

# 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

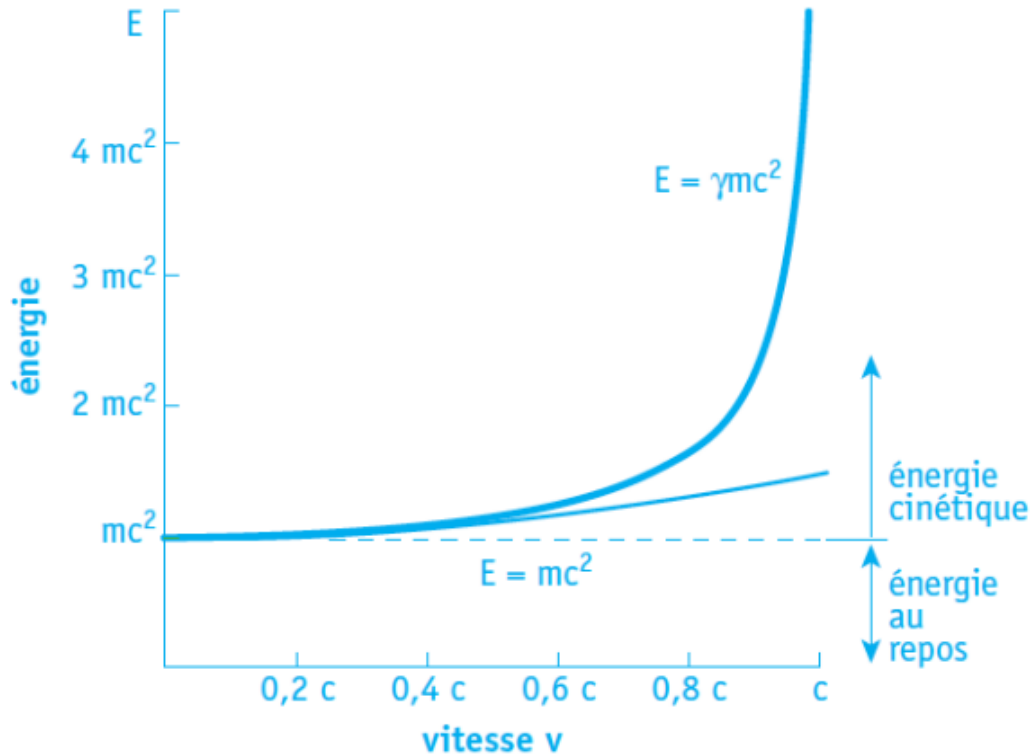
Différents types de collisionneurs

Notion de luminosité

Le LHC

# Pourquoi accélérer des particules

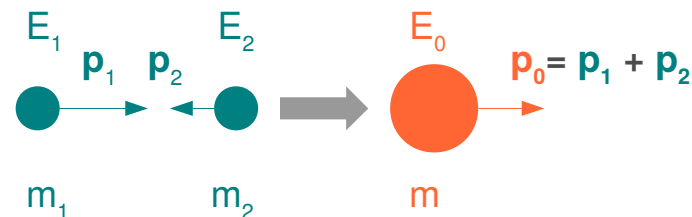
- ◆ Énergie en mécanique relativiste :  $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$  :  
On peut créer une particule de masse  $m$  en fournissant l'énergie  $E^2/c^2$



© Lison Bernet pour la fête de la science

<http://lisonbernet.illustrateur.org>

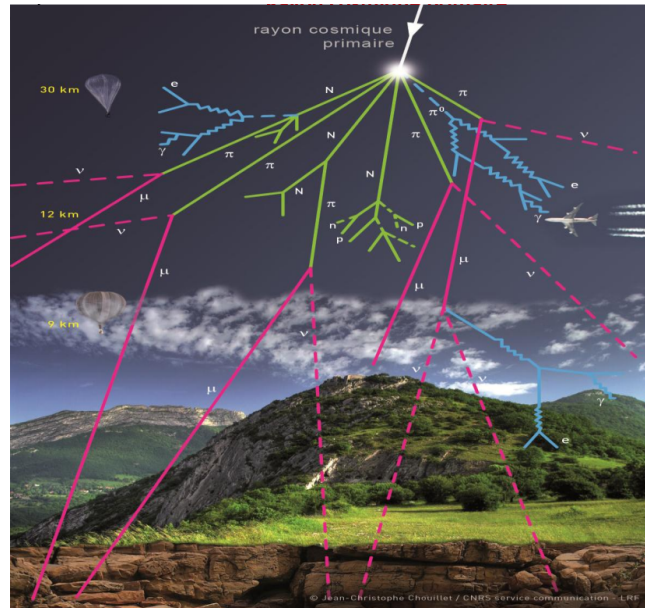
- ◆ En fournissant assez d'énergie on peut créer une particule plus lourde que les particules incidentes !





# 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

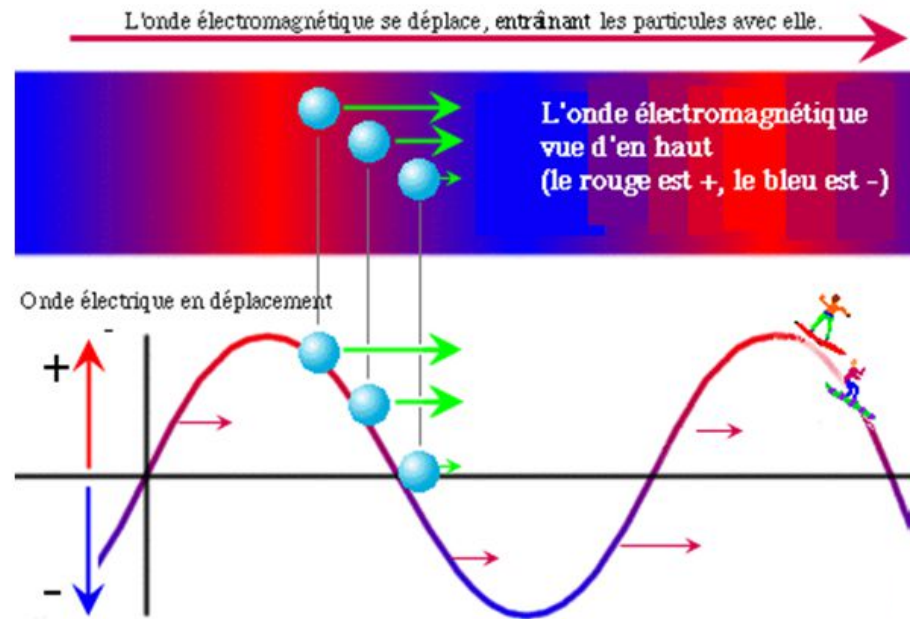
Notion de luminosité

Le LHC



# Principes de base des accélérateurs (1)

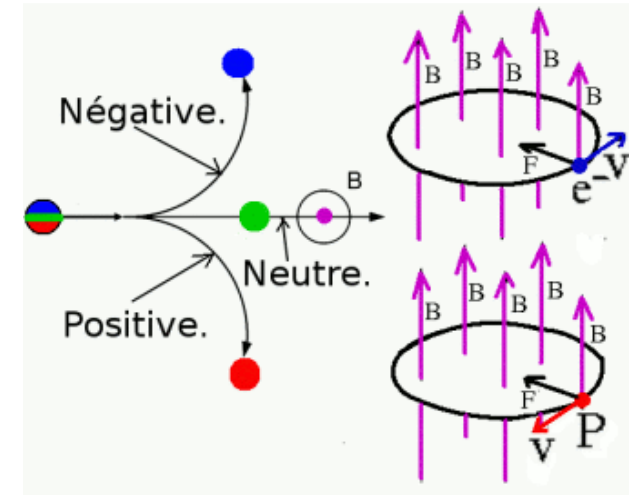
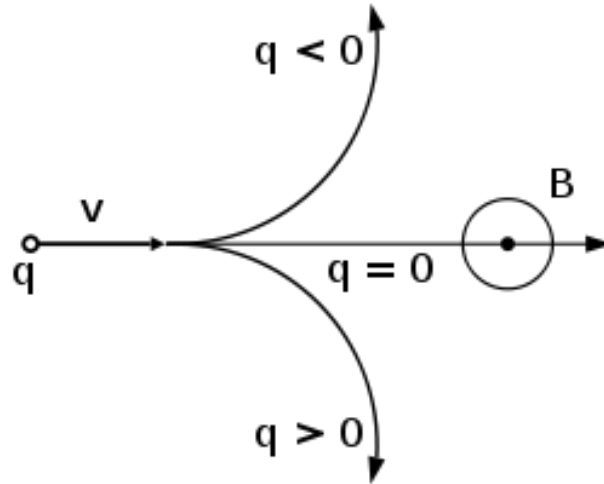
- ◆ Champs **électriques** pour **accélérer** les particules :  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$
  - ◆ Statiques : Cockroft-Walton, Van de Graaf, etc
  - ◆ Variables : produit par une onde elmg de haute fréquence (cavités RF)
    - le champ généré pour osciller à une fréquence donnée (ex. au LHC : 400 MHz)
    - 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**”



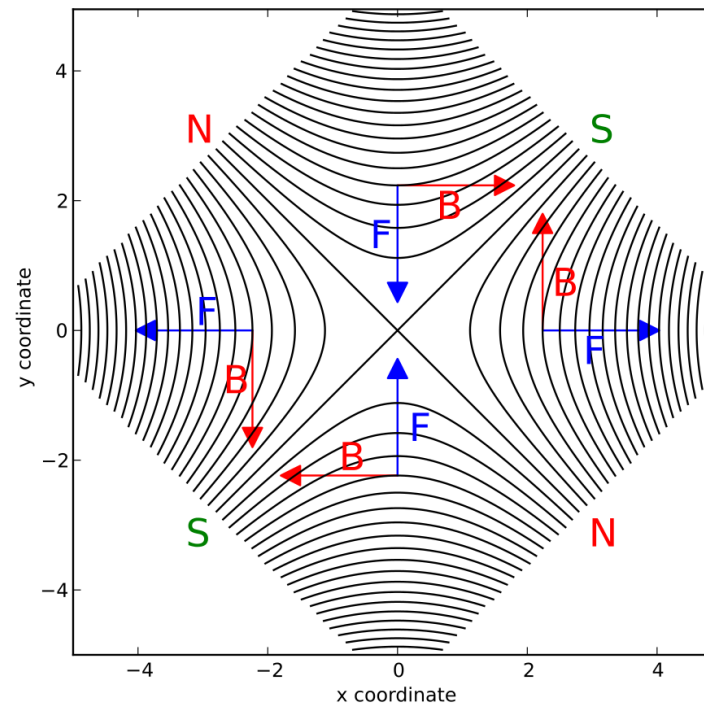
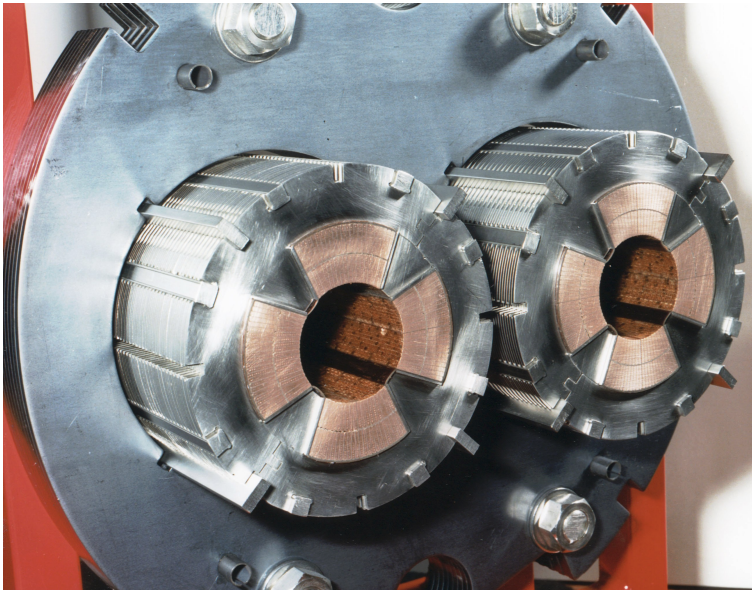


# Principes de base des accélérateurs (2)

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



- ◆ et **focaliser** :

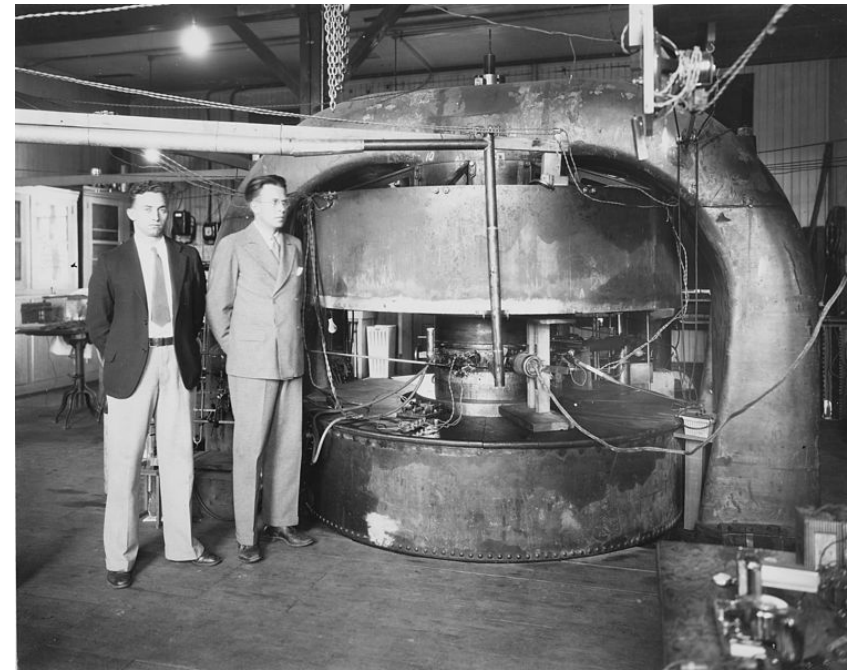
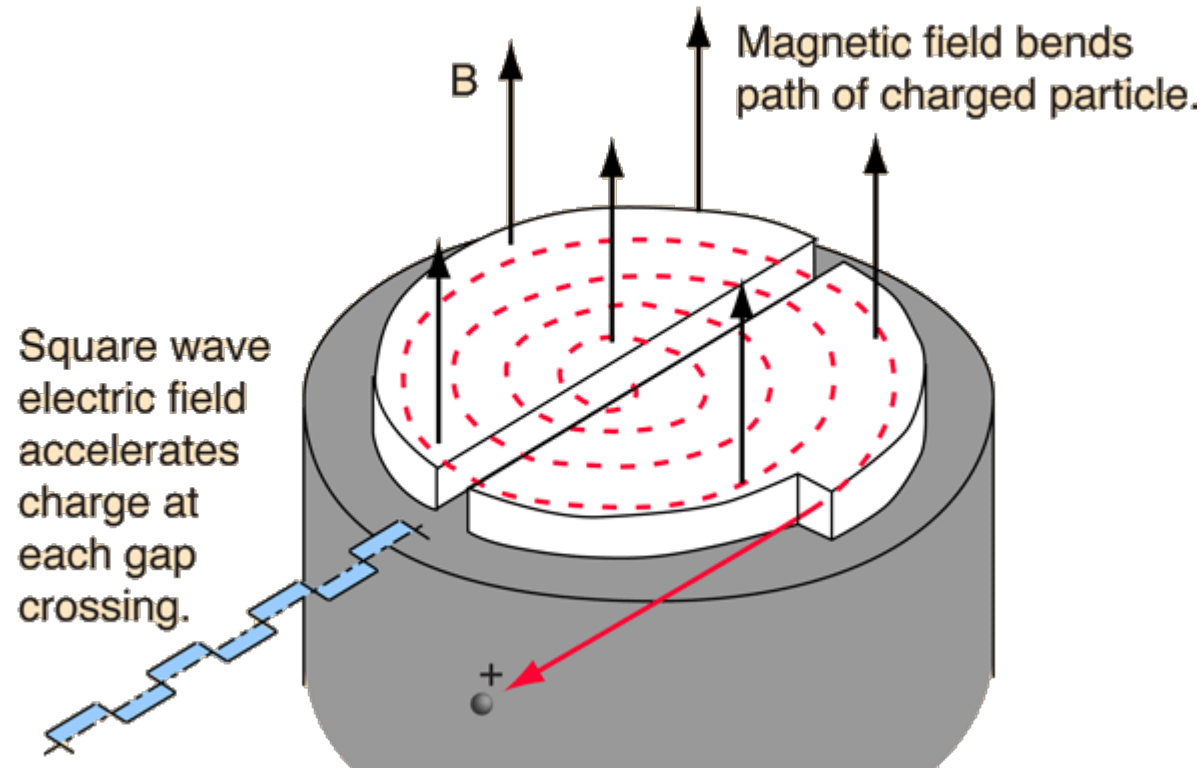






# Exemple : le cyclotron

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

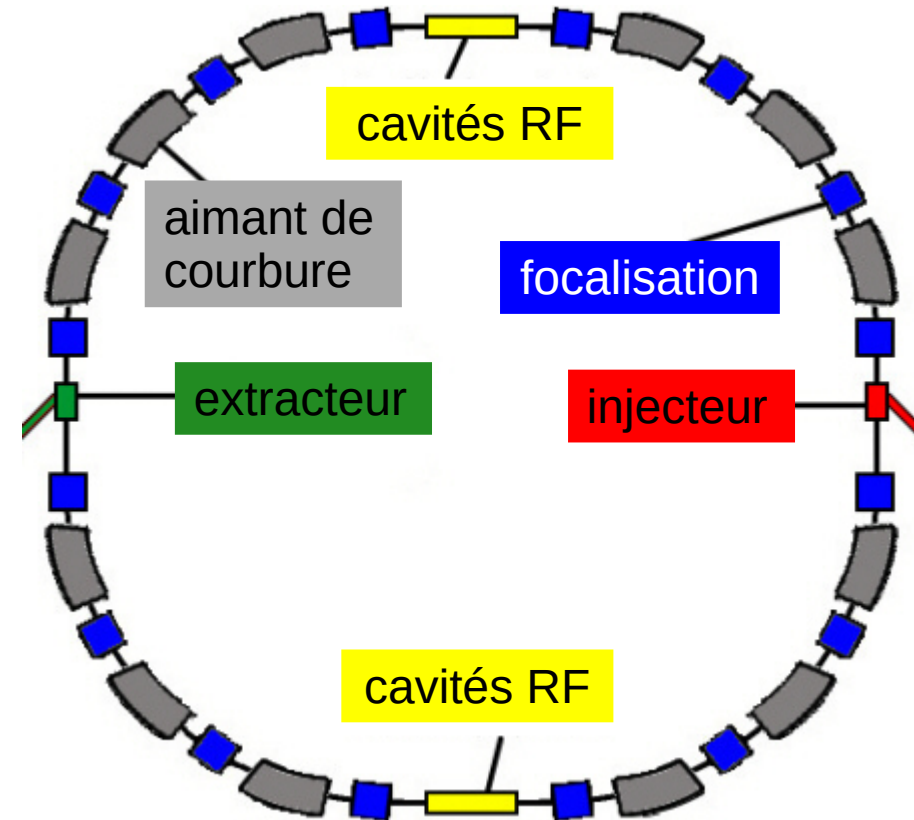


- ◆ Inventé par Lawrence dans les années 1930 → prix Nobel
- ◆ Énergie maximale : 70 MeV
- ◆ Toujours utilisé pour fabriquer les radio-nucléides



# Exemple : le synchrotron

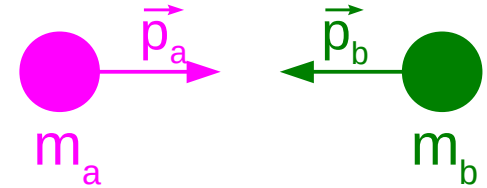
- ◆ **Anneaux** avec particules dans tubes à vide
  - cavités accélératrices
  - aimants de courbure pour maintenir les particules sur une trajectoire circulaire
- ◆ Intensité du champ magnétique et fréquence de la tension accélératrice **synchrones** avec l'énergie des faisceaux
- ◆ Aimants de **focalisation**/défocalisation 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

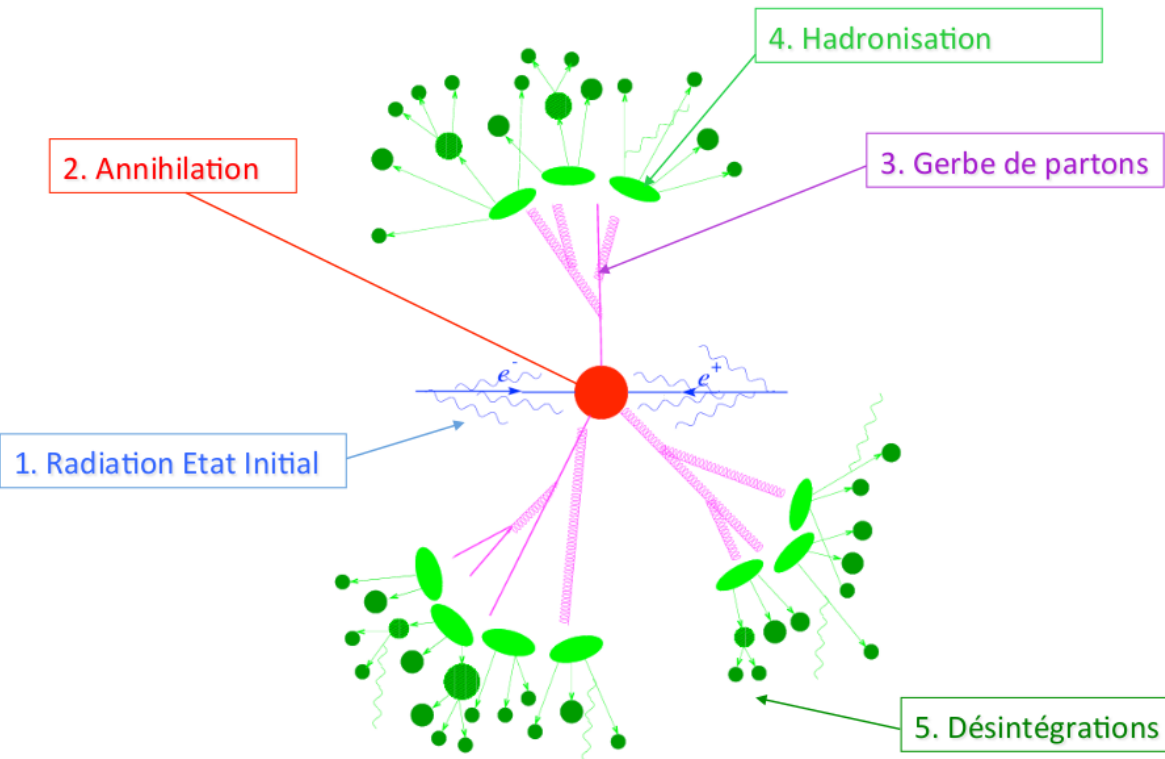
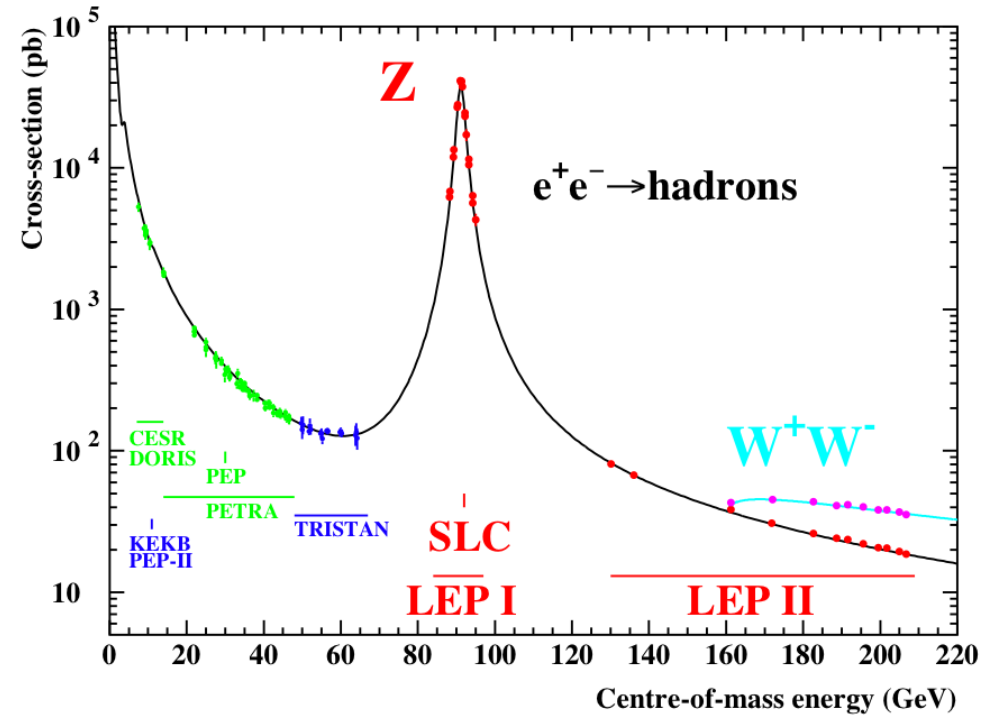
---

- ◆ 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)

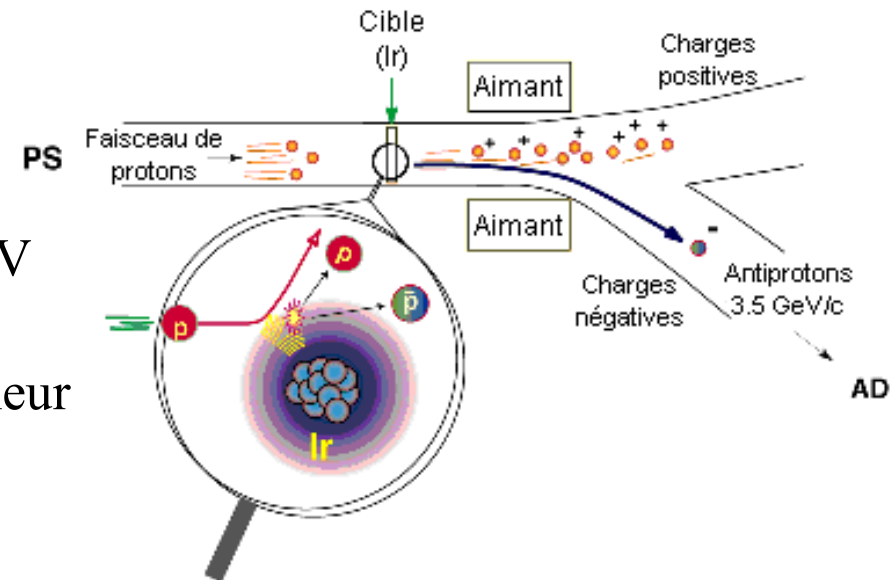
- ◆ Électron particule ponctuelle
- ◆ Énergie collision =  $E_{CM}$ 
  - pour des mesures précises
- ◆ Événements propres





# 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

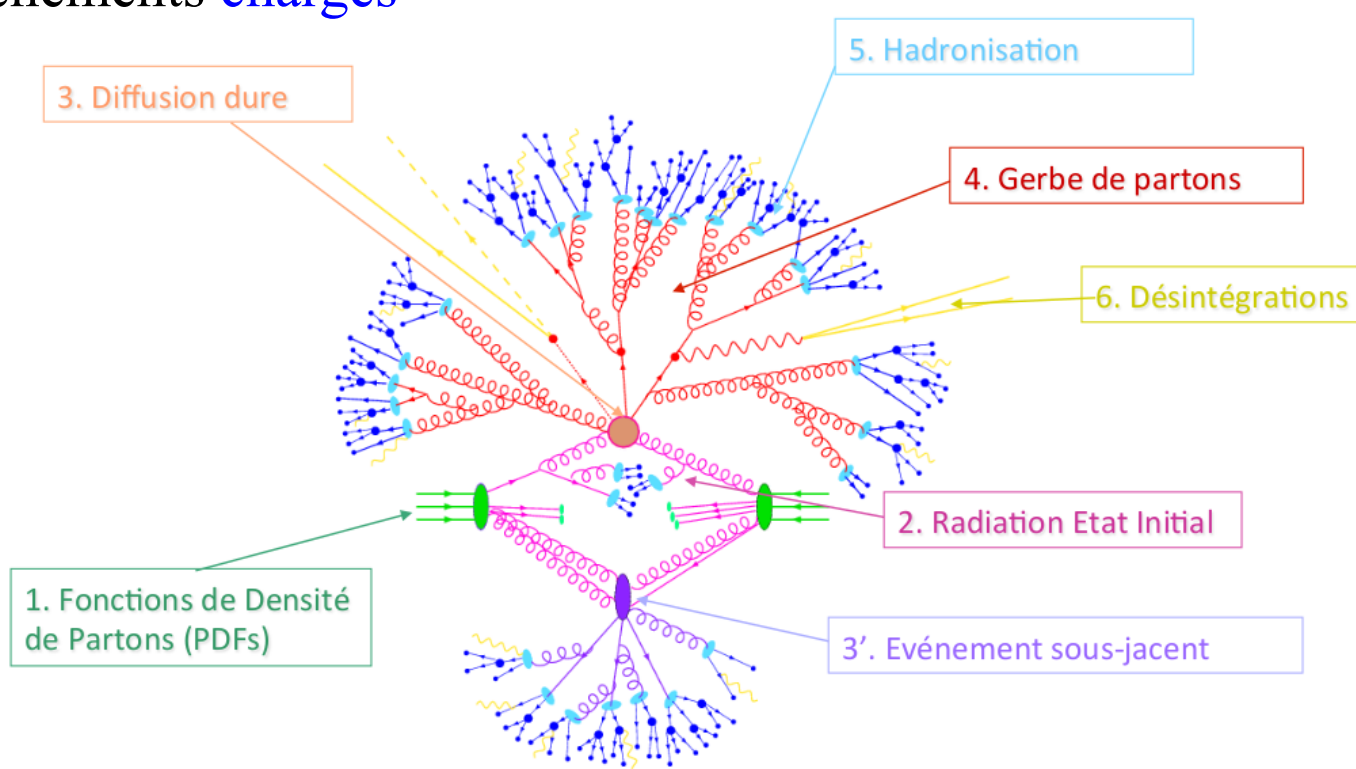
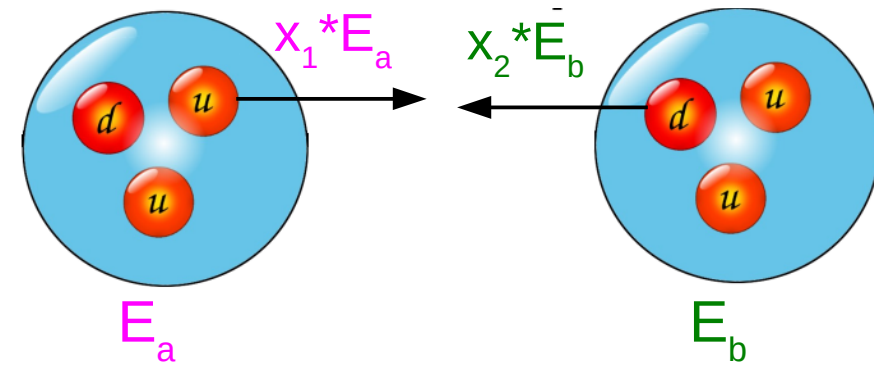


- ◆ **Stockage** des antiprotons
  - il faut accumuler les antiprotons s'ils doivent être envoyés dans un collisionneur
  - avant d'être accélérés ceux-ci doivent être "refroidis", c'est-à-dire rassemblés en paquets de quantité de mouvement homogènes
  - Simon Van der Meer, inventeur d'une méthode de 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)

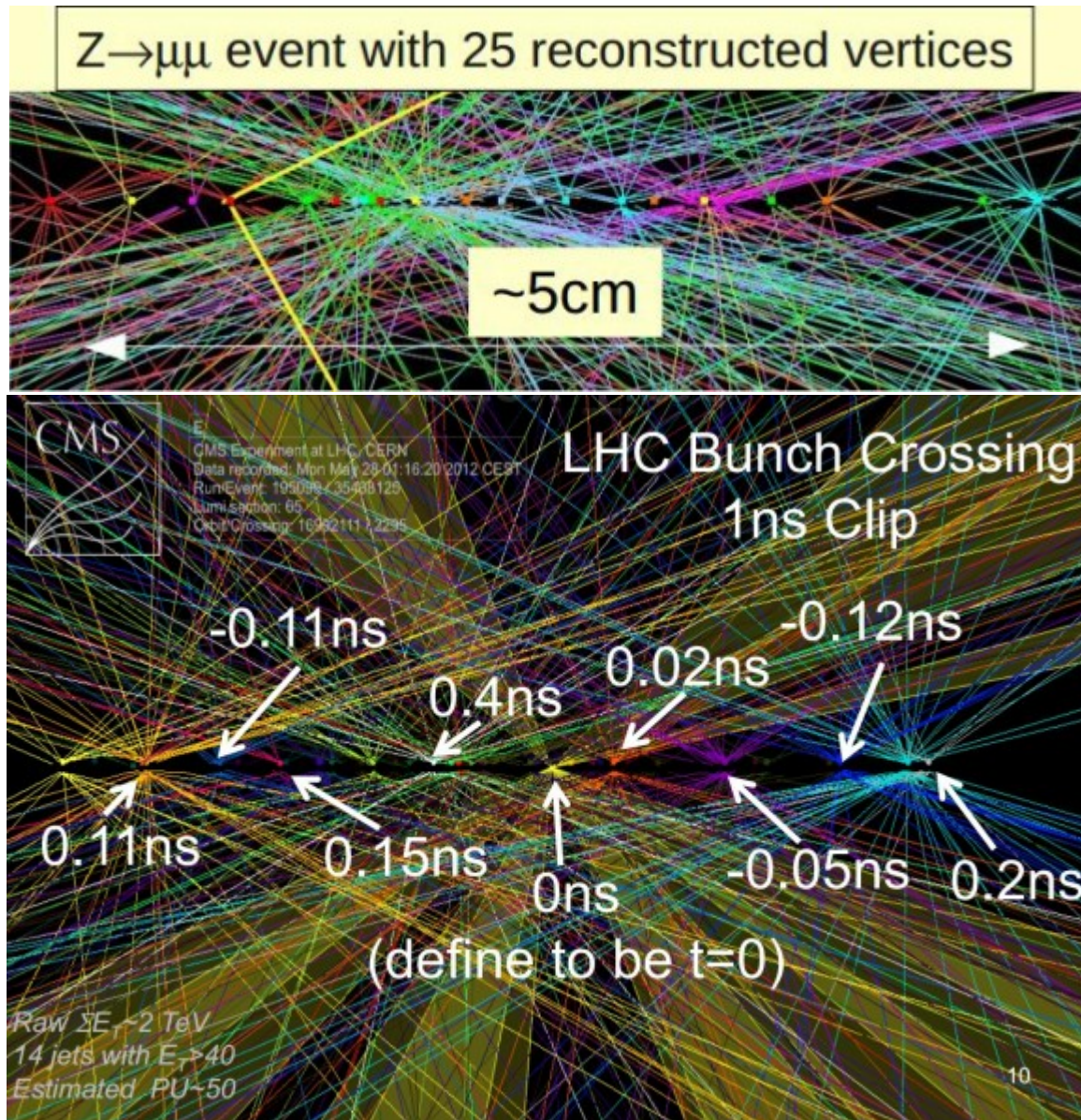
- ◆ Protons : particules composites
- ◆ Énergie collision  $< E_{CM}$ 
  - on balaie toutes les énergies de 0 à  $E_{CM}$   
⇒ pour des recherches
- ◆ Énergie collision inconnue
  - mais énergie transverse totale nulle
- ◆ Événements chargés





# Collisionneur de protons (3)

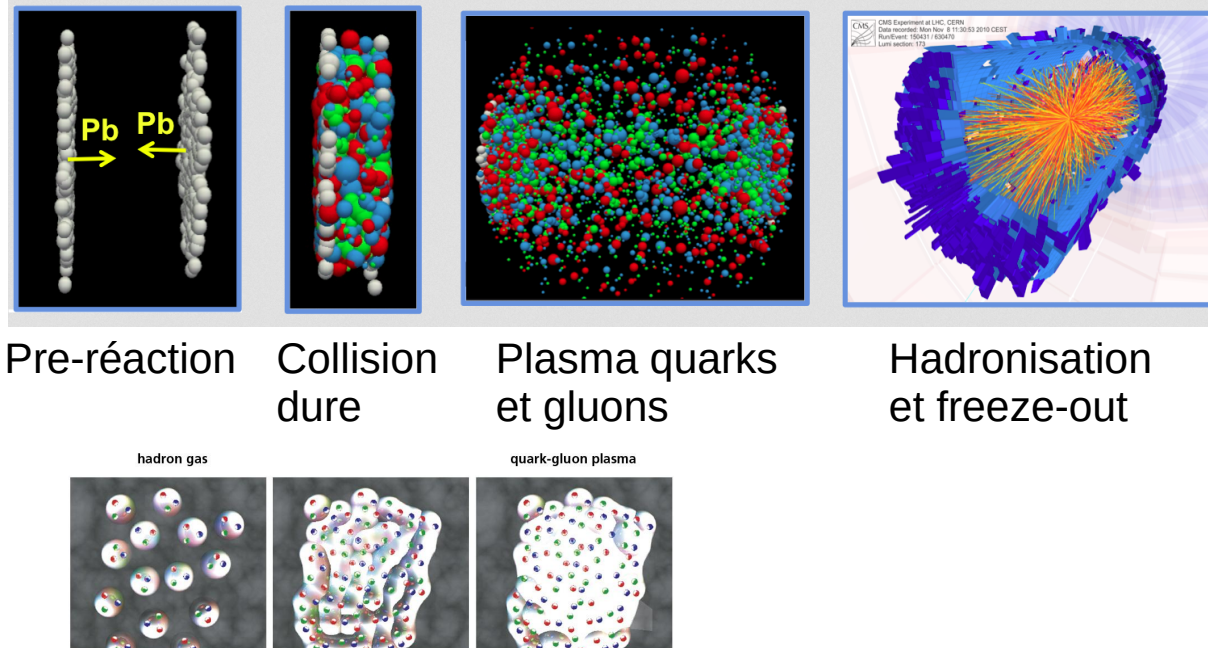
- ◆  $\sim 10^{11}$  protons par paquet  $\Rightarrow$  plusieurs collisions par croisement de faisceau  
**Pile-up** ou **empilement**



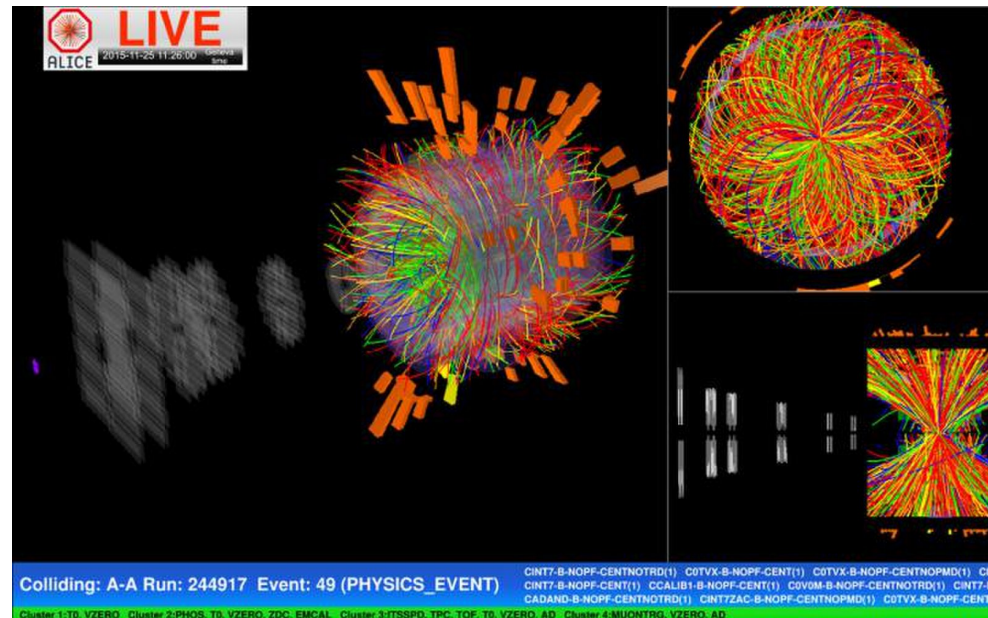


# Collisionneur d'ions lourds

- ◆ 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



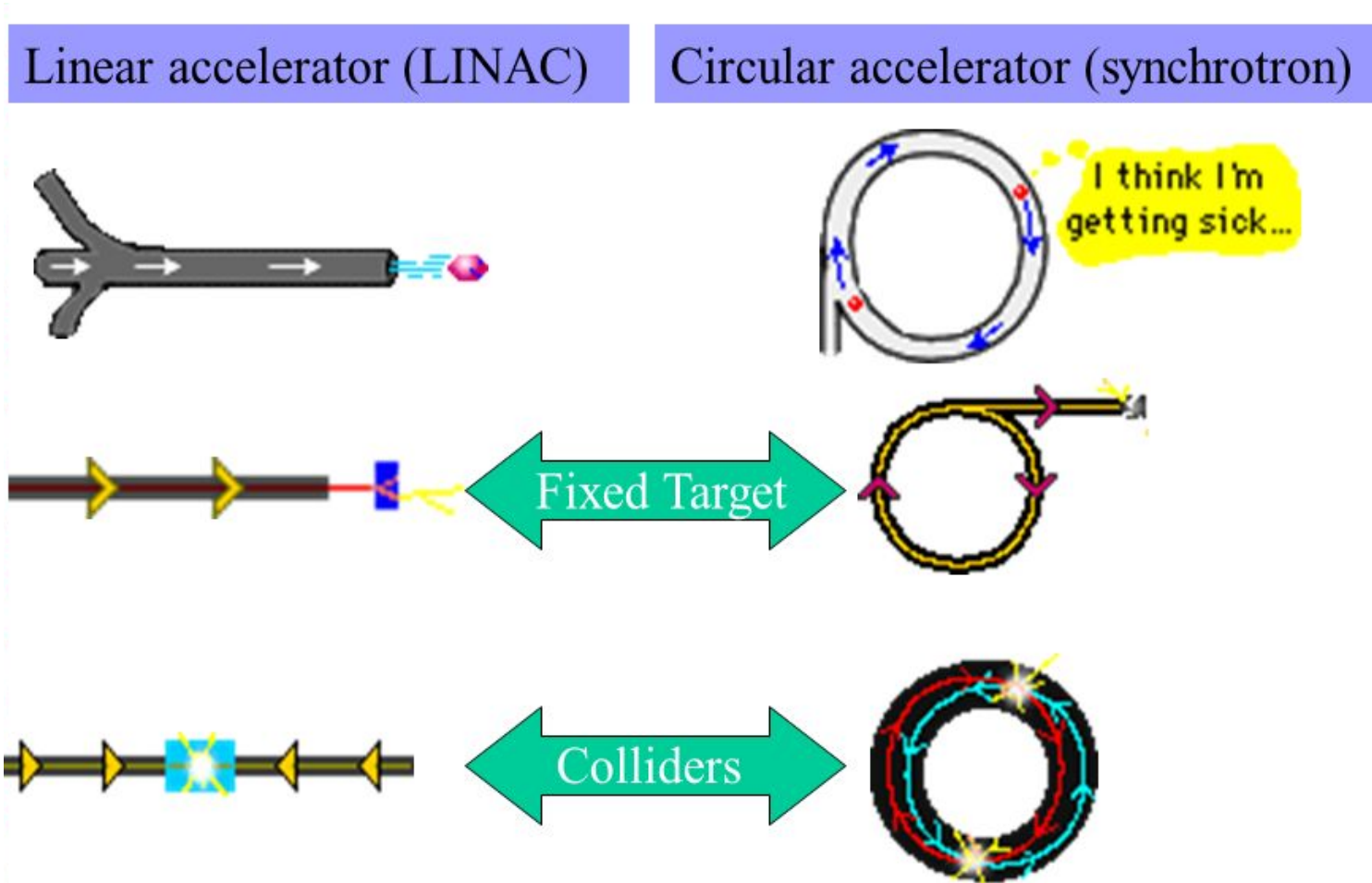
- ◆ Événements très chargés





# Résumés des types d'accélérateurs

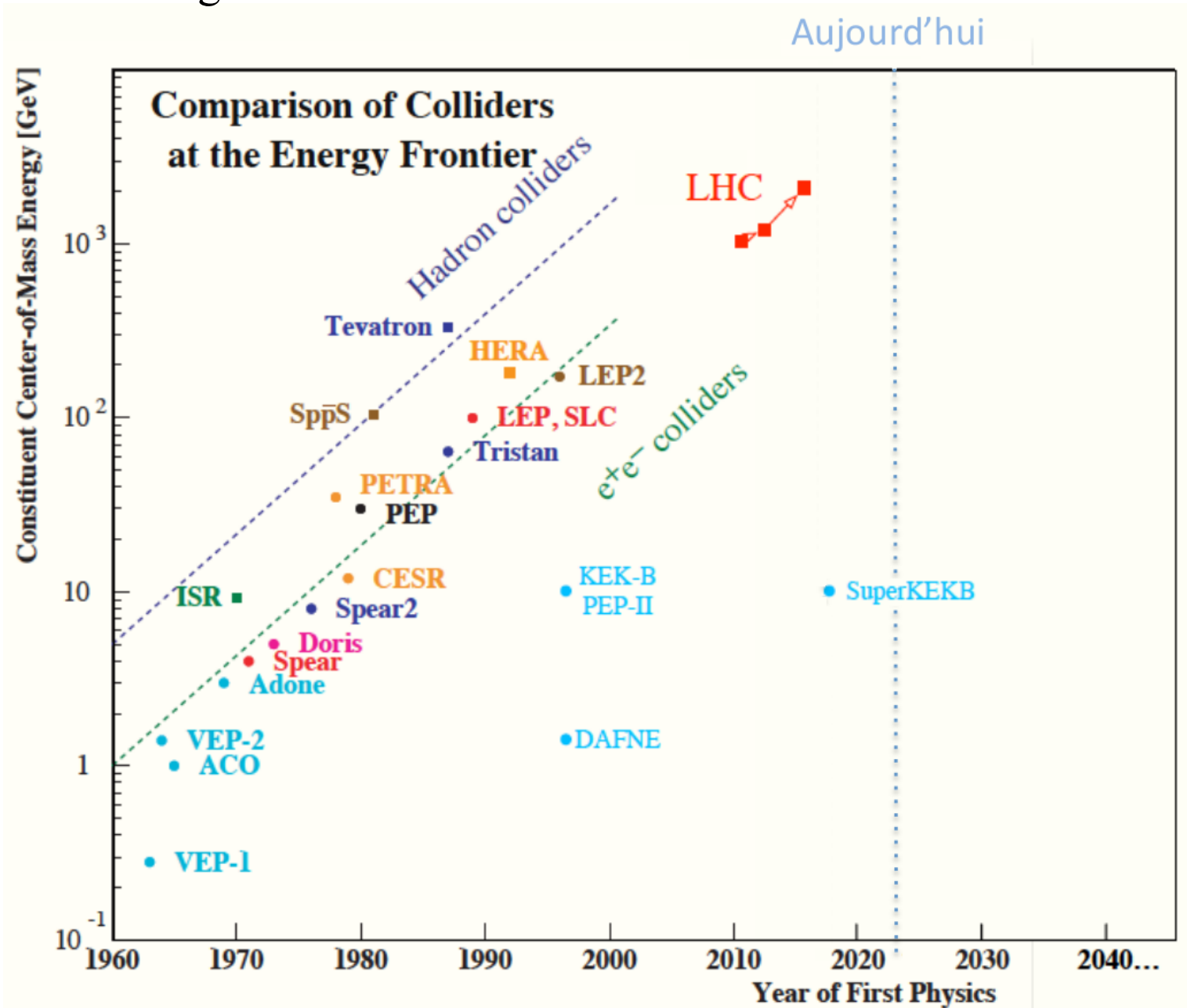
- ◆ Linéaires/circulaires
- ◆ Cible fixe/collisionneurs



(Source: [http://pdg.web.cern.ch/pdg/cpep/lin\\_circ.html](http://pdg.web.cern.ch/pdg/cpep/lin_circ.html))

# Accélérateurs dans l'histoire (1)

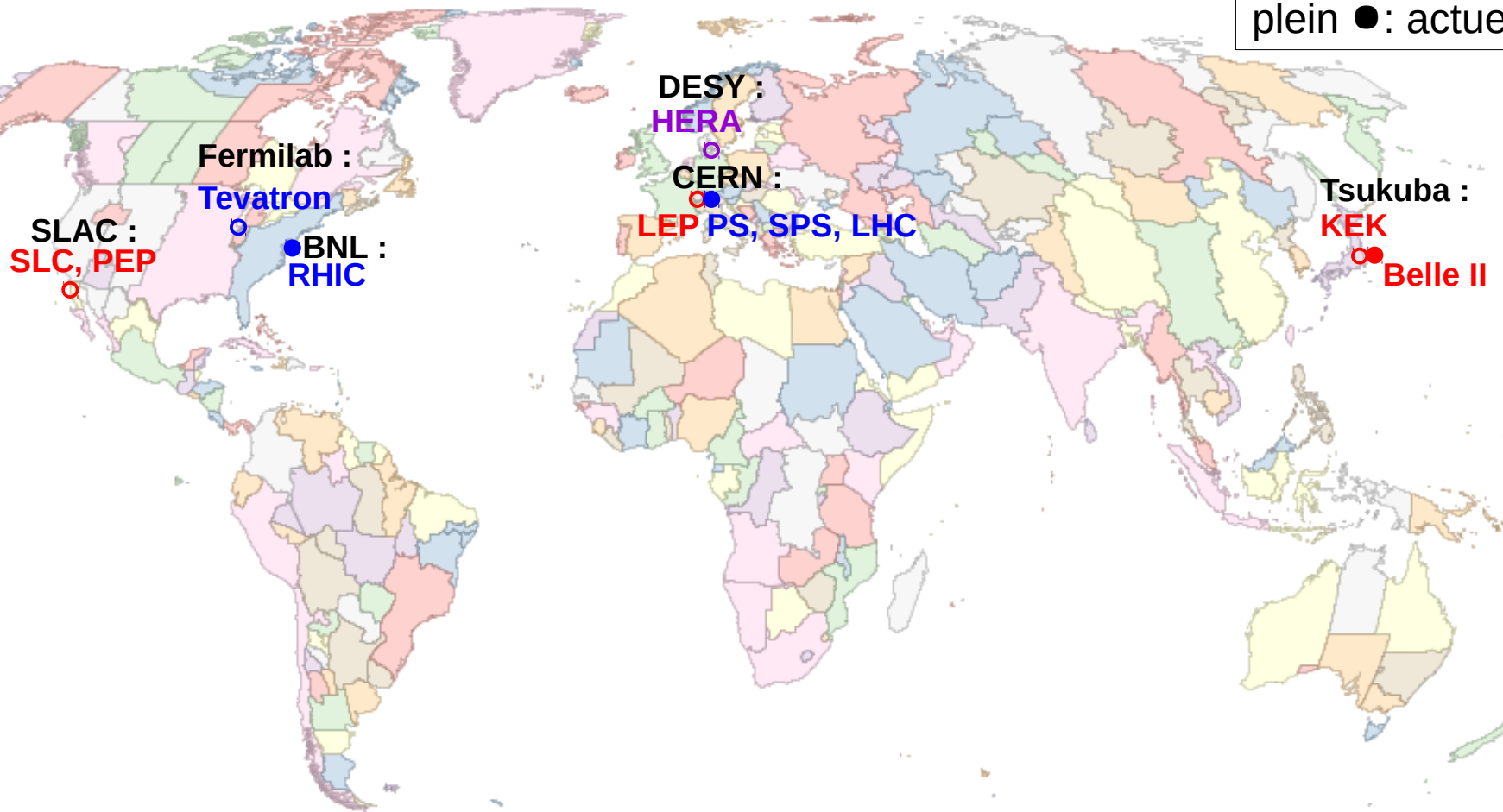
## ◆ Course à l'énergie



# 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

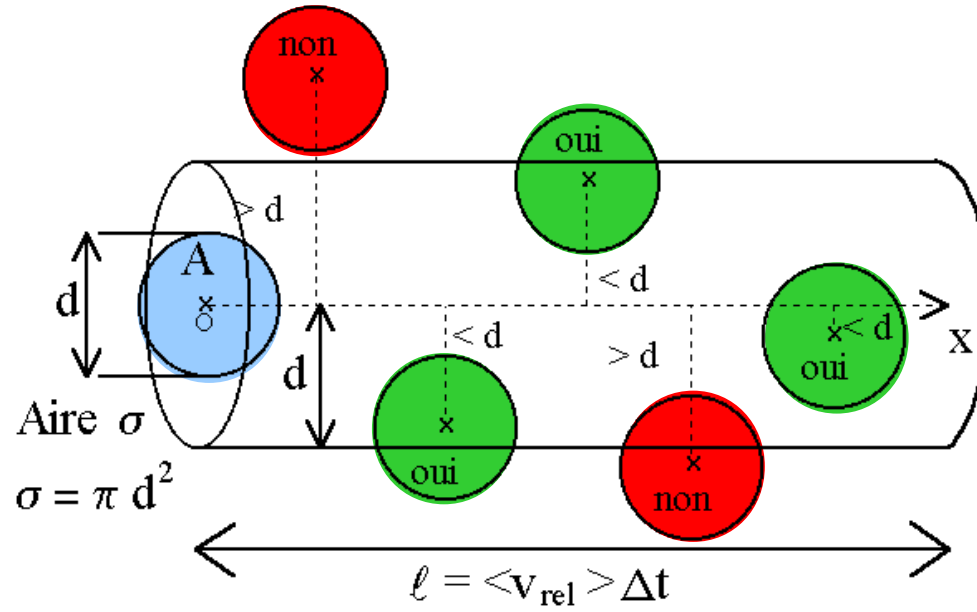
**Notion de luminosité**

Le LHC



# Section efficace (1)

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

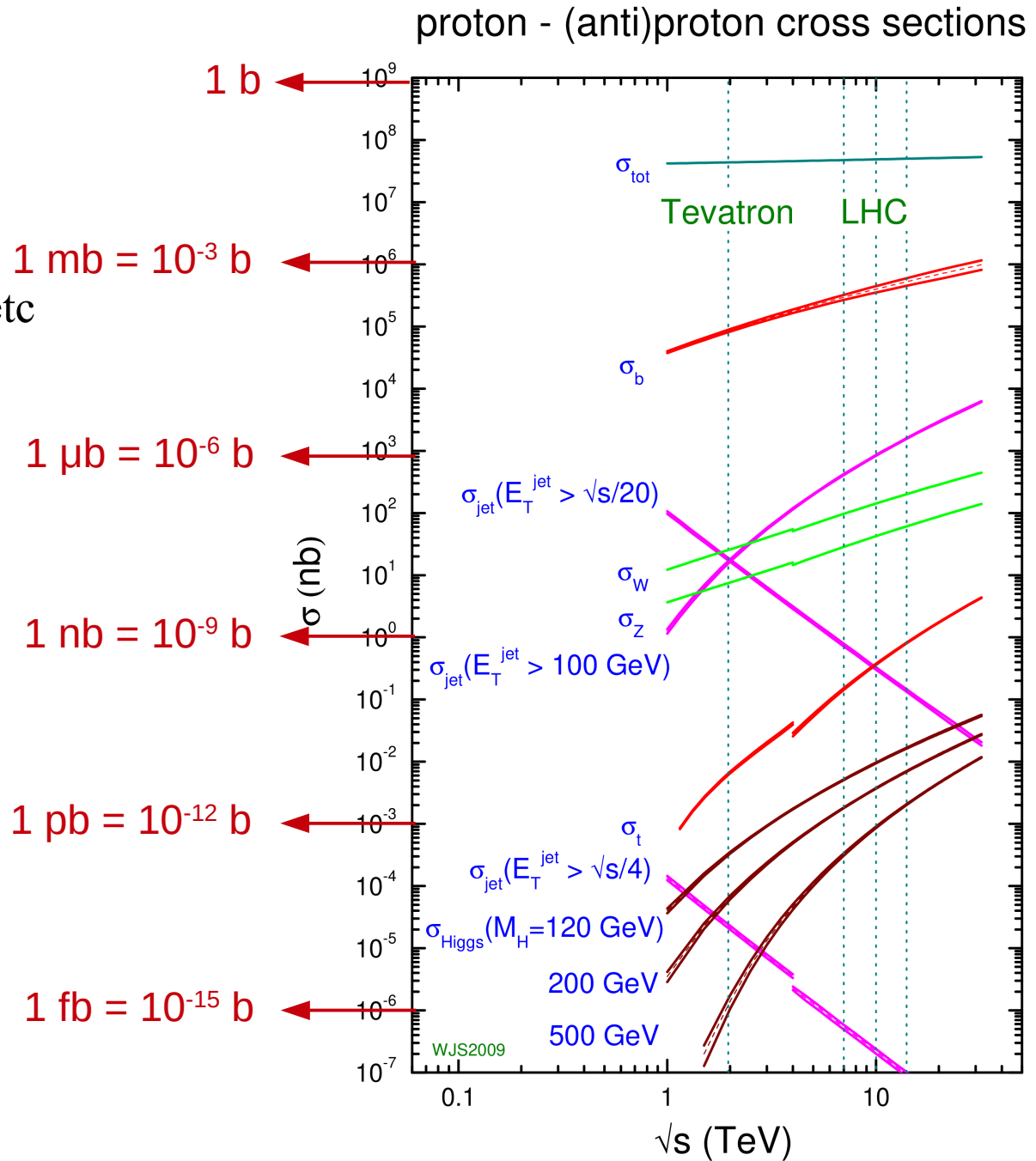


- ◆ En mécanique **quantique** : **probabilité** de réaction
  - plus la section efficace d'une réaction est grande, plus la probabilité qu'une particule soit créée lors de la collision est grande
  - dimension d'une surface



# Section efficace (2)

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







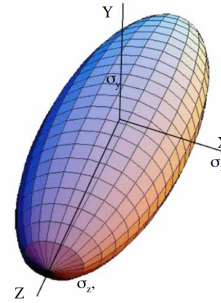
# Luminosité

## ◆ Taux d'interaction des collisions

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

## ◆ $L = \frac{n^2 \cdot B \cdot f}{A}$

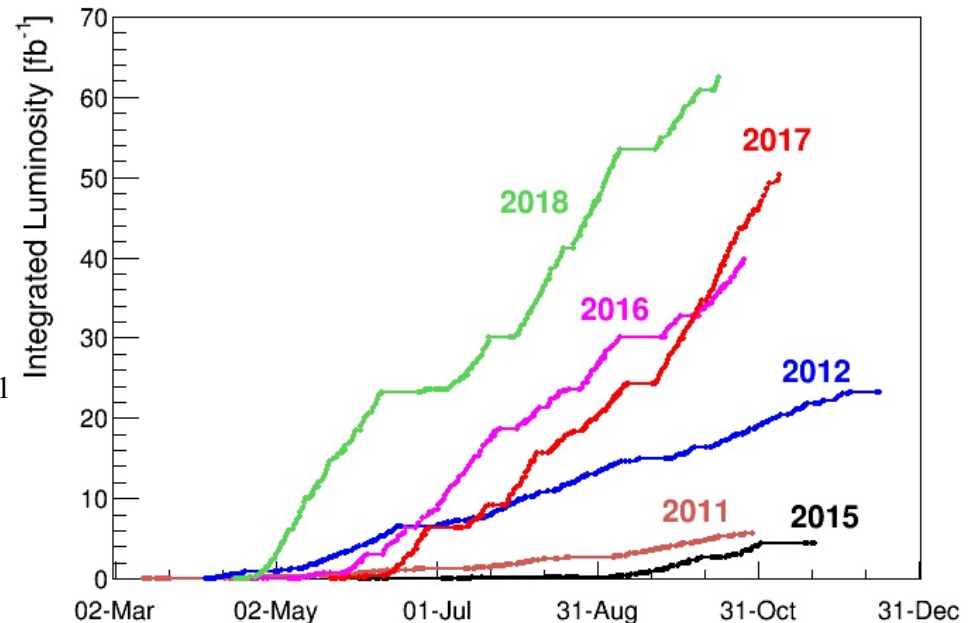
- n = nombre de particules par paquet
- B = nombre de paquets
- f = fréquence de l'orbite
- A = aire de la section des paquets =  $4\pi \cdot \sigma_x \sigma_y$



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

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

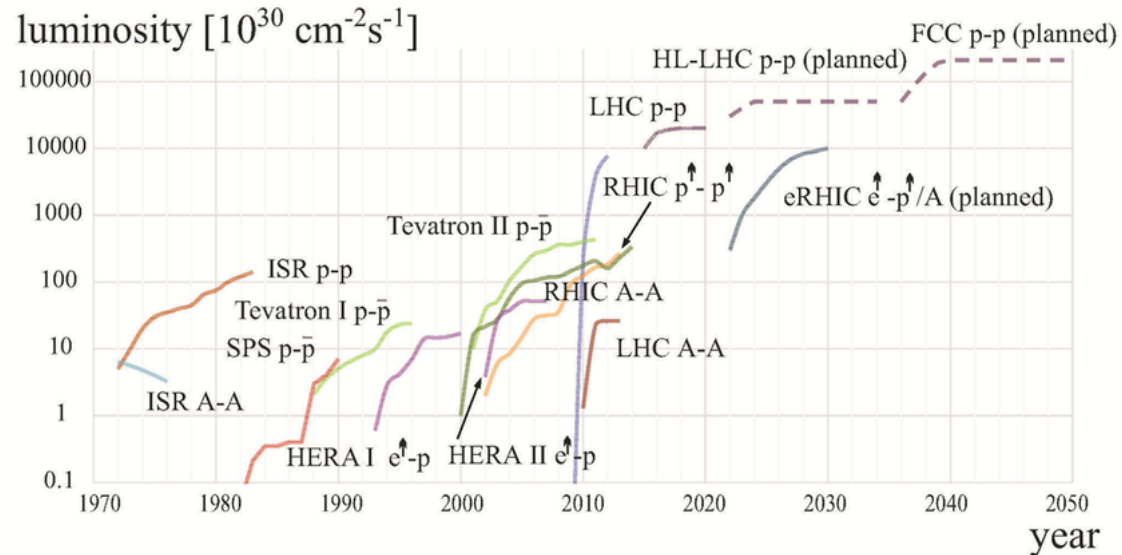
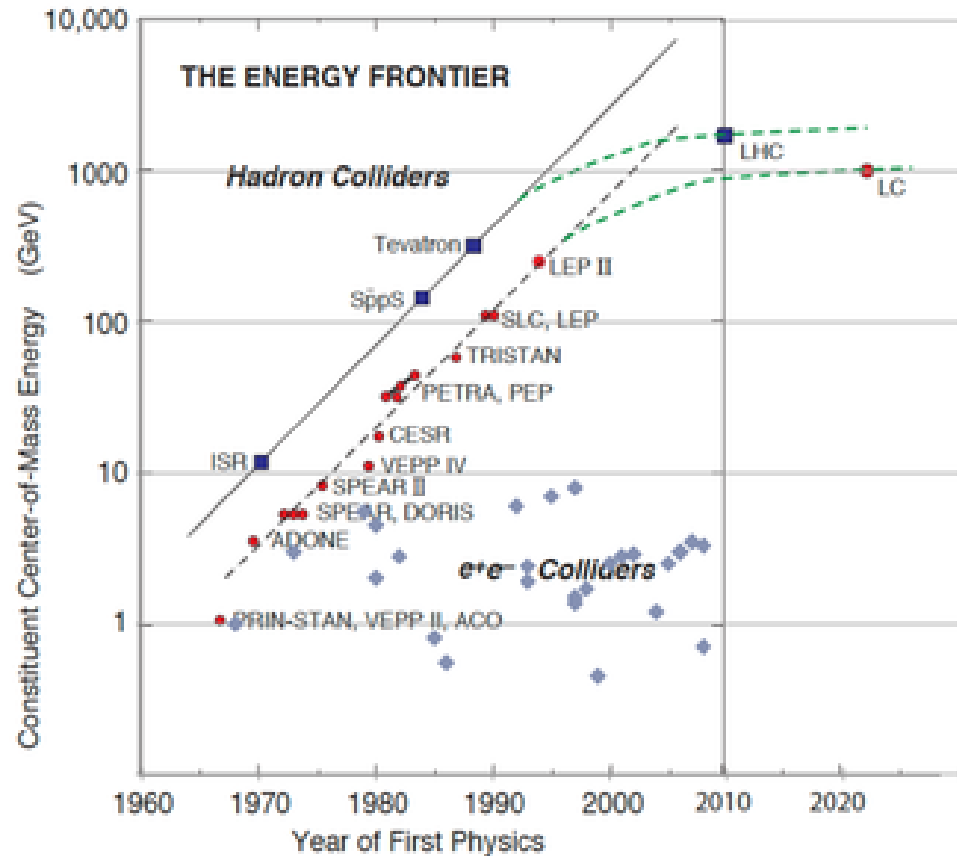
- en barn<sup>-1</sup>
- ou pb<sup>-1</sup>, fb<sup>-1</sup>, etc
- ex. Run 2 du LHC : total 140 fb<sup>-1</sup>
  - 25 Mds bosons W
  - 8 Mds bosons Z
  - 7 M bosons de Higgs





# 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

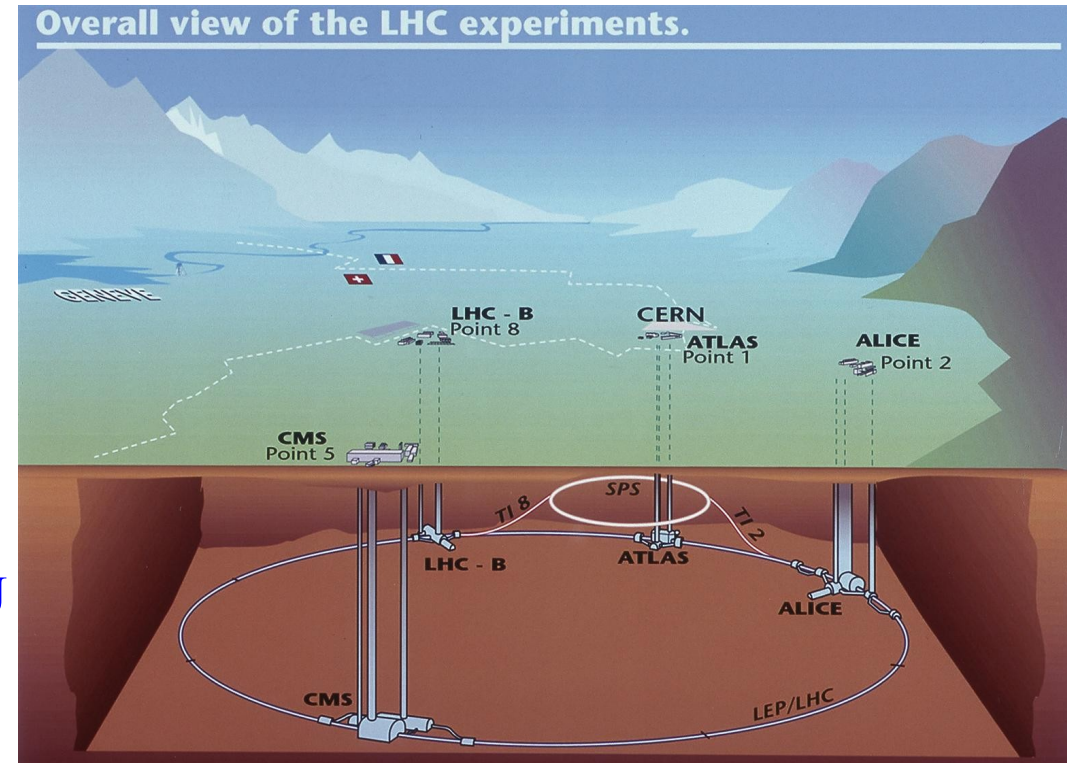
Différents types de collisionneurs

Notion de luminosité

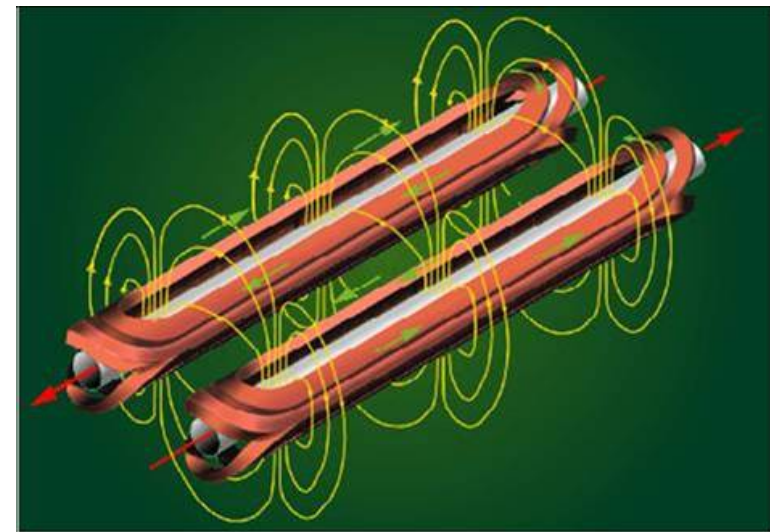
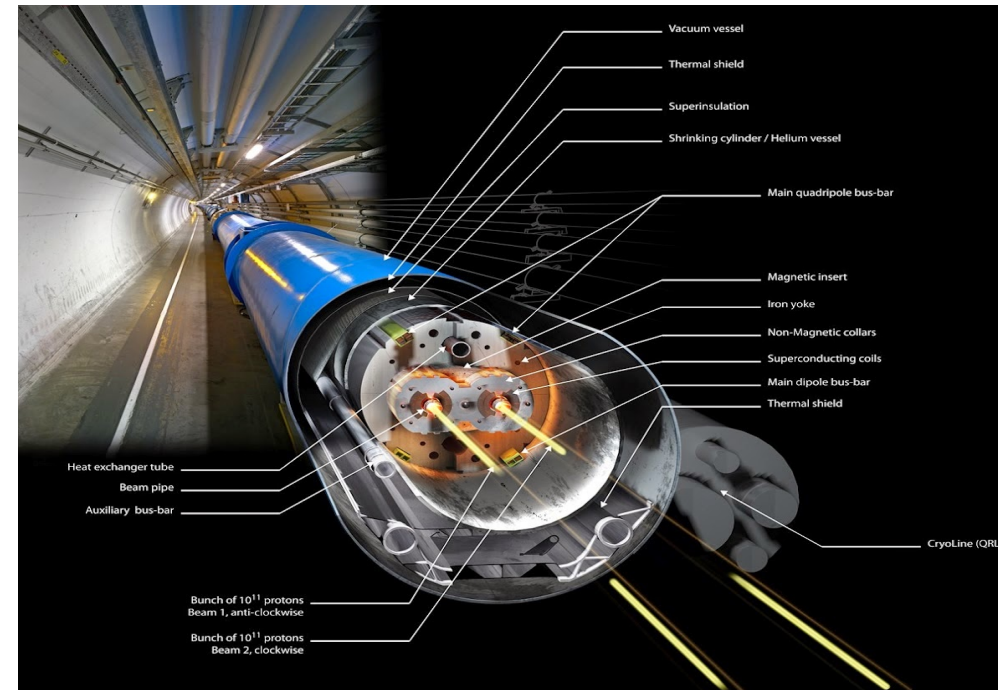
**Le LHC**

# Le LHC (1)

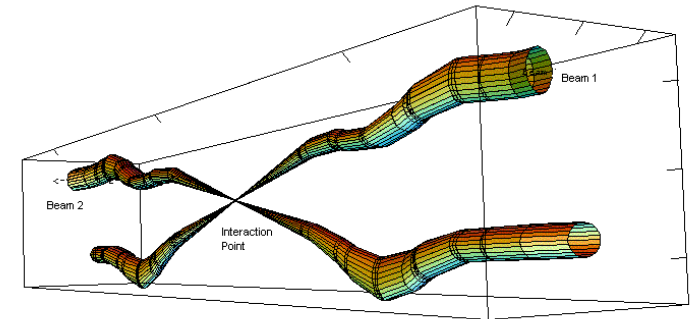
- ◆ Large : 27 km de long
- ◆ Hadron : protons ou noyaux de plomb
- ◆ Collider : collisionneur
- ◆ Quelques chiffres :
  - énergie d'un proton : 6.5 TeV
    - moustique en vol
  - nombre de protons /paquet :  $10^{11}$
  - nombre de paquets : 2808
  - énergie totale des faisceaux : 350 MJ
    - TGV à 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

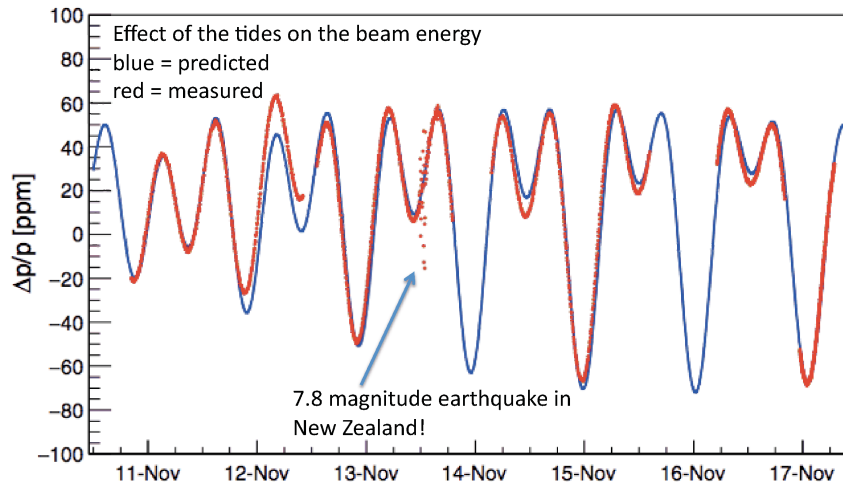


- ◆ **Paquets** : qqs cm de long, qqs mm d'épaisseur
  - taille transverse aux croisements de faisceaux :  $16 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$
  - $10^{24} \text{ J/m}^2$

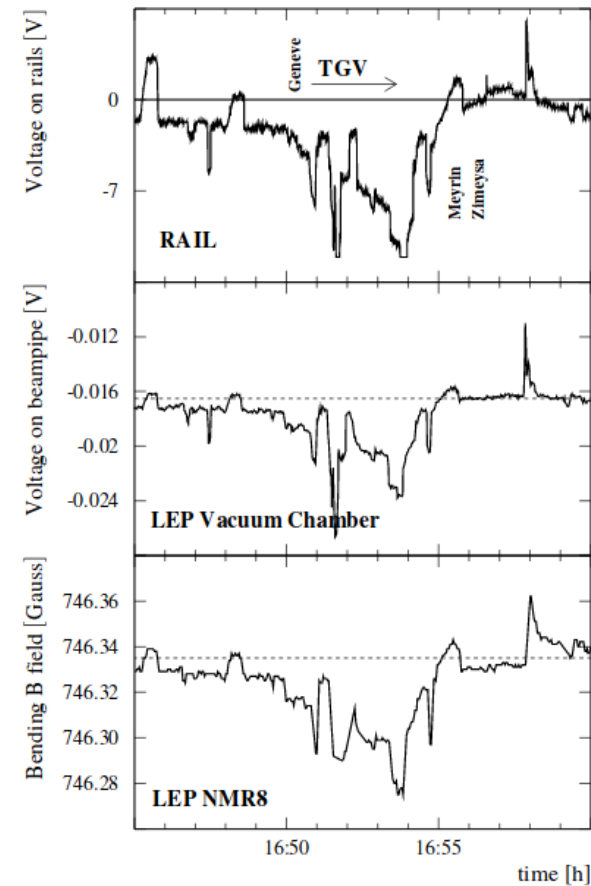


Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

- ◆ **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

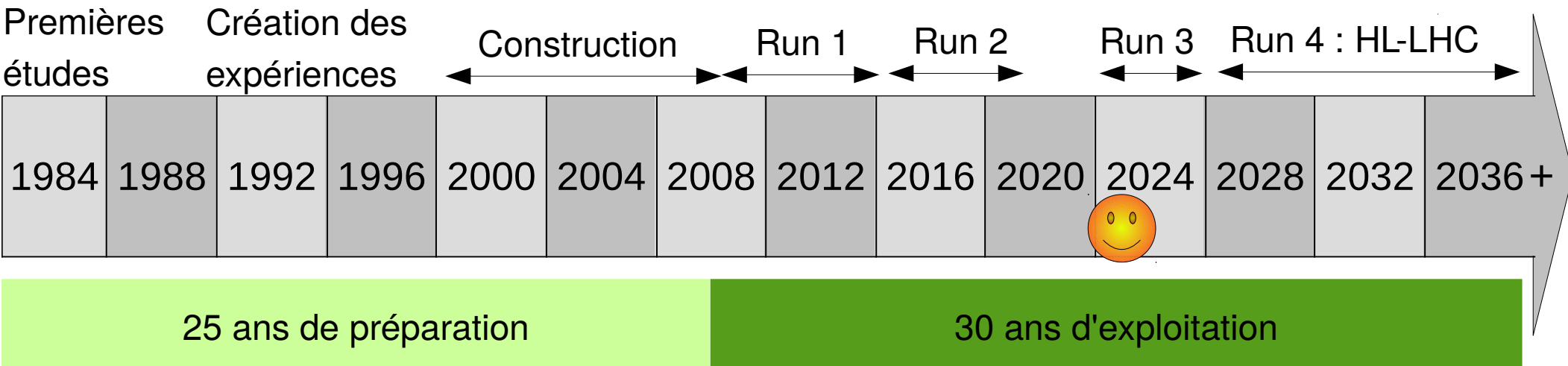
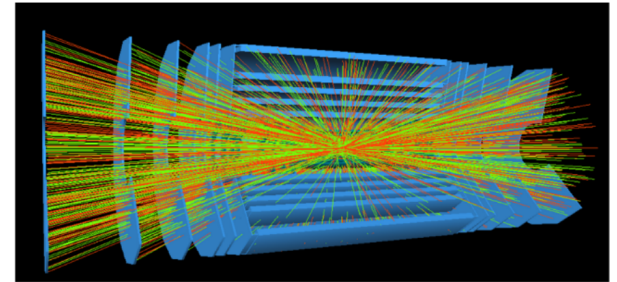
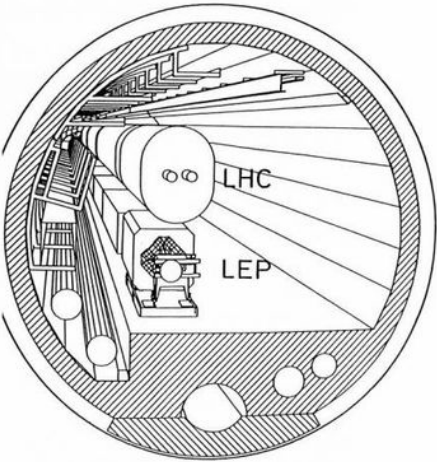
- ◆ Étape finale du réseau d'accélérateurs du CERN



version pdf : [lien vers la vidéo](#)



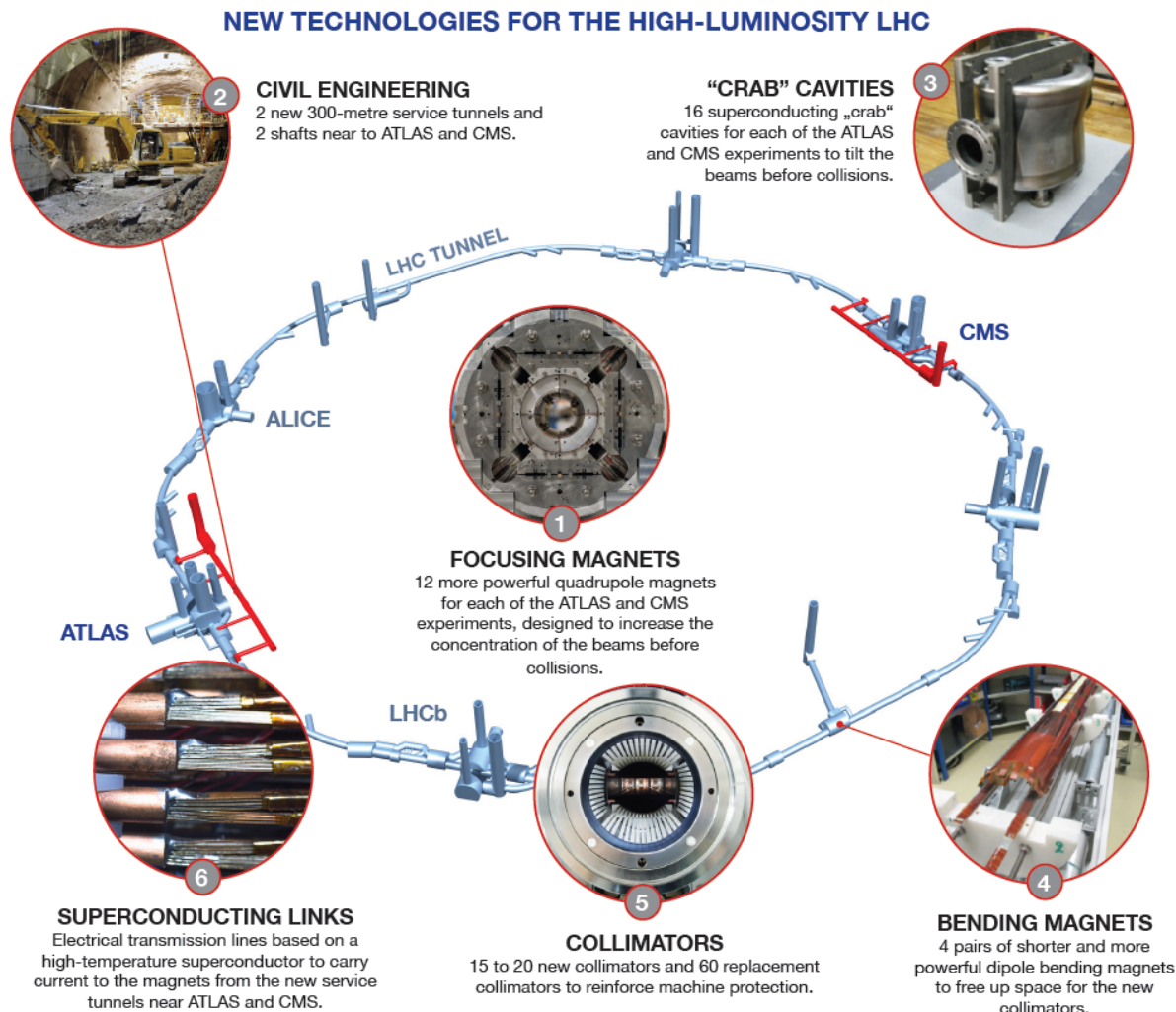
# Historique du LHC





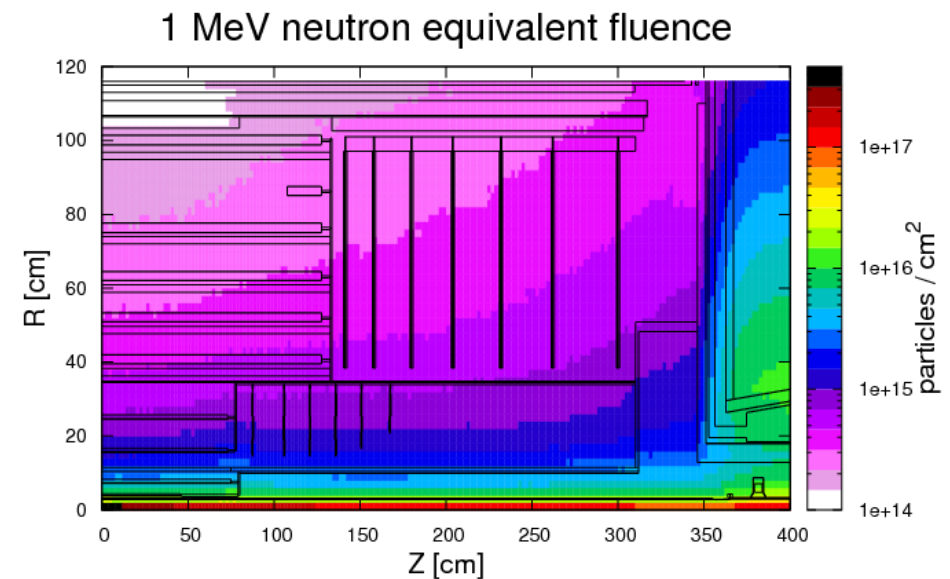
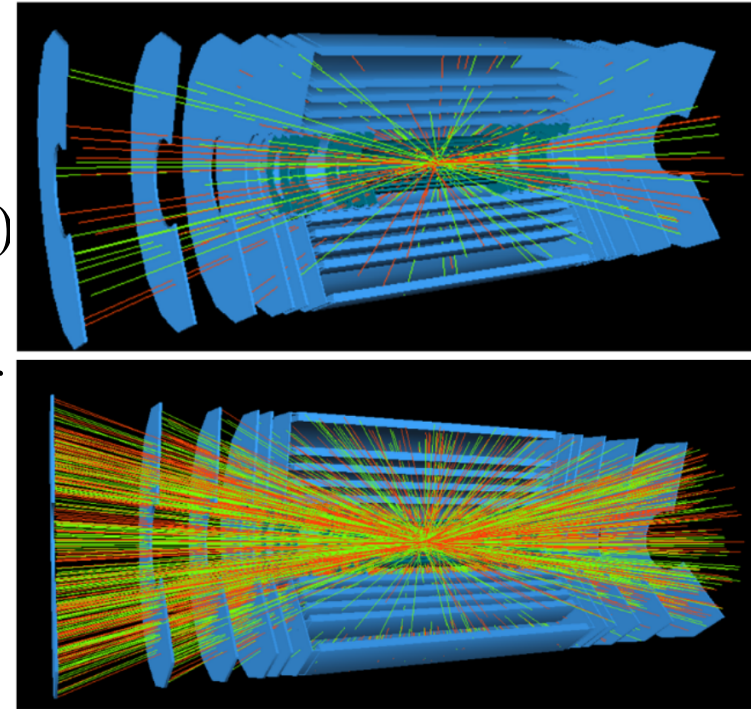
# Upgrade du LHC : HL-LHC (1)

- ◆ **HighLuminosity-LHC** : augmentation de la luminosité  
⇒ 10 fois plus de données ( $3000 \text{ fb}^{-1}$ )
- ◆ 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 !

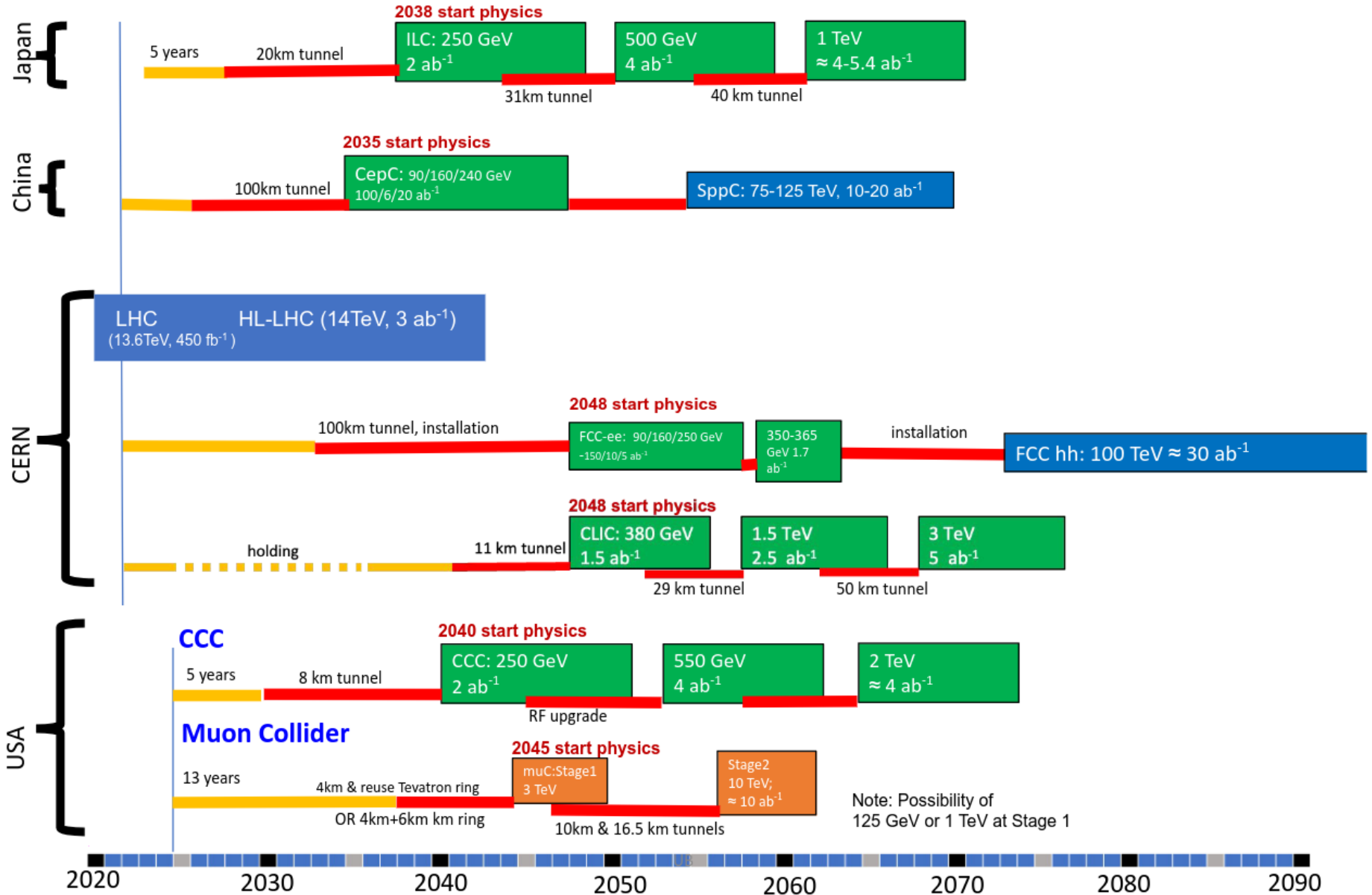




# Futurs collisionneurs

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

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

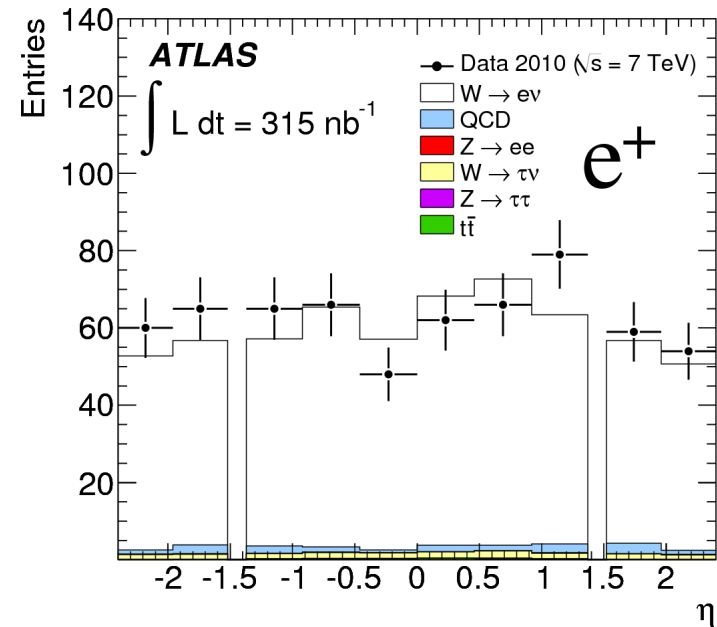
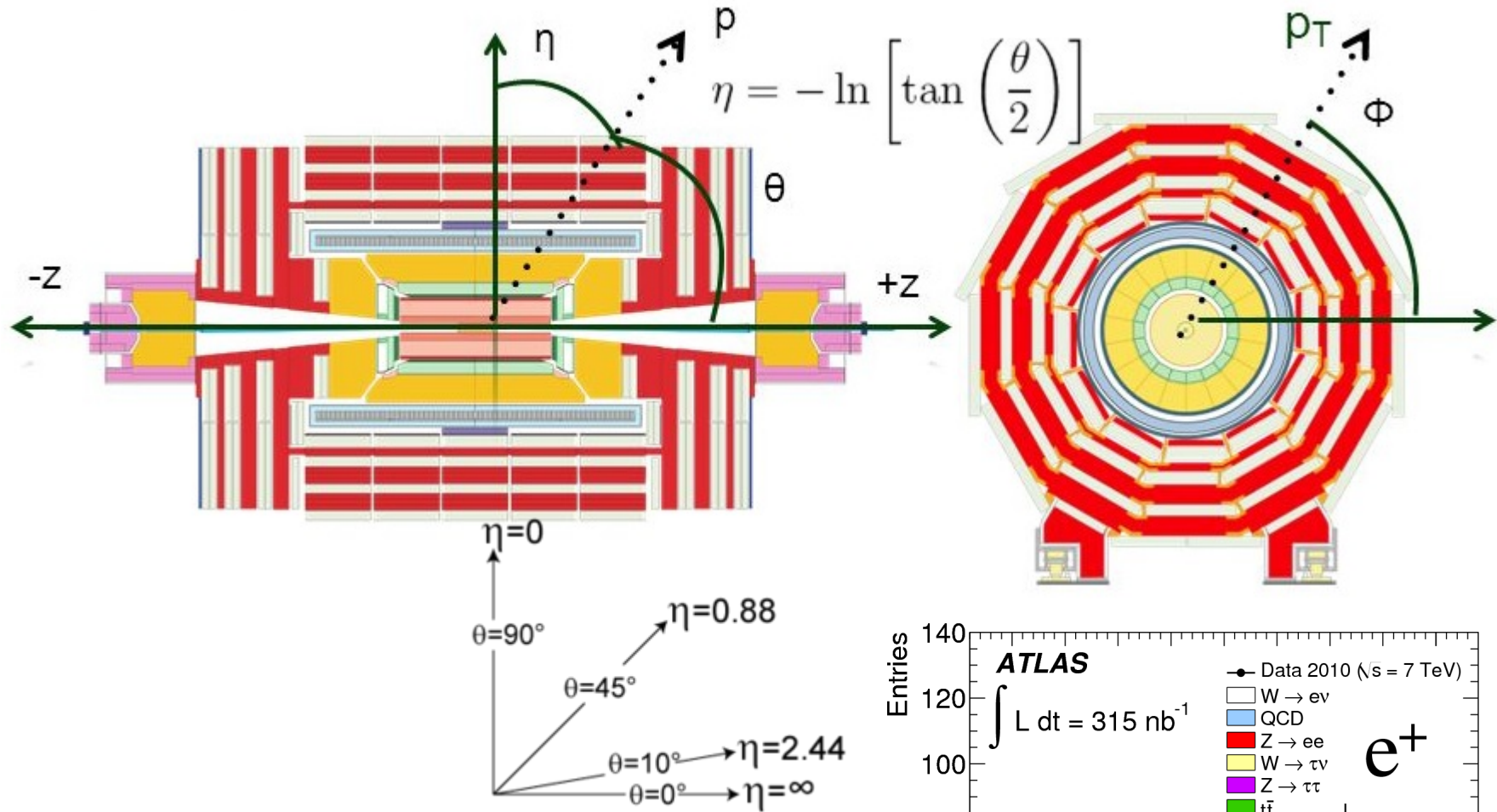


- ◆ Prochain cours : ce qu'on fait avec toutes ces collisions !

Back-up



# Pseudo-rapidité

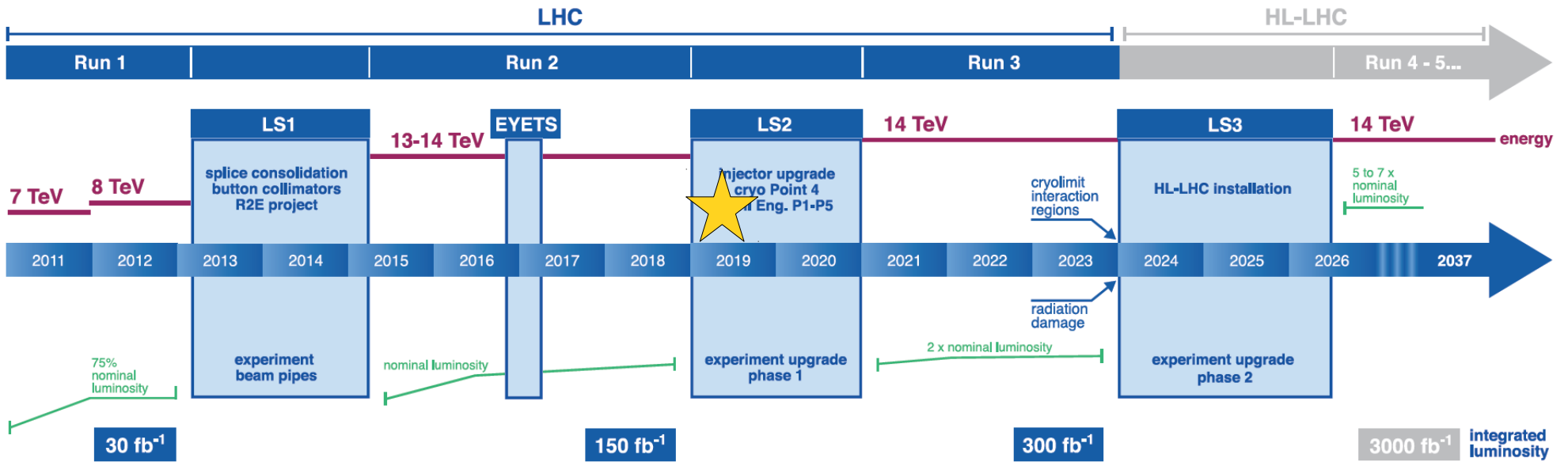


- ◆ Les sections efficaces de production ont tendance à être plates en fonction de  $\eta$
- ◆ NB :  $\eta = 4 \leftrightarrow \theta = 2^\circ$  !

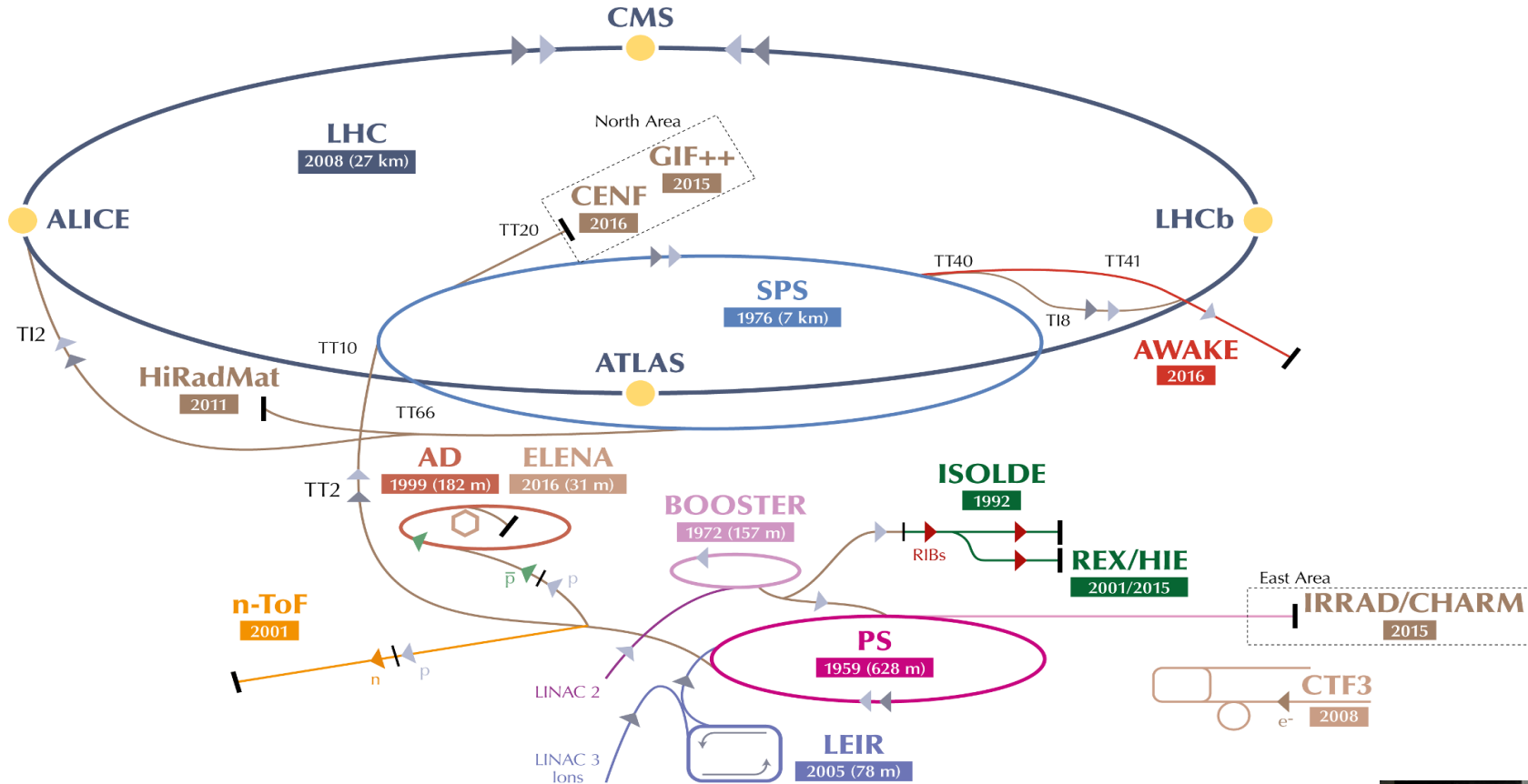


# Le project HL-LHC

## 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)

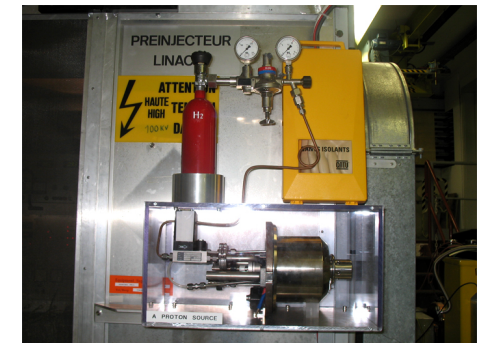
LHC Large Hadron Collider    SPS Super Proton Synchrotron    PS Proton Synchrotron    AD Antiproton Decelerator    CTF3 Clic Test Facility

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