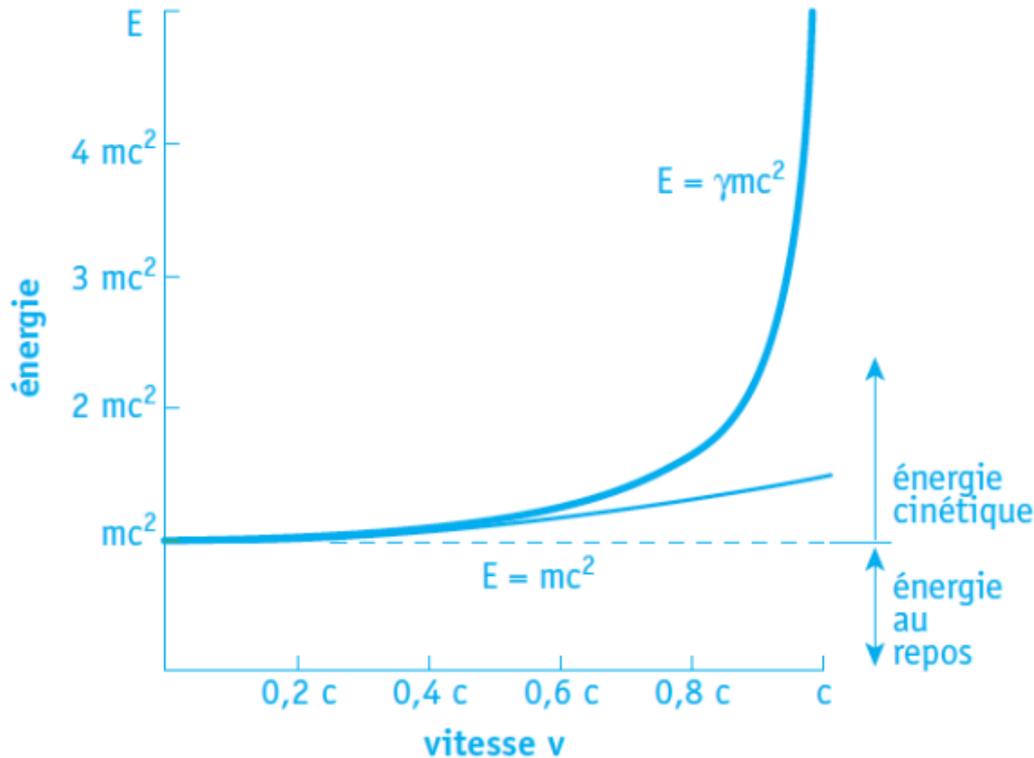
Différents types de collisionneurs

Notion de luminosité

Le LHC

Pourquoi accélérer des particules

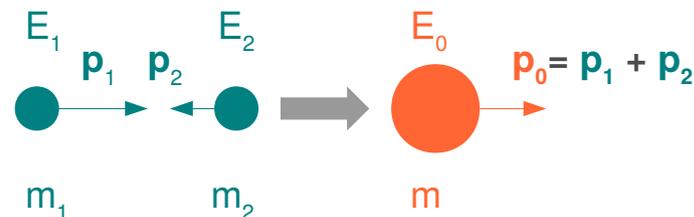
- ◆ Énergie en mécanique relativiste : $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$:
On peut créer une particule de masse m en fournissant l'énergie E^2/c^2



© Lison Bernet pour la fête de la science

<http://lisonbernet.illustrateur.org>

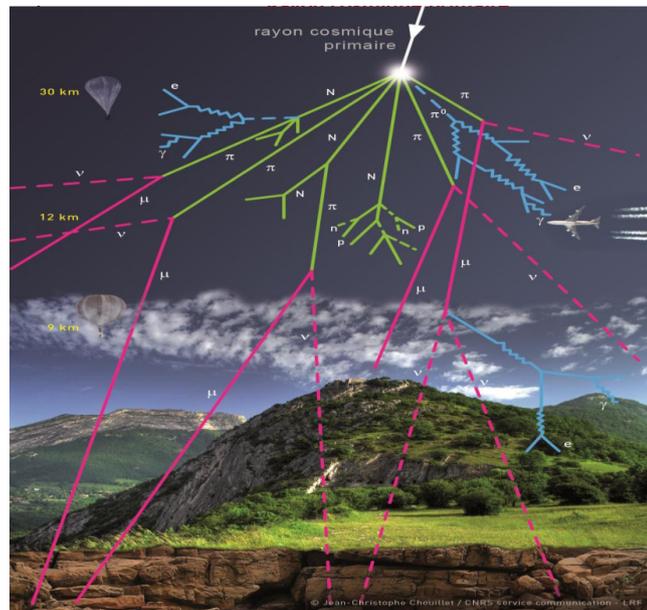
- ◆ En fournissant assez d'énergie on peut créer une particule plus lourde que les particules incidentes !





Accélérateurs naturels

- ◆ Il existe des accélérateurs et sources de particules naturels :
 - Le **soleil** est une source de **neutrinos** de basse énergie via la fusion de noyaux ($p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e$)
 - sources **galactiques** et extragalactiques : origine encore mal comprise. Particule la plus énergétique jamais détectée : $3.2 \cdot 10^{20}$ eV, soit 50 J, soit une balle lancée à 100 km/h, soit un million de fois le LHC
 - rayonnement cosmique primaire : protons, photons, noyaux, neutrinos



- ◆ Inconvénients : caractéristiques (nature des particules, énergie, taux, ...) non connues

Généralités

Principe des accélérateurs de particules

Différents types de collisionneurs

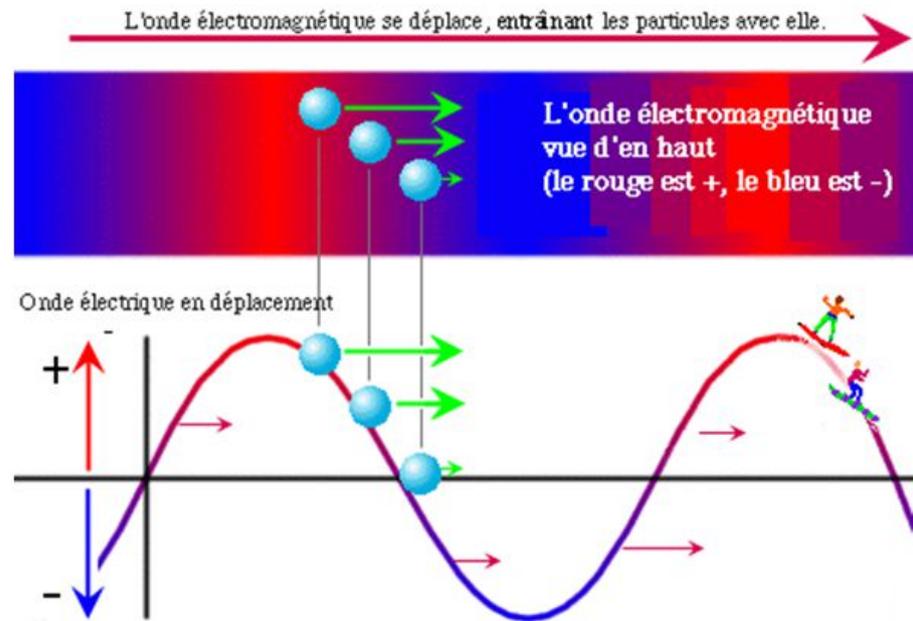
Notion de luminosité

Le LHC



Principes de base des accélérateurs (1)

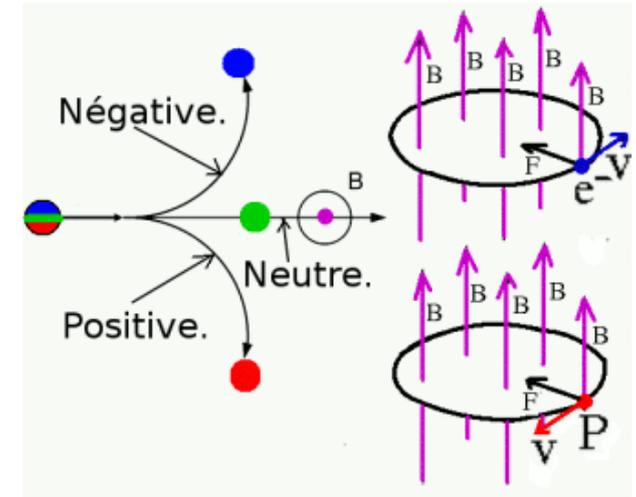
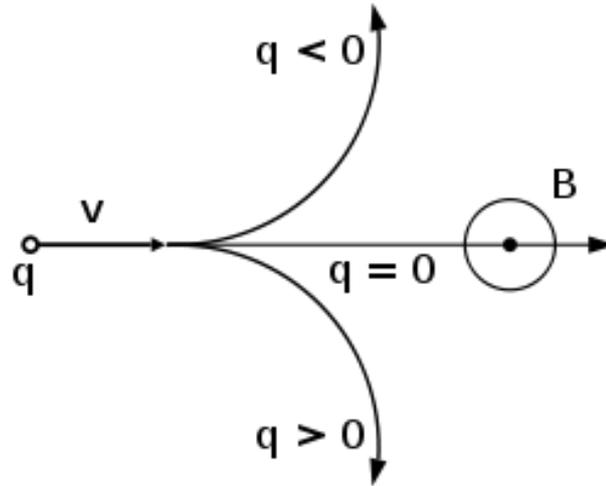
- ◆ Champs **électriques** pour **accélérer** les particules : $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$
 - ◆ Statiques : Cockroft-Walton, Van de Graaf, etc
 - ◆ Variables : produit par une onde elmg de haute fréquence (cavités RF)
 - le champ généré pour osciller à une fréquence donnée (ex. au LHC : 400 MHz)
 - lorsque le faisceau a atteint l'énergie requise, une particule qui arrive au moment idéal, et avec l'énergie idéale, ne subit aucune accélération
 - des particules avec des énergies légèrement différentes, arrivant un tout petit peu plus tard ou plus tôt, sont accélérées ou ralenties de manière à ce que leur énergie retrouve la valeur voulue
- ⇒ Le faisceau de particules est ainsi découpé en groupes de particules, appelés “**paquets**”



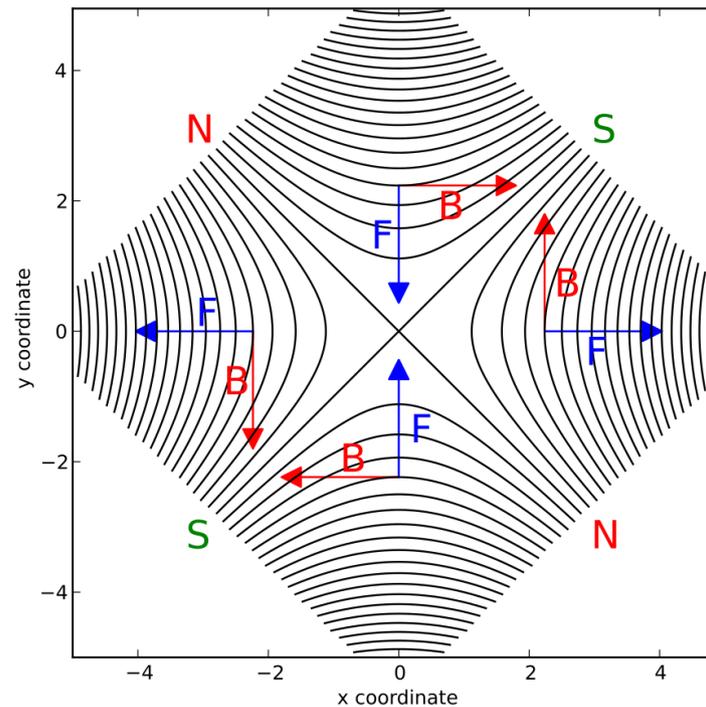
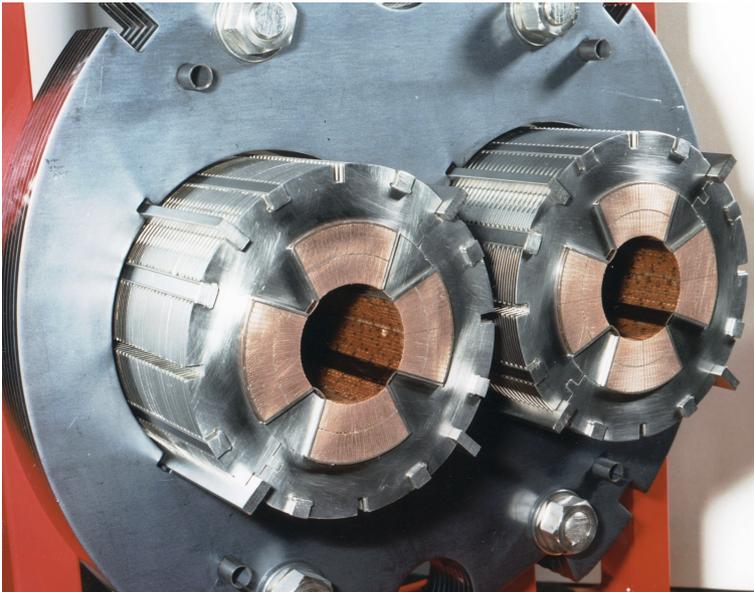


Principes de base des accélérateurs (2)

- ◆ Champs magnétiques pour **dévier** les particules : $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$



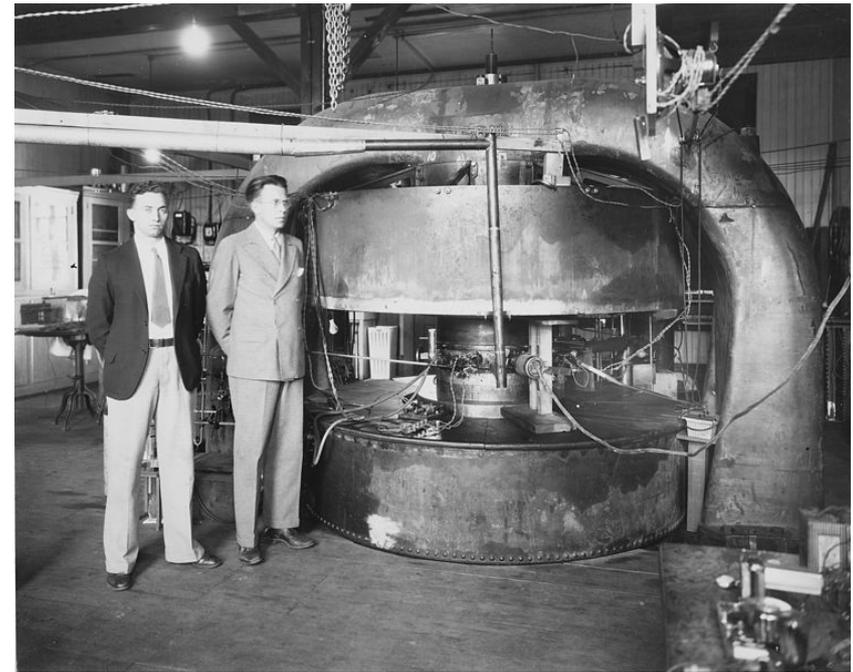
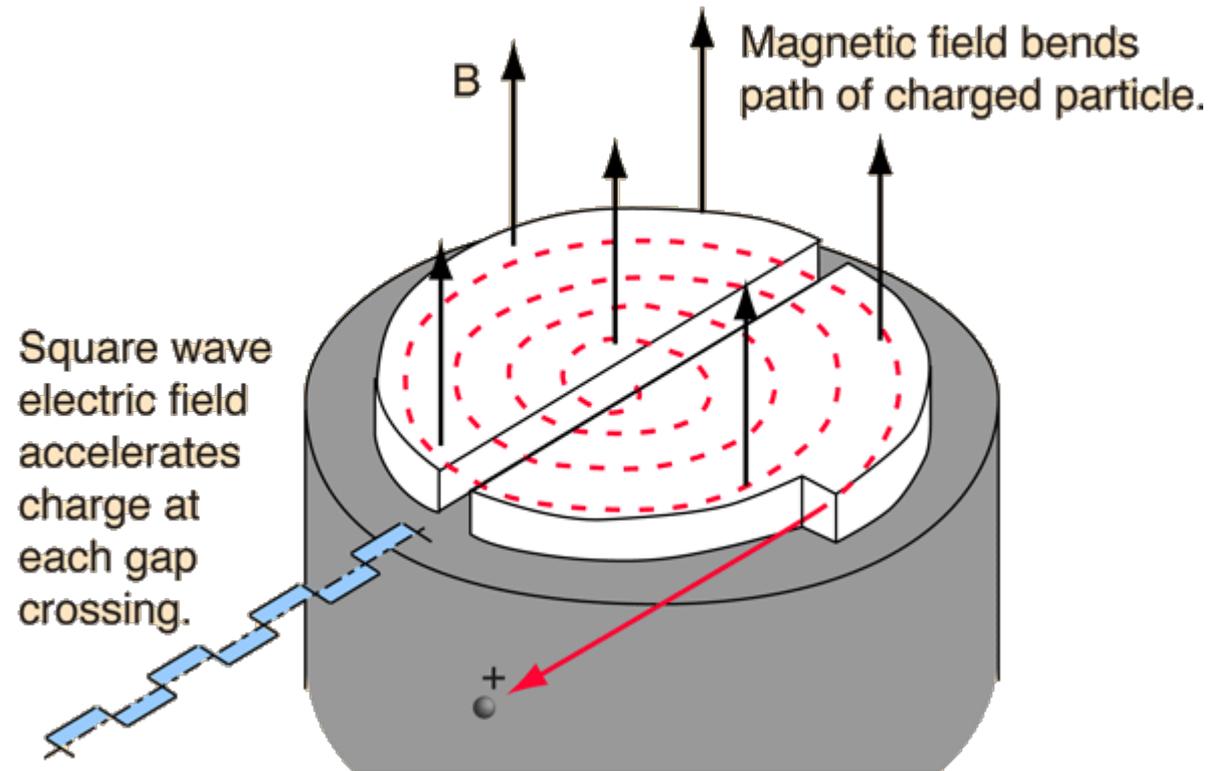
- ◆ et **focaliser** :





Exemple : le cyclotron

- ◆ Deux demi-disques avec champ magnétique constant + champ électrique alternatif entre les deux

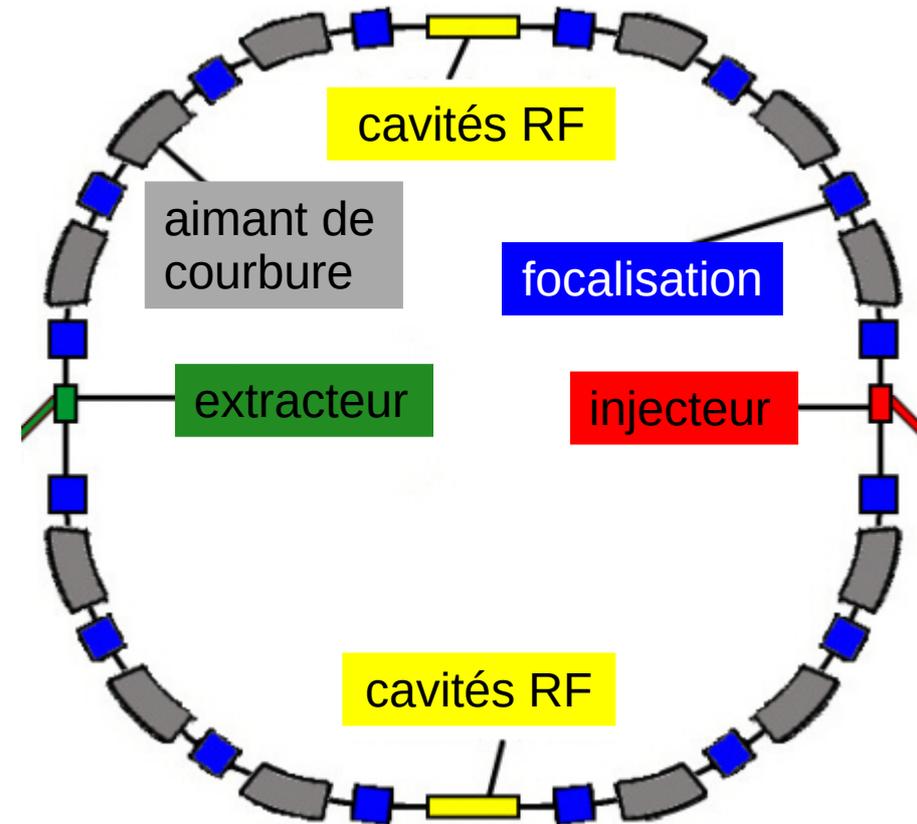


- ◆ Inventé par Lawrence dans les années 1930 → prix Nobel
- ◆ Énergie maximale : 70 MeV
- ◆ Toujours utilisé pour fabriquer les radio-nucléides



Exemple : le synchrotron

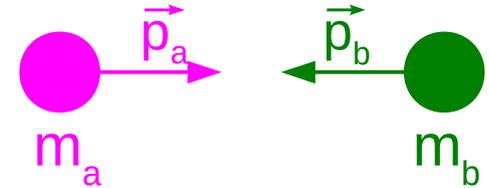
- ◆ **Anneaux** avec particules dans tubes à vide
 - cavités accélératrices
 - aimants de courbure pour maintenir les particules sur une trajectoire circulaire
- ◆ Intensité du champ magnétique et fréquence de la tension accélératrice **synchrones** avec l'énergie des faisceaux
- ◆ Aimants de **focalisation**/défocalisation pour maintenir la forme du faisceau (équivalent lentilles convergentes/divergentes)
- ◆ Beaucoup des **accélérateurs récents**, permet d'atteindre de très hautes énergies
 - LEP, PS, SPS, Tevatron, LHC
 - ESRF, Soleil





Cible fixe vs collisionneurs

- ◆ **Énergie** dans “le [référentiel de] centre de masse” (CM), notée \sqrt{s}
 - référentiel dans lequel la somme des impulsions des particules est nulle
 - c’est l’**énergie utile** dans une collision
 - $s = (E_a + E_b)^2 - (\vec{p}_a + \vec{p}_b)^2 = m_a^2 + m_b^2 + 2E_a E_b = 2\vec{p}_a \cdot \vec{p}_b$



- ◆ Collision sur **cible fixe** ($p_b = 0$)
 - très utilisée avant les collisionneurs
 - la seule possible quand le projectile est une particule neutre, ou dans le cas de rayons cosmiques
 - le centre de masse est en mouvement : $s = m_a^2 + m_b^2 + 2E_a E_b$
 - si $E_a \gg m_a, m_b$, $\sqrt{s} = \sqrt{2E_a m_b}$

- ◆ **Collisionneurs** : deux particules allant dans le sens inverse
 - énergie utile dans le cas de deux particules identiques : $s = 2m_a^2 + 2E_a^2 + 2p_a^2$
 - si $E \gg m_a, m_b$, $\sqrt{s} = 2E$

- ◆ Exemple : proton d’énergie 6.5 TeV (LHC)
 - cible fixe : $\sqrt{s} = 0.1$ TeV
 - collisionneur $\sqrt{s} = 13$ TeV

Généralités

Principe des accélérateurs de particules

Différents types de collisionneurs

Notion de luminosité

Le LHC



Collisionneur d'électrons (1) : les faisceaux

- ◆ Electrons et positrons sont **stables** et **chargés**
 - ils peuvent être accélérés
 - ils peuvent être guidés
 - ils peuvent tourner dans l'anneau d'un collisionneur et être maintenus dans le centre d'un tube à vide

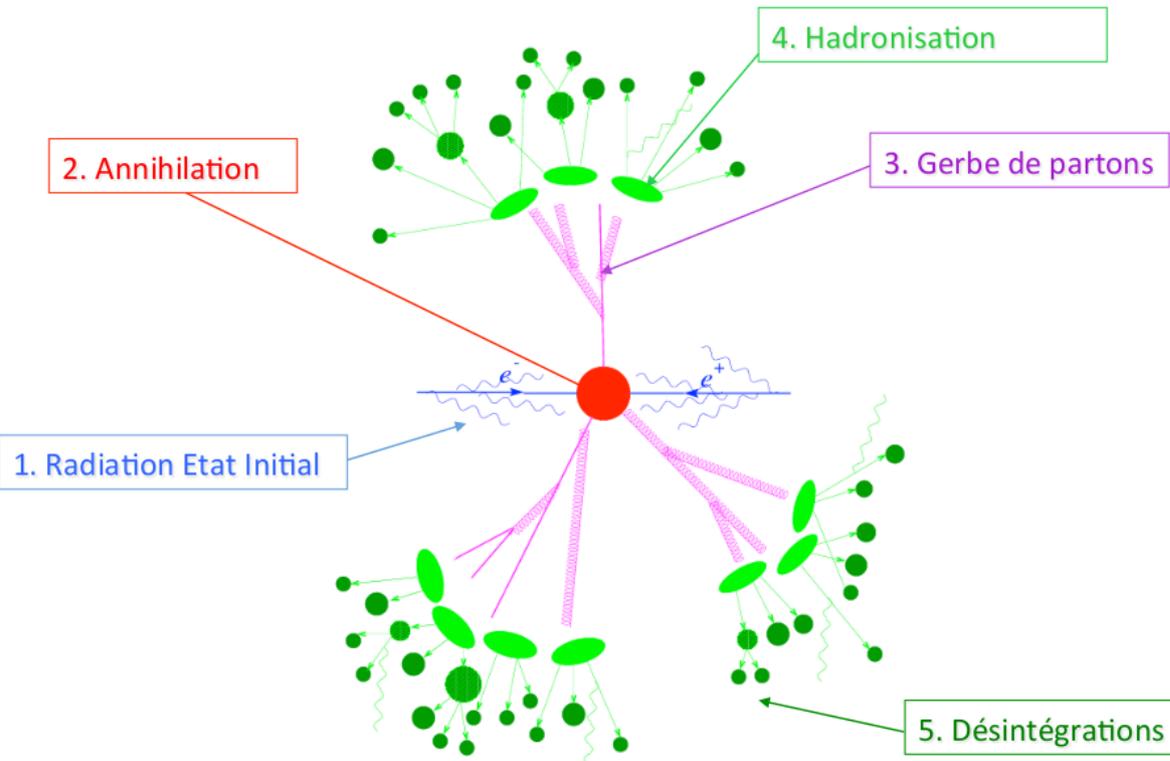
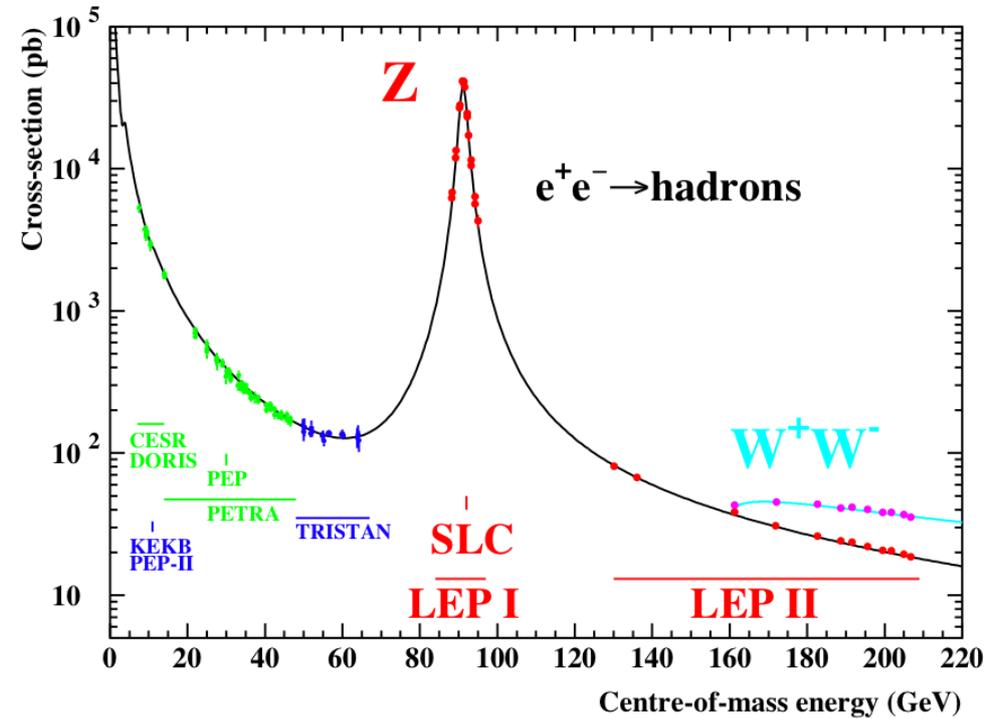
- ◆ Production des **électrons** : **facile**
 - matière première abondante
 - électrons faciles à arracher des atomes
 - faisceaux d'électrons font (faisaient ?) partie de la vie courante : télé cathodique, oscilloscope

- ◆ Production des **positrons** :
 - l'antimatière n'existe pas naturellement
 - ex. : bombardement d'une cible de tungstène par une partie du faisceau d'électrons initialement produits
 - s'annihilent avec la matière \Rightarrow il faut les confiner dans le vide



Collisionneur d'électrons (2)

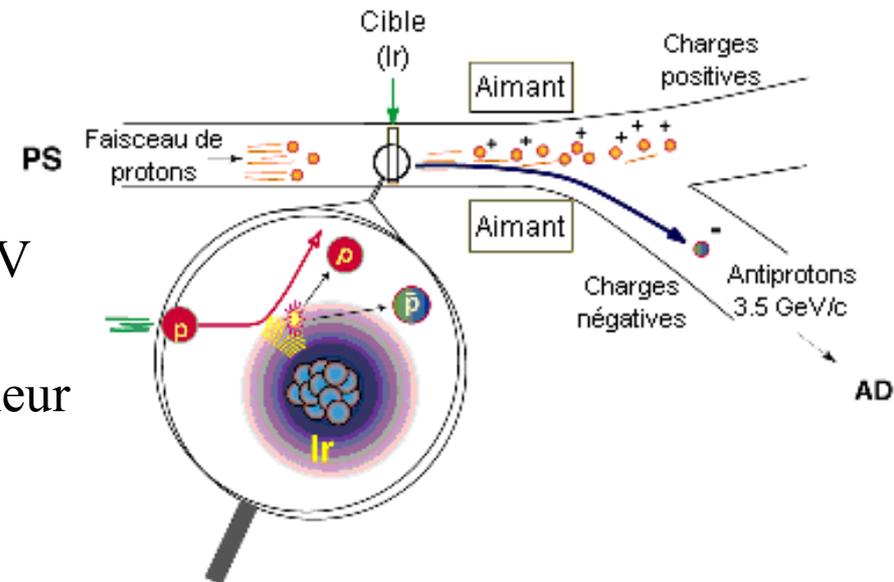
- ◆ Électron particule ponctuelle
- ◆ Énergie collision = E_{CM}
 - pour des mesures précises
- ◆ Événements propres





Collisionneur de protons (1) : faisceaux

- ◆ Protons et anti-protons sont **stables** et **chargés**
- ◆ Production de **protons** : **facile**
 - simple épluchage d'atomes d'hydrogène
- ◆ Production d'**anti-protons**
 - produits lors de la collision sur une cible d'un faisceau intense de protons de qqs GeV
 - ceux-ci sont dirigés sur des cibles fixes ou stockés pour être injectés dans le collisionneur

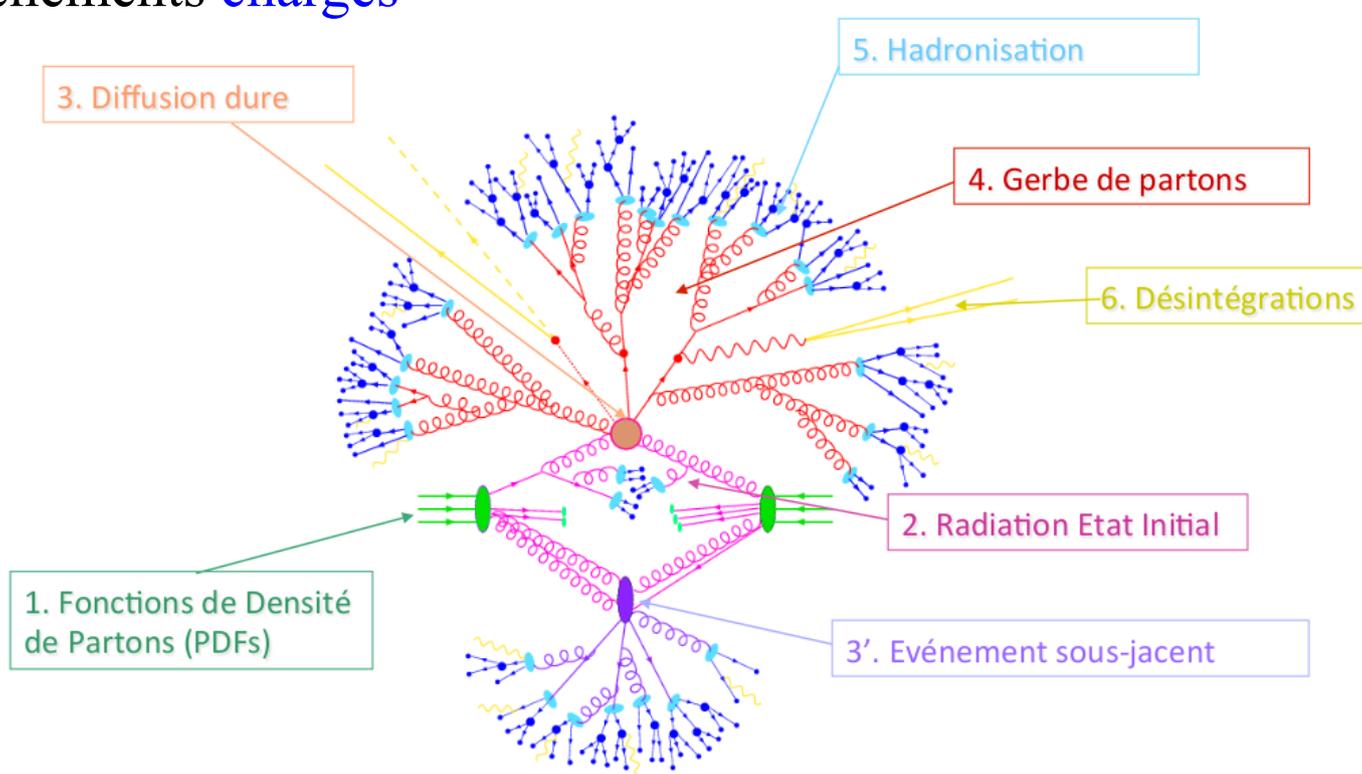
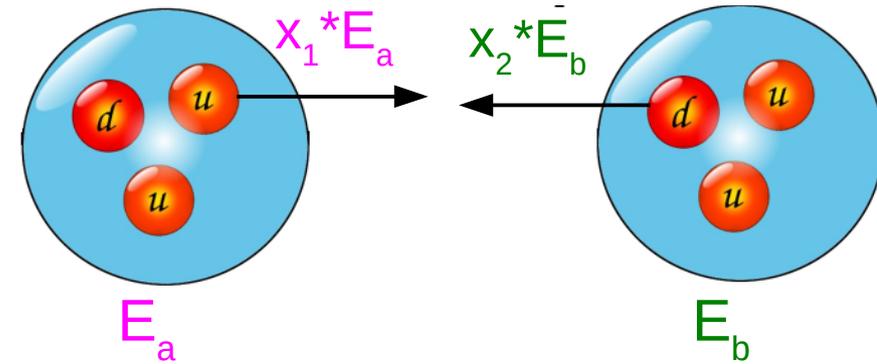


- ◆ **Stockage** des antiprotons
 - il faut accumuler les antiprotons s'ils doivent être envoyés dans un collisionneur
 - avant d'être accélérés ceux-ci doivent être "refroidis", c'est-à-dire rassemblés en paquets de quantité de mouvement homogènes
 - Simon Van der Meer, inventeur d'une méthode de stockage et de refroidissement des antiprotons, prix Nobel 1984
- ◆ Conséquence : moins d'intensité avec collisionneur $p\bar{p}$
 - mais pp et $p\bar{p}$ semblables à **haute énergie**



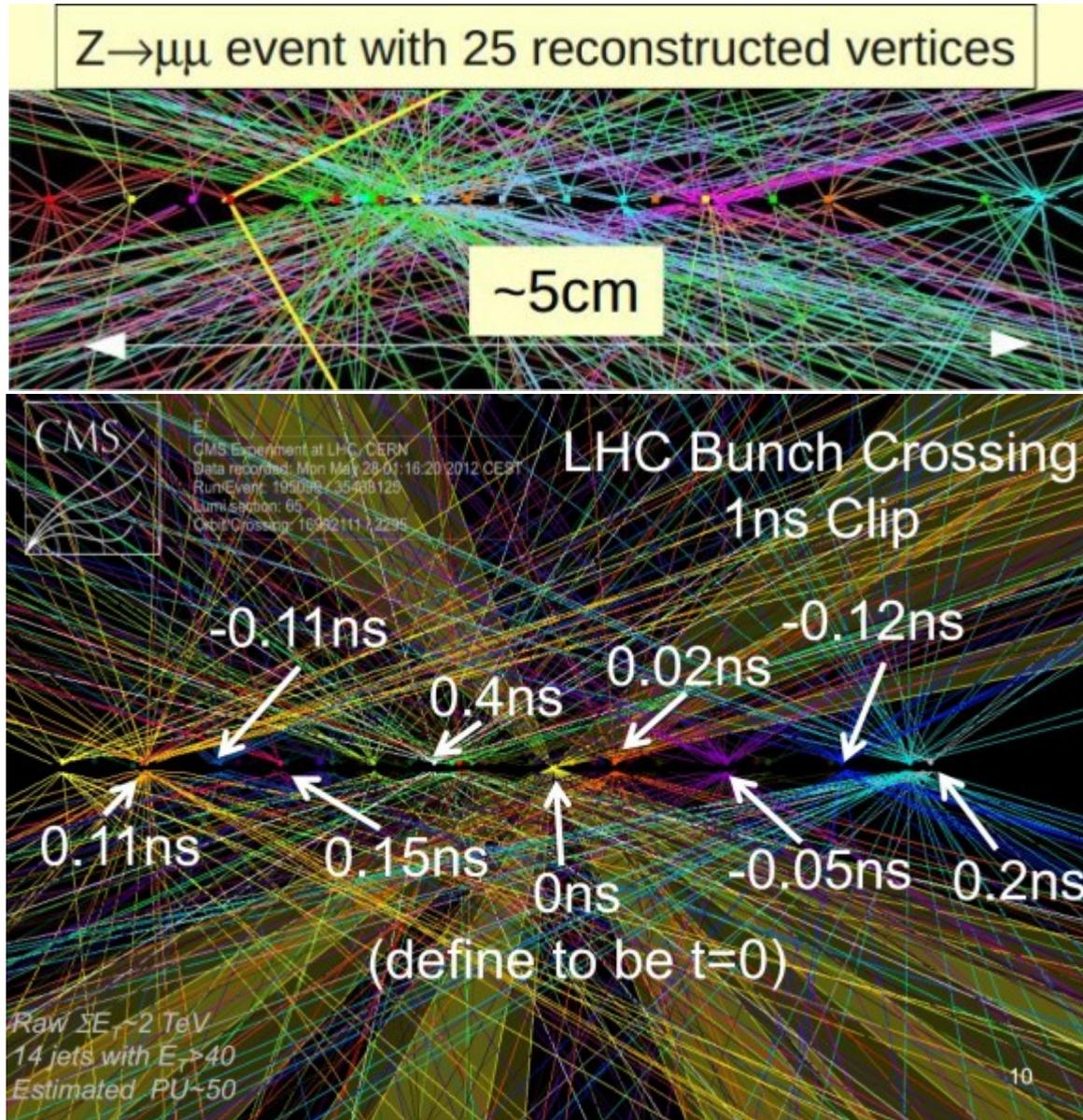
Collisionneur de protons (2)

- ◆ Protons : particules composites
- ◆ Énergie collision $< E_{CM}$
 - on balaie toutes les énergies de 0 à E_{CM}
⇒ pour des recherches
- ◆ Énergie collision inconnue
 - mais énergie transverse totale nulle
- ◆ Événements **chargés**



Collisionneur de protons (3)

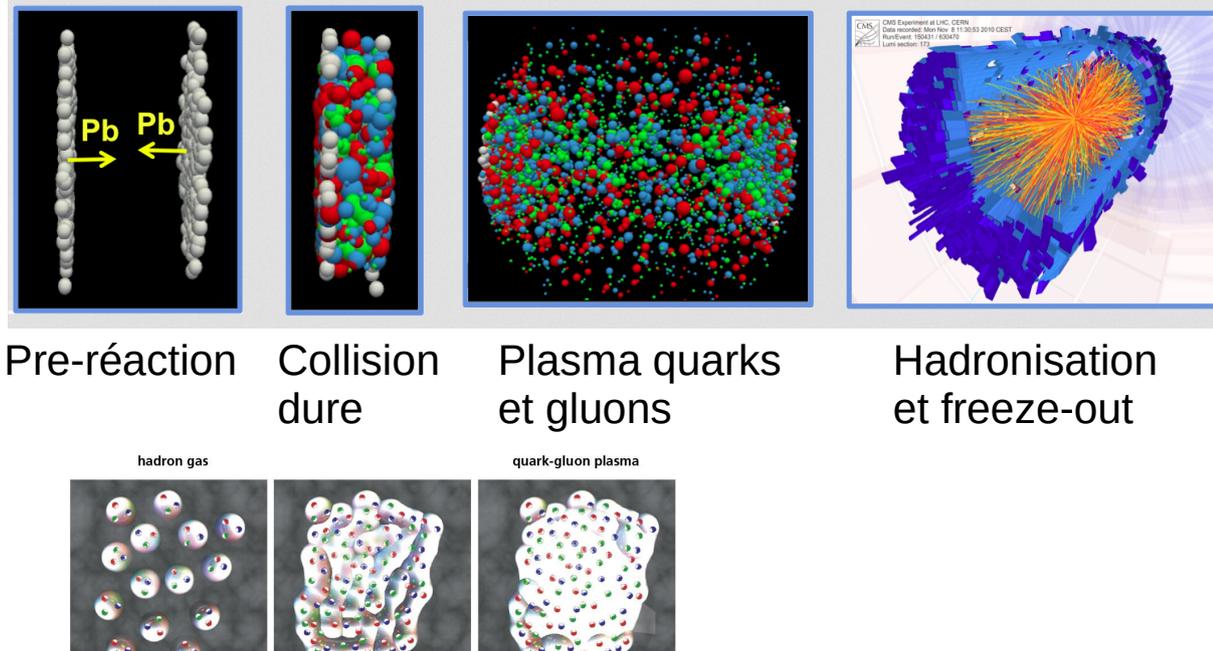
- ◆ $\sim 10^{11}$ protons par paquet \Rightarrow plusieurs collisions par croisement de faisceau
Pile-up ou **empilement**



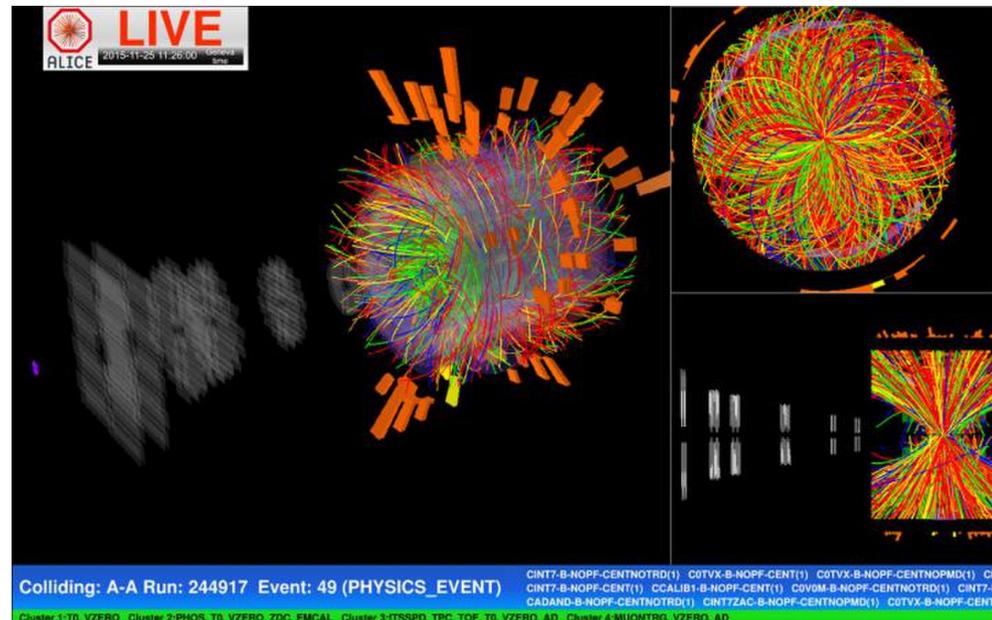


Collisionneur d'ions lourds

- ◆ Ions Pb, Au, ...
- ◆ Ici on ne cherche pas à créer de nouvelles particules, mais à avoir un milieu suffisamment chaud et dense pour que les **quarks** et les **gluons** à l'intérieur des noyaux forment un **plasma**
 - état de l'univers entre 10^{-12} et 10^{-6} s après le big-bang



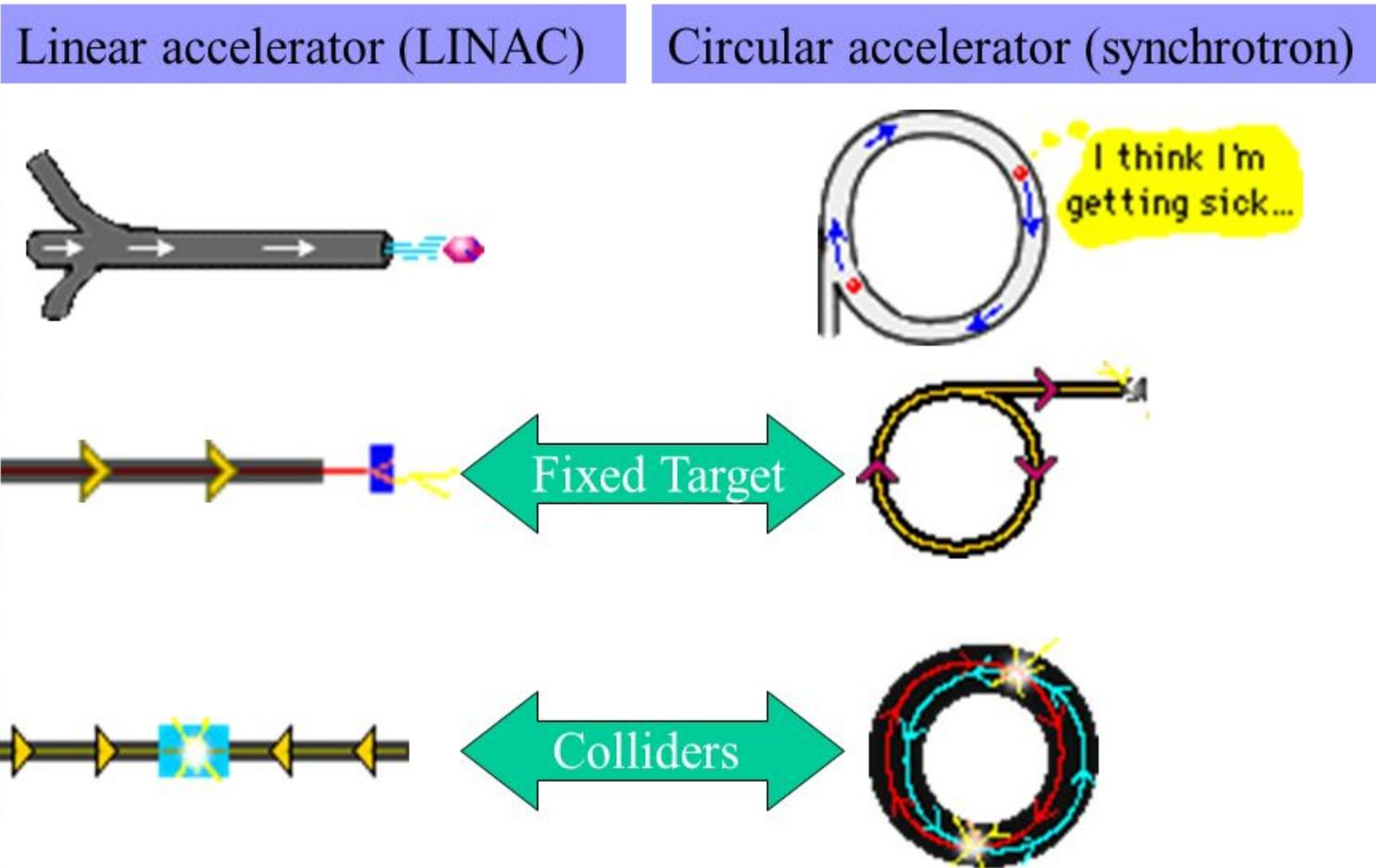
- ◆ Événements très chargés





Résumés des types d'accélérateurs

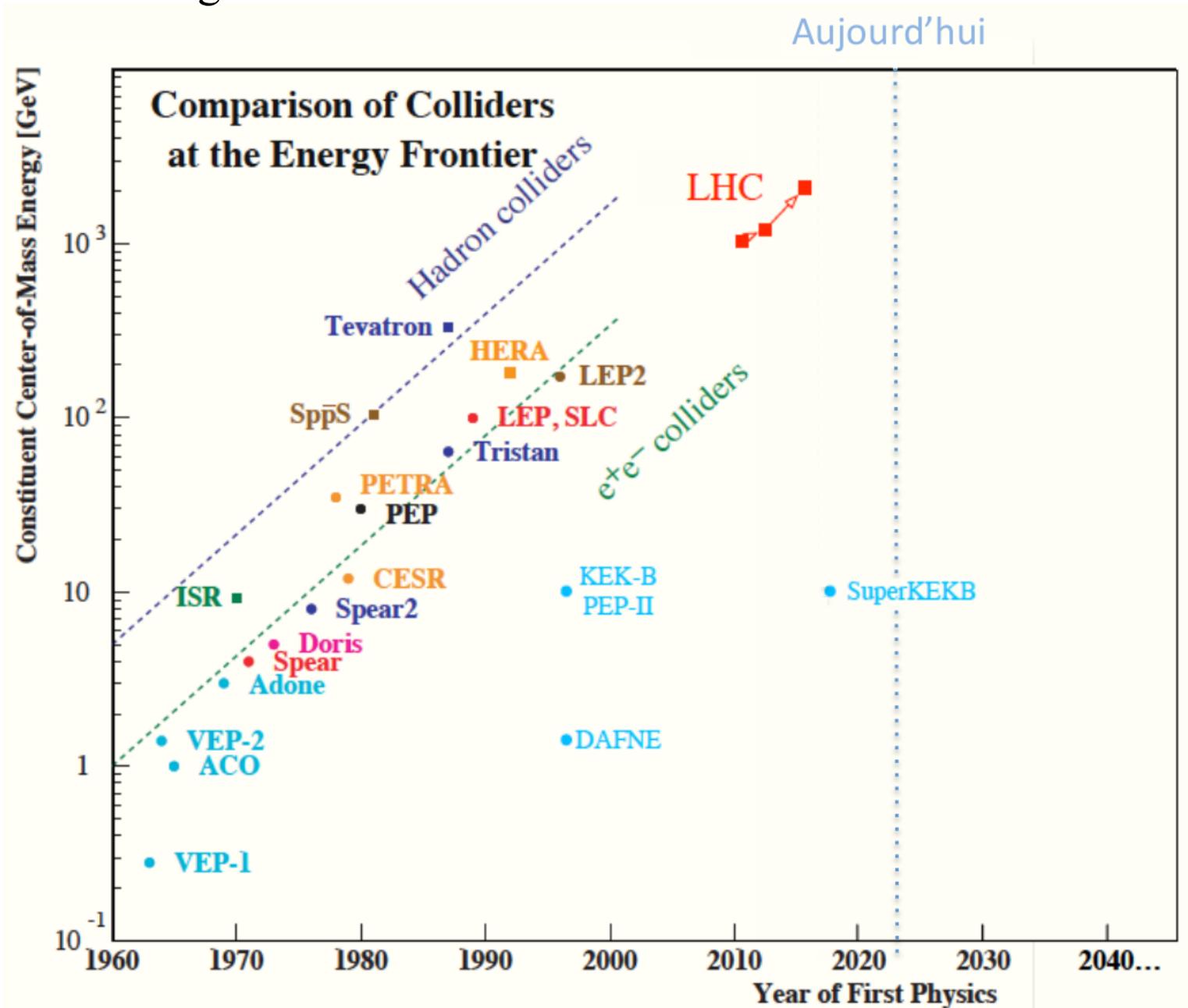
- ◆ Linéaires/circulaires
- ◆ Cible fixe/collisionneurs



(Source: http://pdg.web.cern.ch/pdg/cpep/lin_circ.html)

Accélérateurs dans l'histoire (1)

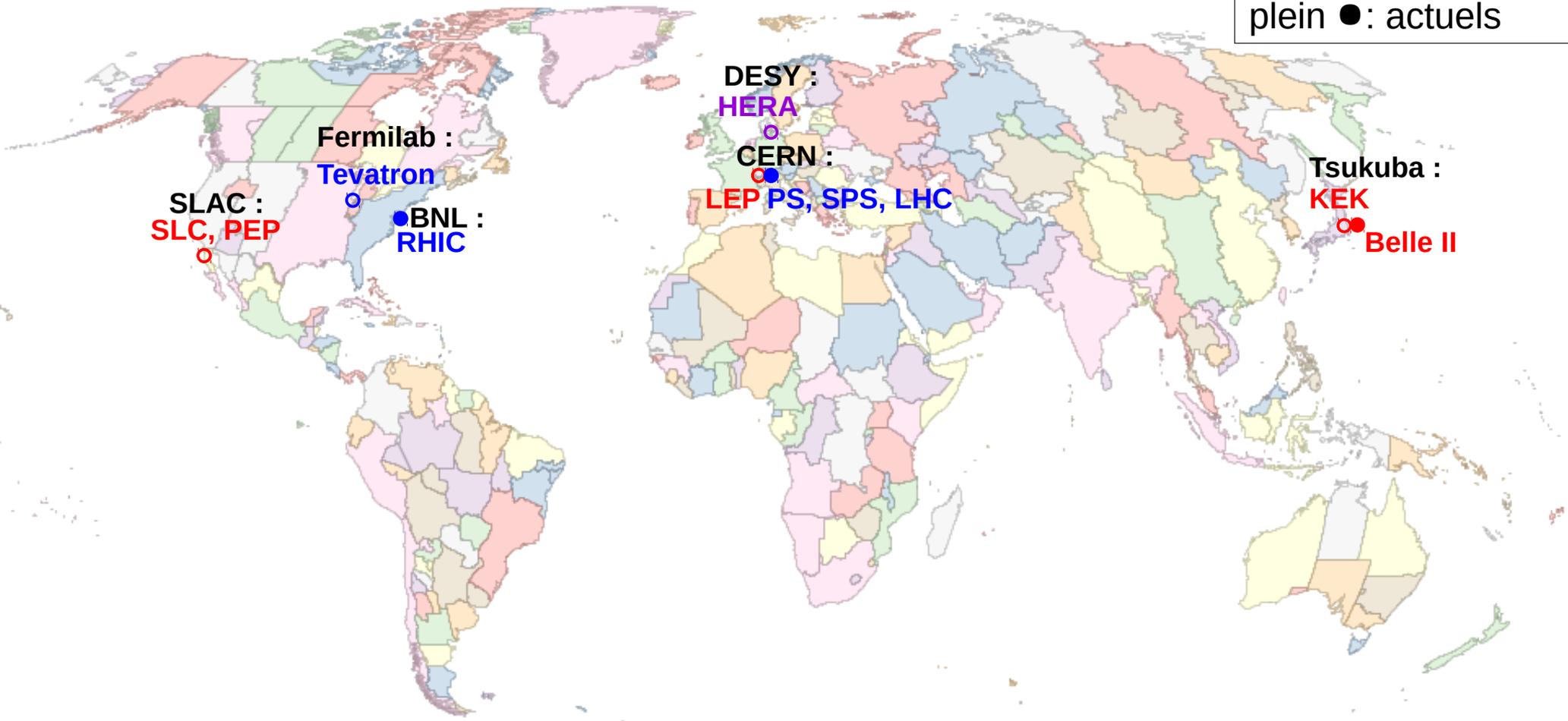
◆ Course à l'énergie



Accélérateurs dans l'histoire (2)

◆ Principaux centres et accélérateurs de physique des particules

bleu : hh
rouge : ee
violet : ep
ouvert ○ : anciens
plein ● : actuels



Généralités

Principe des accélérateurs de particules

Différents types de collisionneurs

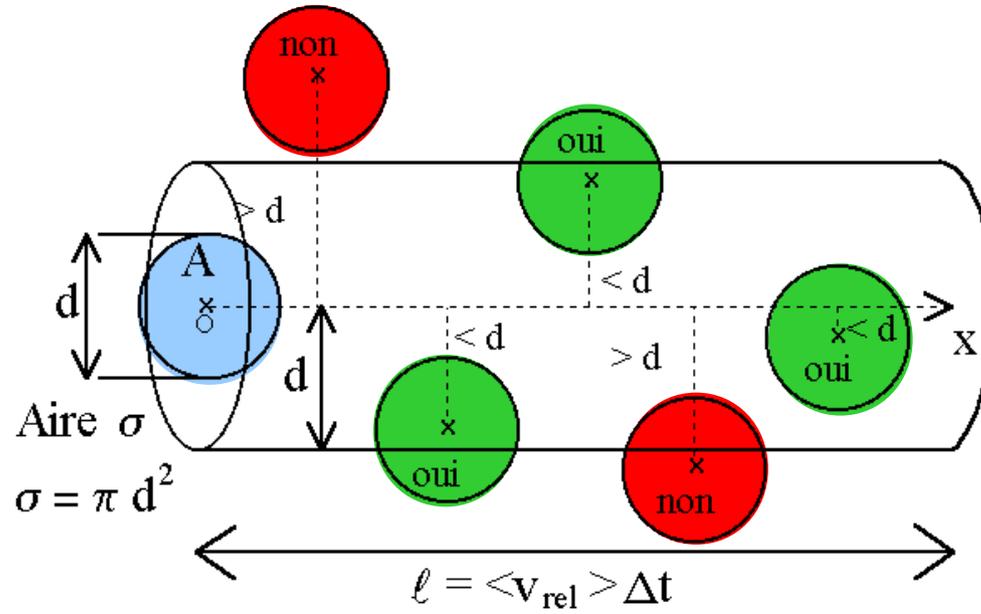
Notion de luminosité

Le LHC



Section efficace (1)

- ◆ En mécanique **classique** : **surface** à travers laquelle le projectile doit passer pour que la réaction se produise

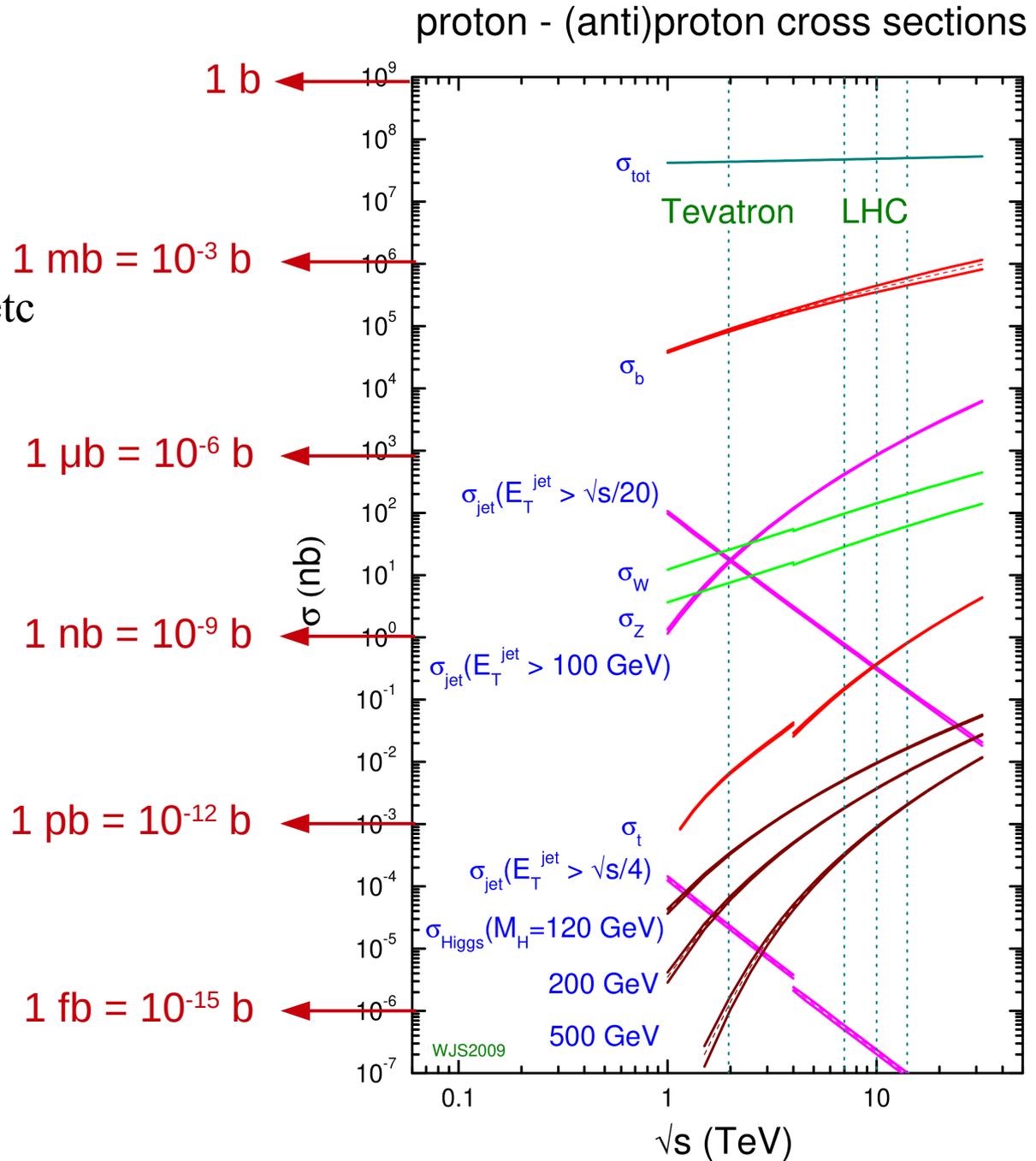


- ◆ En mécanique **quantique** : **probabilité** de réaction
 - plus la section efficace d'une réaction est grande, plus la probabilité qu'une particule soit créée lors de la collision est grande
 - dimension d'une surface



Section efficace (2)

- ◆ Notation : σ
- ◆ Unité : cm^2 ou **barn** :
 - 1 barn = 10^{-24} cm^2
 - sous-multiples : fb, pb, nb, etc
- ◆ Elle augmente avec l'énergie





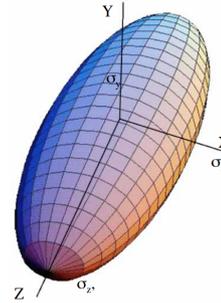
Luminosité

◆ Taux d'interaction des collisions

- proportionnelle au nombre de collisions en un temps donné
- pour un processus donné $N_{\text{particules créées}} = \sigma \cdot L$

◆ $L = \frac{n^2 \cdot B \cdot f}{A}$

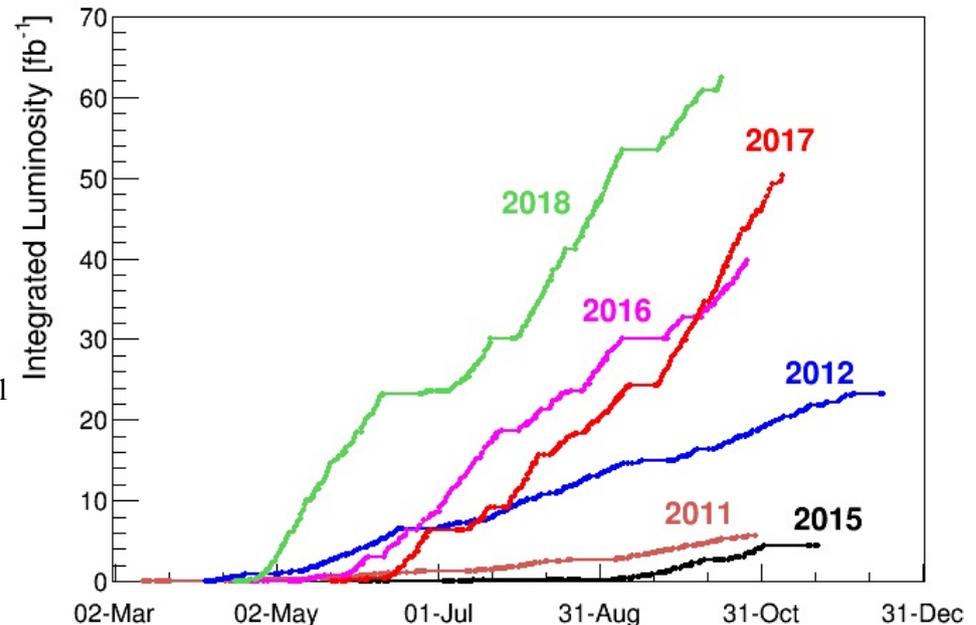
- n = nombre de particules par paquet
- B = nombre de paquets
- f = fréquence de l'orbite
- A = aire de la section des paquets = $4\pi \cdot \sigma_x \sigma_y$



◆ Unité : $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

◆ Luminosité intégrée : $\int L \cdot dt$

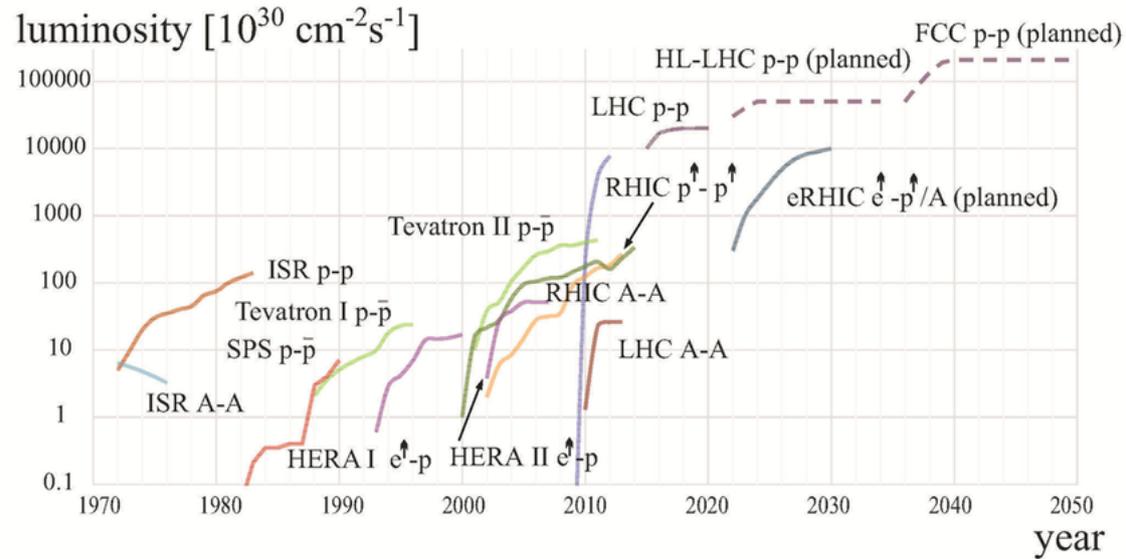
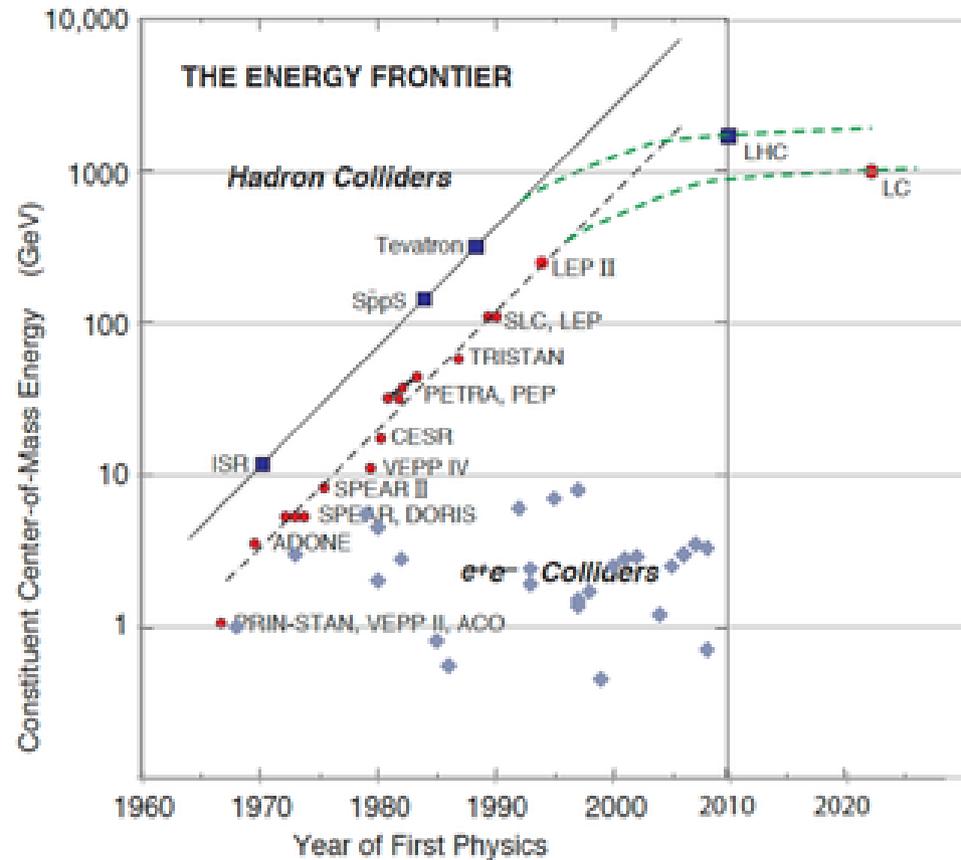
- en barn⁻¹
- ou pb⁻¹, fb⁻¹, etc
- ex. Run 2 du LHC : total 140 fb⁻¹
 - 25 Mds bosons W
 - 8 Mds bosons Z
 - 7 M bosons de Higgs





Résumé pour produire plus de particules

- ◆ Nombre de particules produites : $N = \sigma.L$
- ◆ Augmenter l'énergie pour augmenter la section efficace : “frontière de l'énergie”
- ◆ Augmenter la luminosité : “frontière de la précision”



Généralités

Principe des accélérateurs de particules

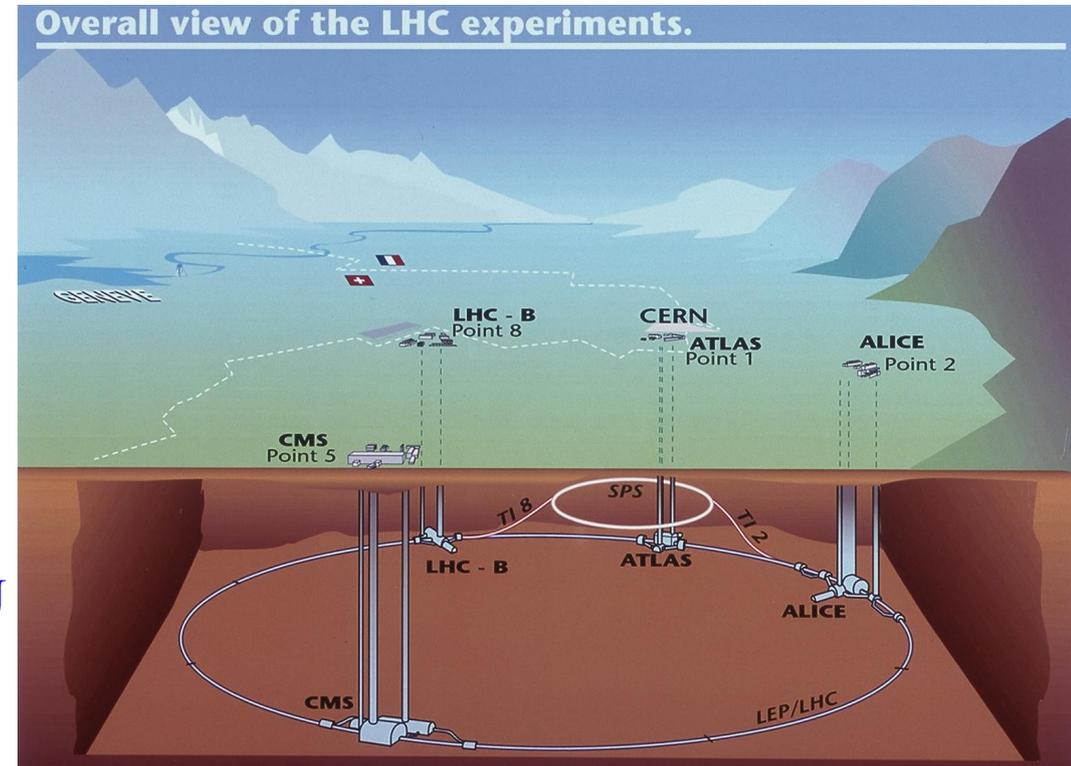
Différents types de collisionneurs

Notion de luminosité

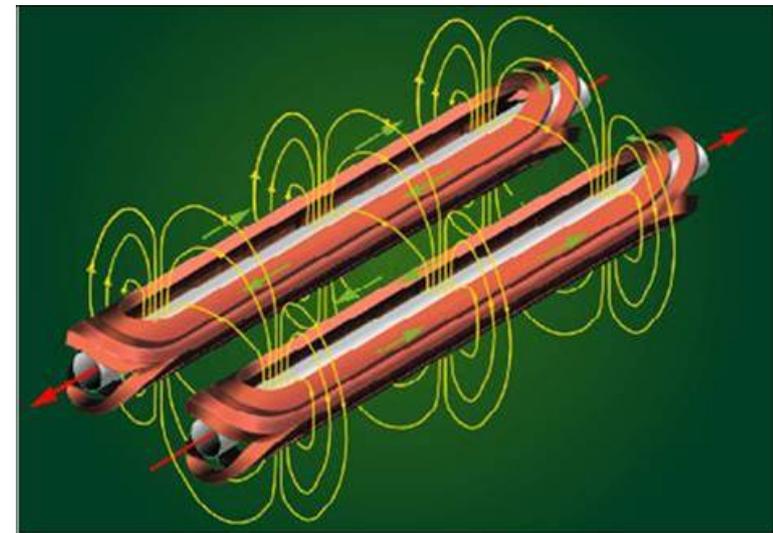
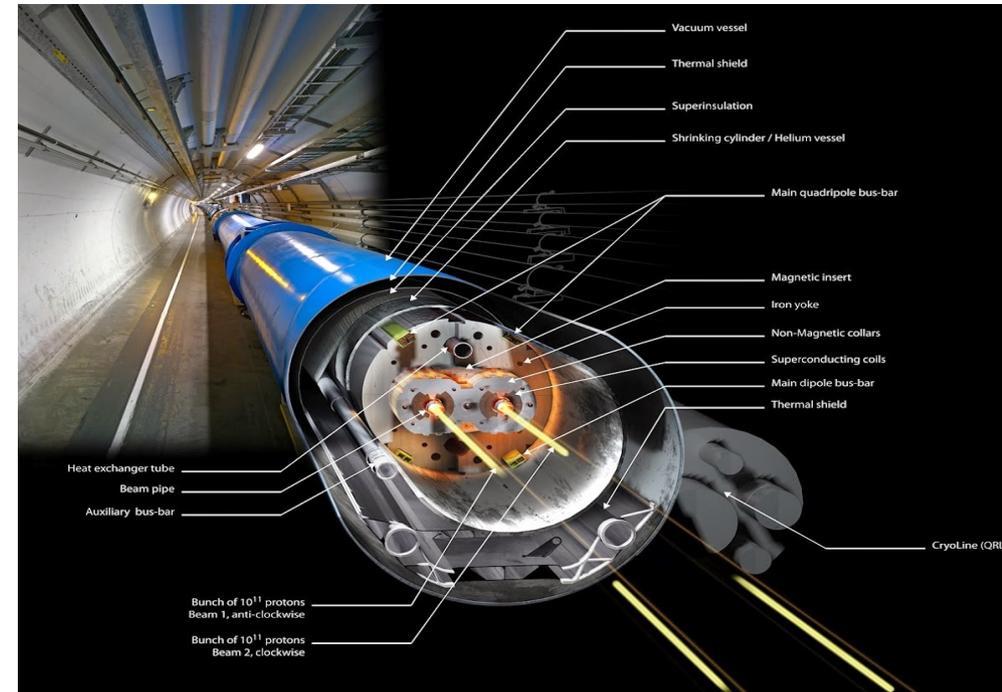
Le LHC

Le LHC (1)

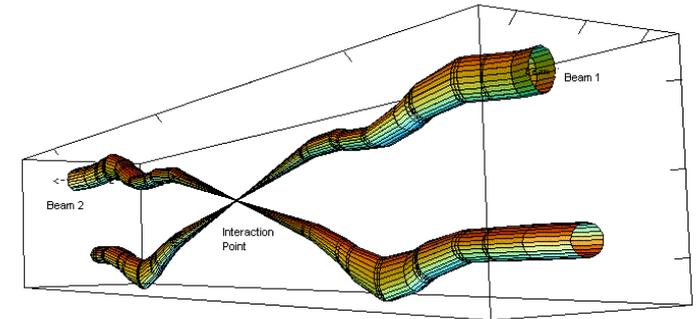
- ◆ Large : 27 km de long
- ◆ Hadron : protons ou noyaux de plomb
- ◆ Collider : collisionneur
- ◆ Quelques chiffres :
 - énergie d'un proton : 6.5 TeV
 - moustique en vol
 - nombre de protons /paquet : 10^{11}
 - nombre de paquets : 2808
 - énergie totale des faisceaux : 350 MJ
 - TGV à 150 km/h
 - suffisant pour fondre 500 kg de cuivre
 - nombre de tours par seconde : 11245
 - alimentation électrique : 40 MW
 - consommation du canton de Genève
 - 100 m sous Terre
 - 600 millions de collisions /s



- ◆ Proton contre proton :
 - il faut deux tubes à vide (deux faisceaux de même charge, en sens inverse, ont besoin de champs magnétiques opposés)
- ◆ Aimants supraconducteurs
 - 9593 aimants, dont 1232 dipôles en Nb-Ti
 - 750 millions de km de cables supra
 - champs magnétique dipolaire maximal : **8.33 T**
 - 120 t d'Helium superfluide à **1.9 K**
 - le plus grand frigo de la planète

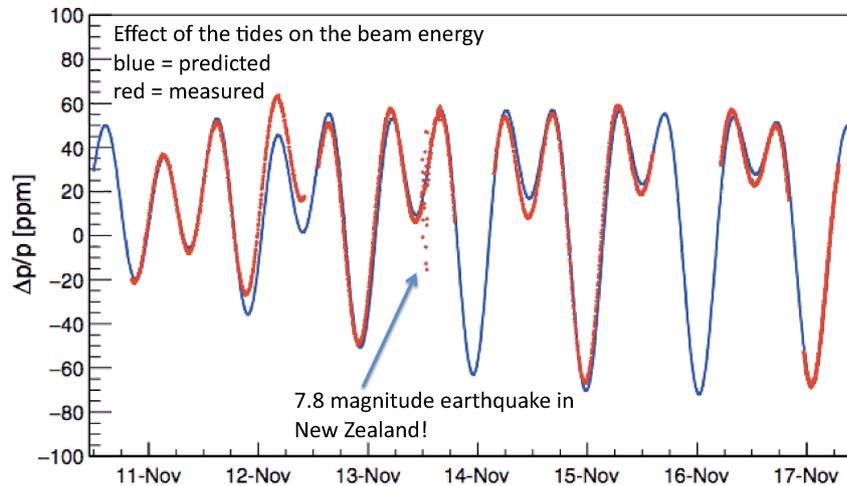


- ◆ **Paquets** : qqs cm de long, qqs mm d'épaisseur
 - taille transverse aux croisements de faisceaux : $16 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$
 - 10^{24} J/m^2

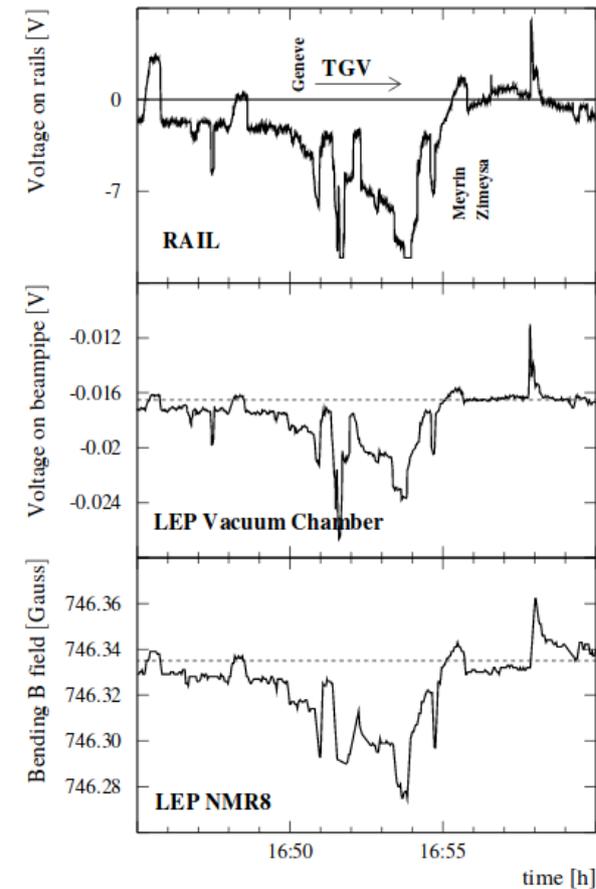


Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

- ◆ **Énergie connue avec une précision de 0.1%**
 - sensible aux marées terrestres qui changent la longueur totale de 1mm!



- ◆ **LEP (collisionneur e^+e^- dans le même tunnel)**
 - précision sur l'énergie de 20 ppm
 - sensible aussi au passage du TGV (courants de fuite)





Le LHC au CERN

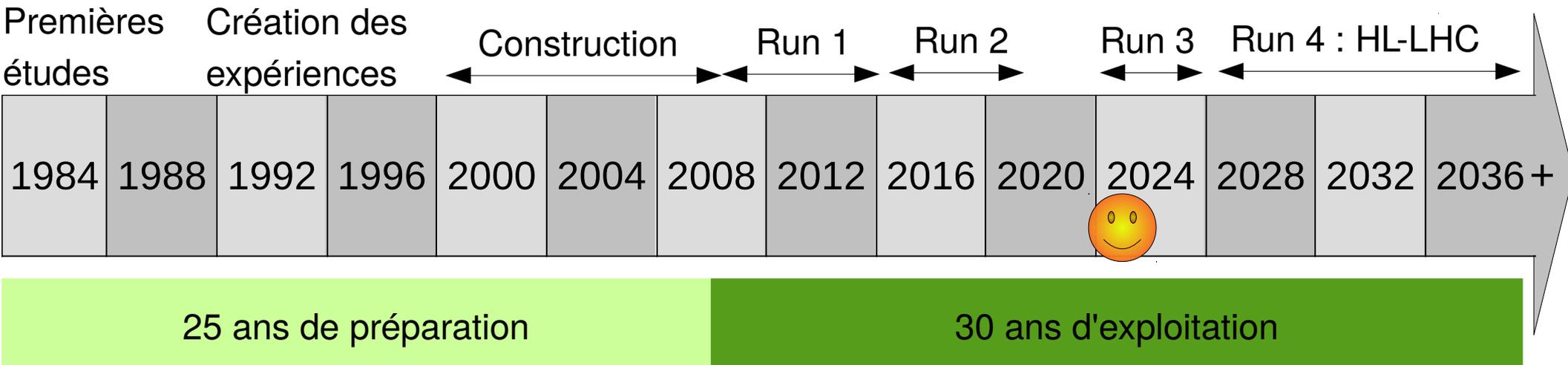
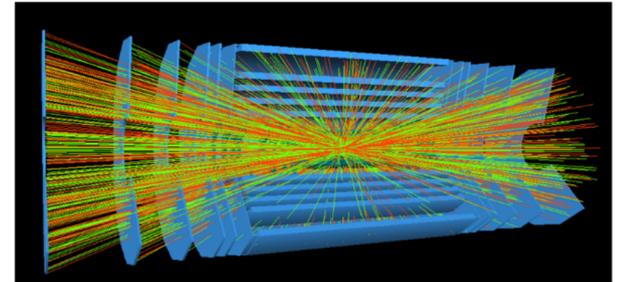
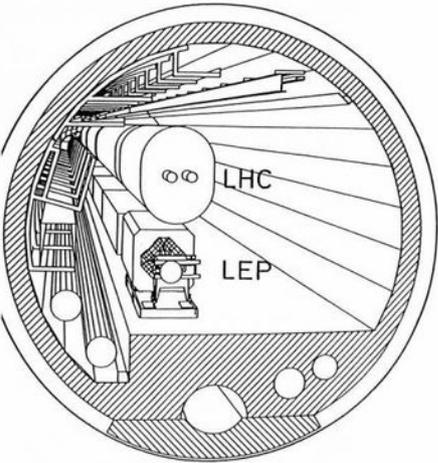
- ◆ Étape finale du réseau d'accélérateurs du CERN



version pdf : [lien vers la vidéo](#)

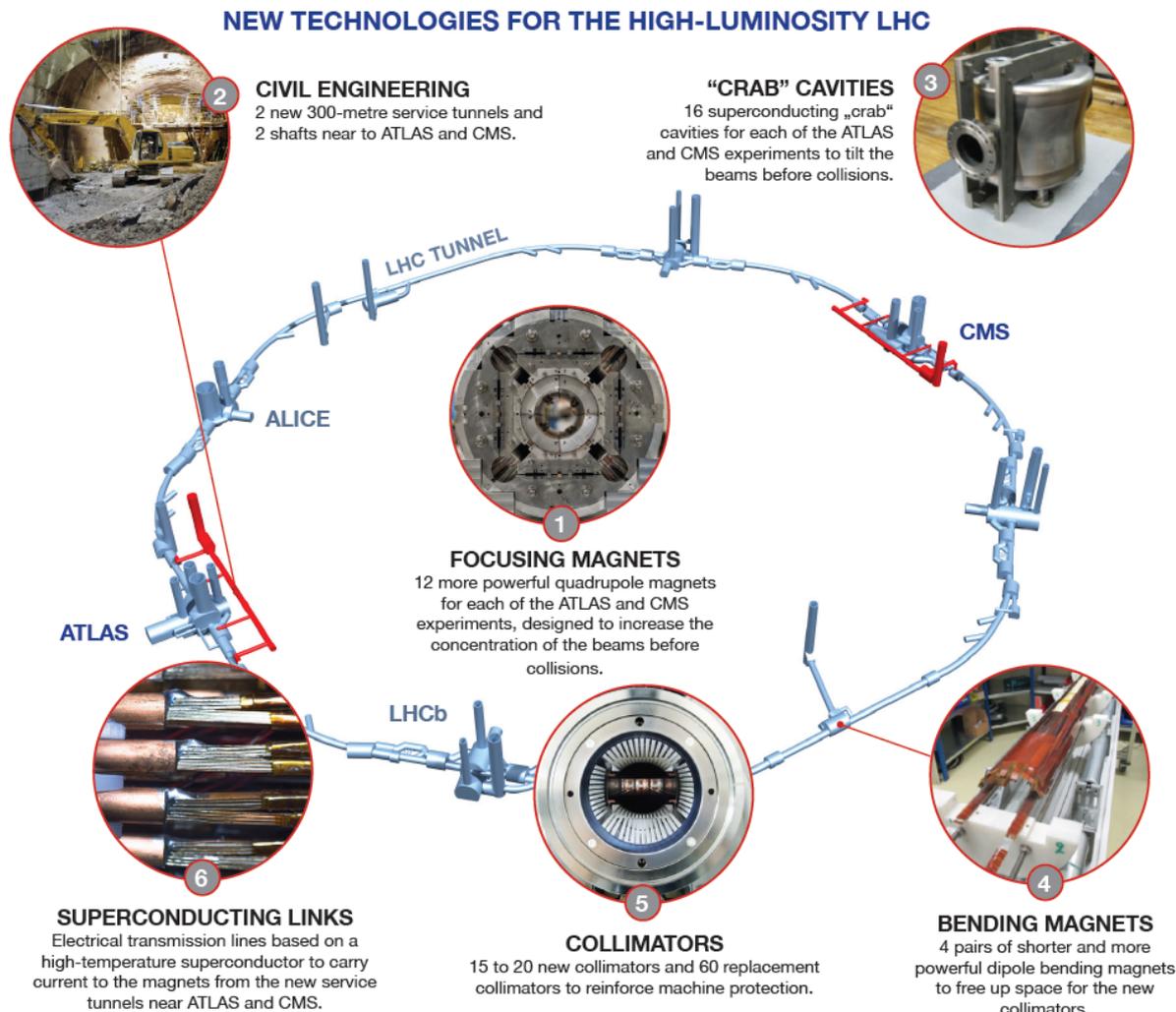


Historique du LHC



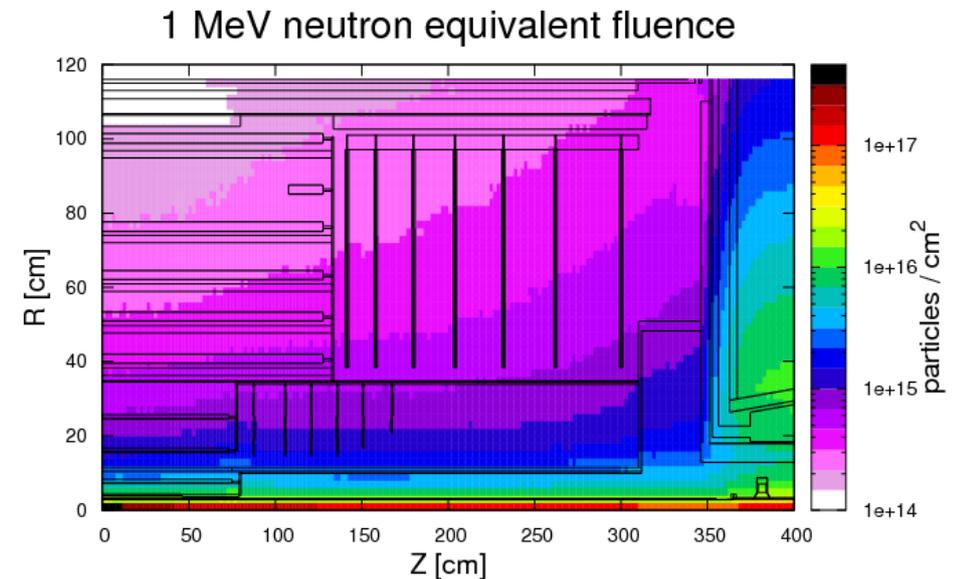
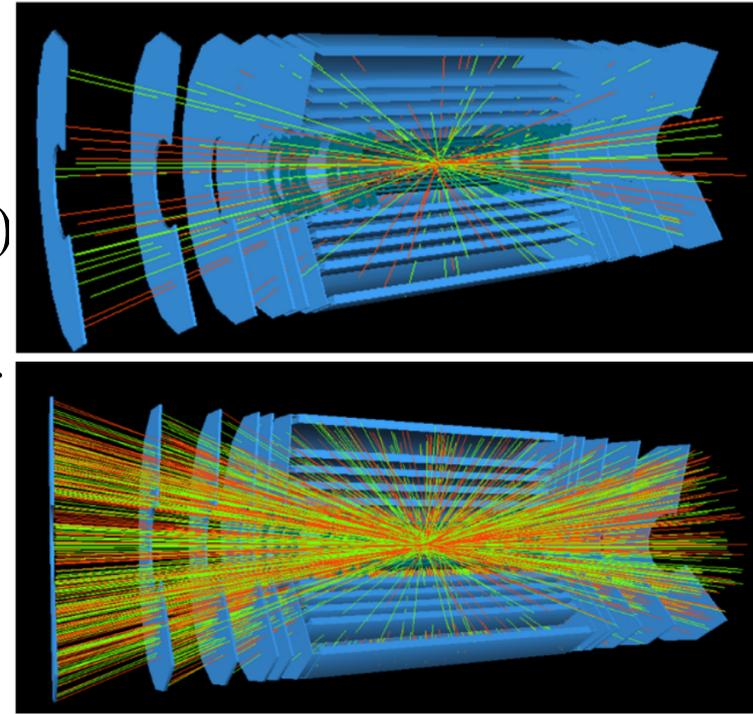
Upgrade du LHC : HL-LHC (1)

- ◆ **HighLuminosity-LHC** : augmentation de la luminosité
⇒ 10 fois plus de données (3000 fb^{-1})
- ◆ De 2029 à ~2040
 - installation en ~2027



Upgrade du LHC : HL-LHC (2)

- ◆ Enjeux :
- ◆ 200 collisions par croisement de faisceau (pile-up)
 - design d'ATLAS/CMS: 25 collisions
 - nécessité d'un nouveau trajectographe interne pour maintenir les performances de reconstruction des traces et des vertex, l'étiquetage des quarks b, etc
- ◆ Beaucoup plus de radiations
 - dose de ionisation totale : 7.7 MGy
 - design d'ATLAS/CMS : 1.5 MGy
- ◆ Computing
 - traitement des données augmente avec le nombre d'interactions
 - stockage !

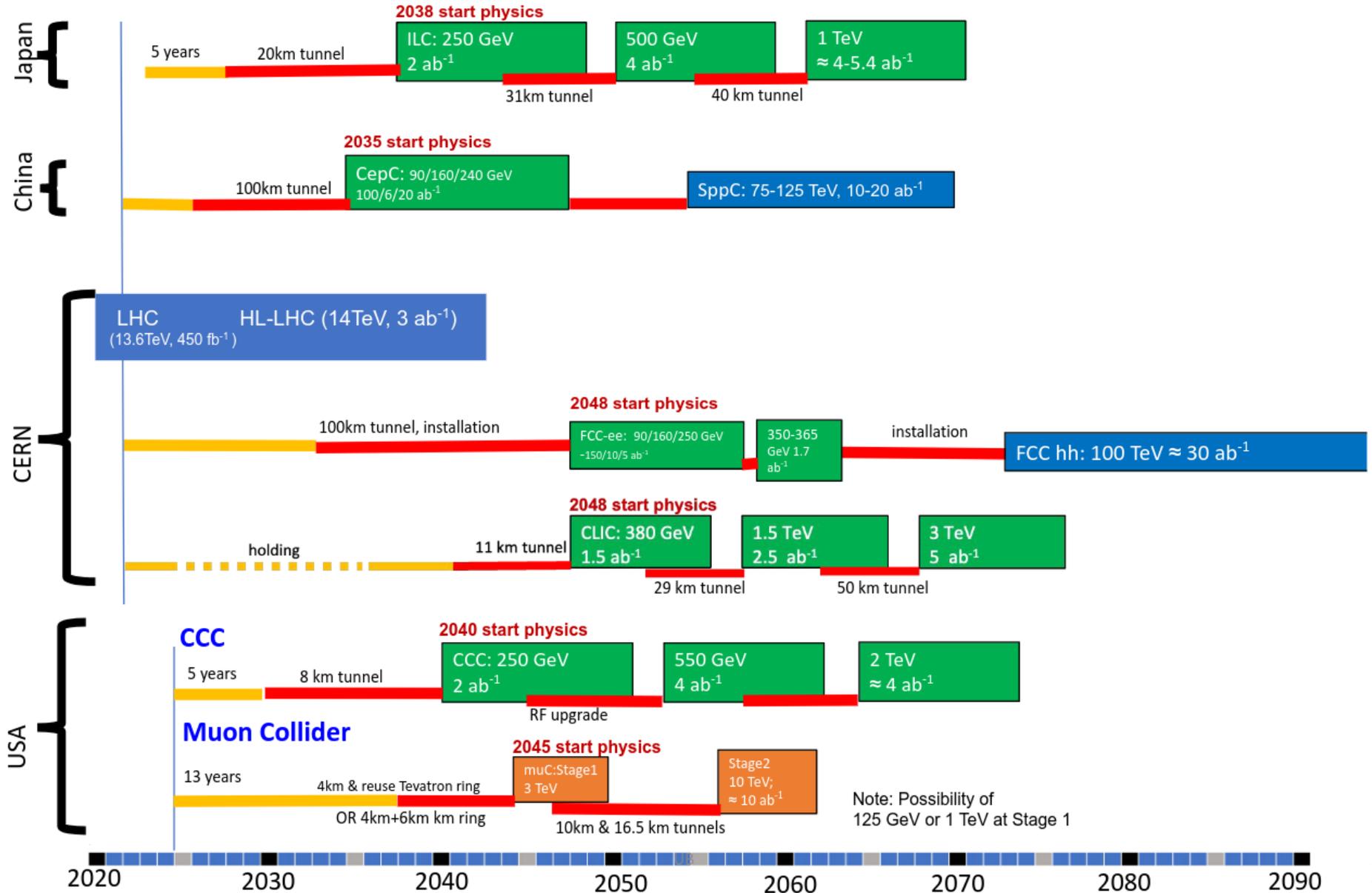




Futurs collisionneurs

Original from ESG 2020 by UB
Updated July 25, 2022 by MN

- Proton collider
- Electron collider
- Muon collider
- Construction/Transformation
- Preparation / R&D

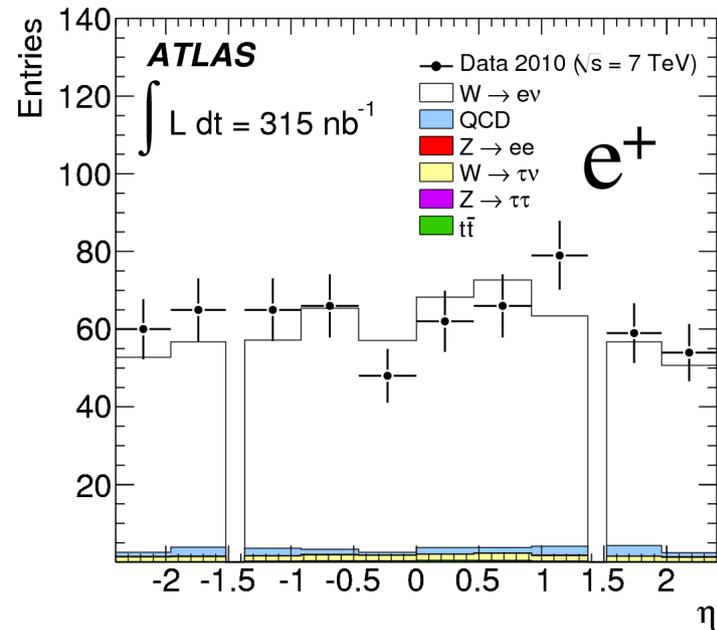
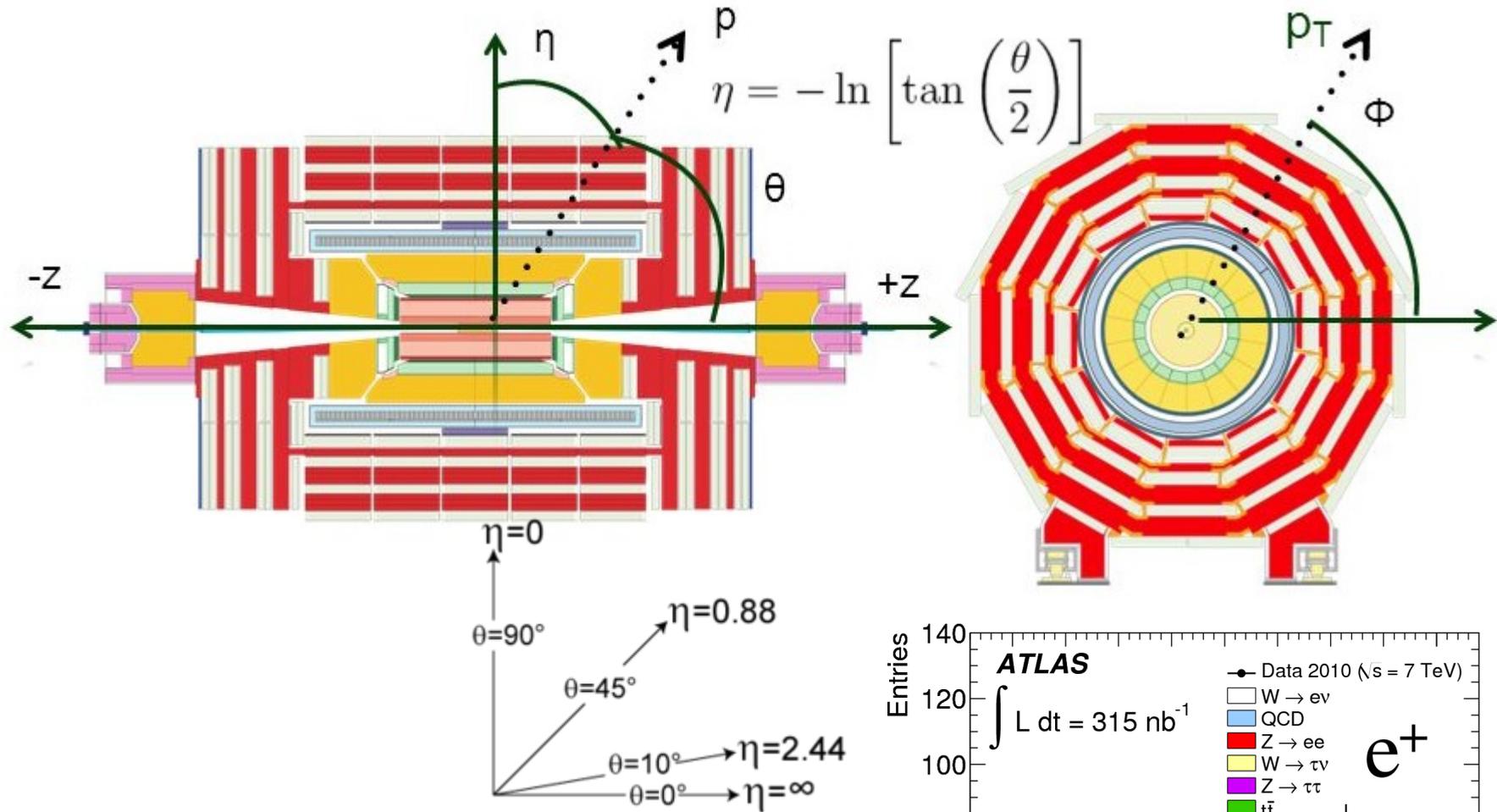


- ◆ Prochain cours : ce qu'on fait avec toutes ces collisions !

Back-up



Pseudo-rapidity

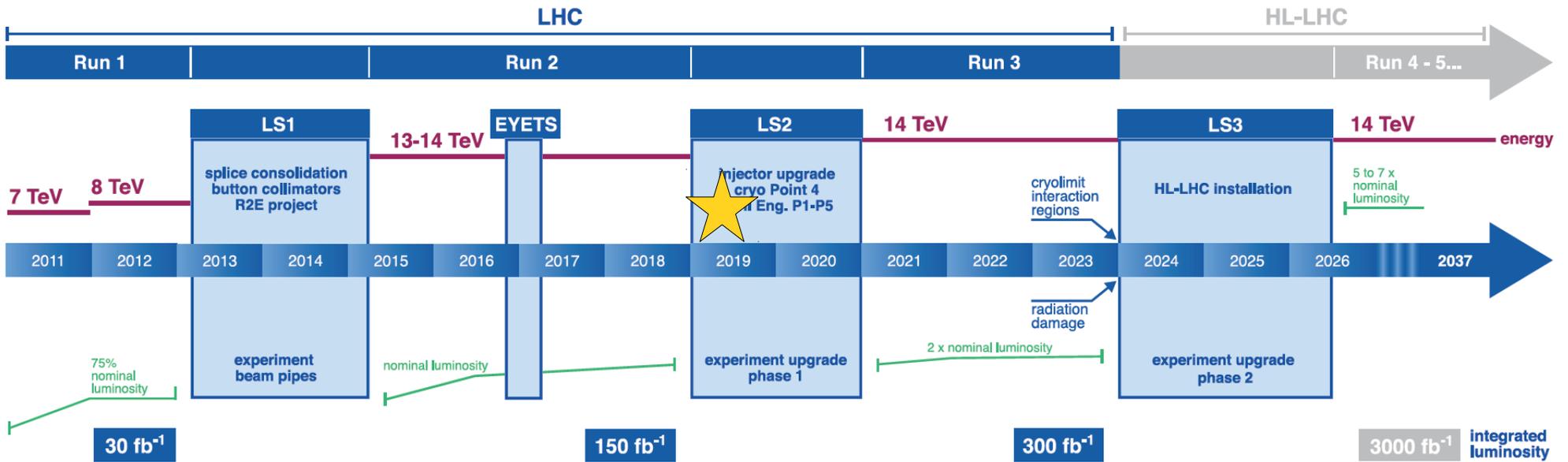


- ◆ Les sections efficaces de production ont tendance à être plates en fonction de η
- ◆ NB : $\eta = 4 \leftrightarrow \theta = 2^\circ$!

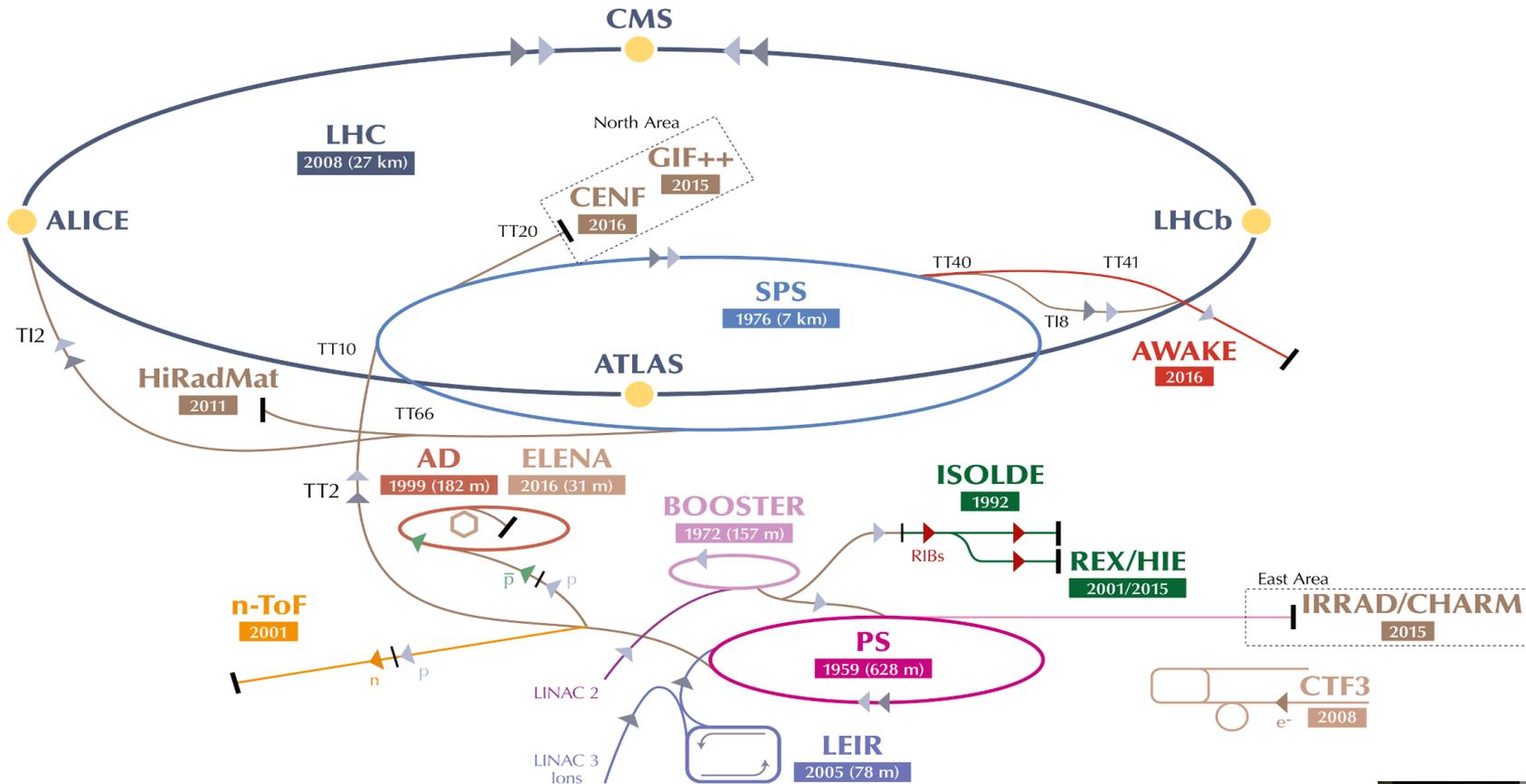


Le project HL-LHC

LHC / HL-LHC Plan



◆ Étape finale du réseau d'accélérateurs du CERN



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

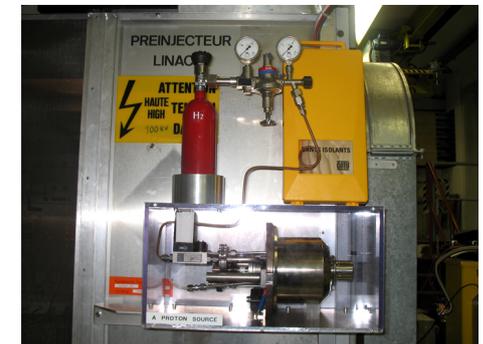
LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility

AWAKE Advanced WAKEfield Experiment ISOLDE Isotope Separator OnLine REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE

LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight HiRadMat High-Radiation to Materials

CHARM Cern High energy AcceleRator Mixed field facility IRRAD proton IRRADIation facility GIF++ Gamma Irradiation Facility

CENF CErN Neutrino platForm





Emprunts à d'autres cours 😊

- ◆ Cours de Steve Muanza à l'École "Techniques de base des détecteurs" 2017
- ◆ "Physique des particules aux collisionneurs", F. Ledroit, Bénodet 2017
- ◆ "Conception de détecteurs pour la physique des hautes énergies", P. Puzo, Bénodet 2017
- ◆ "Cours de master classes au CPPM", Y. Caodou et al
- ◆ Cours de I. Wingerter aux CERN Summer Students 2018
- ◆ "Un siècle d'étude des rayons cosmiques", D. Décamp, 2012

- ◆ Autre source importante : "The Review of Particle Physics (2018)", Particle Data Group