

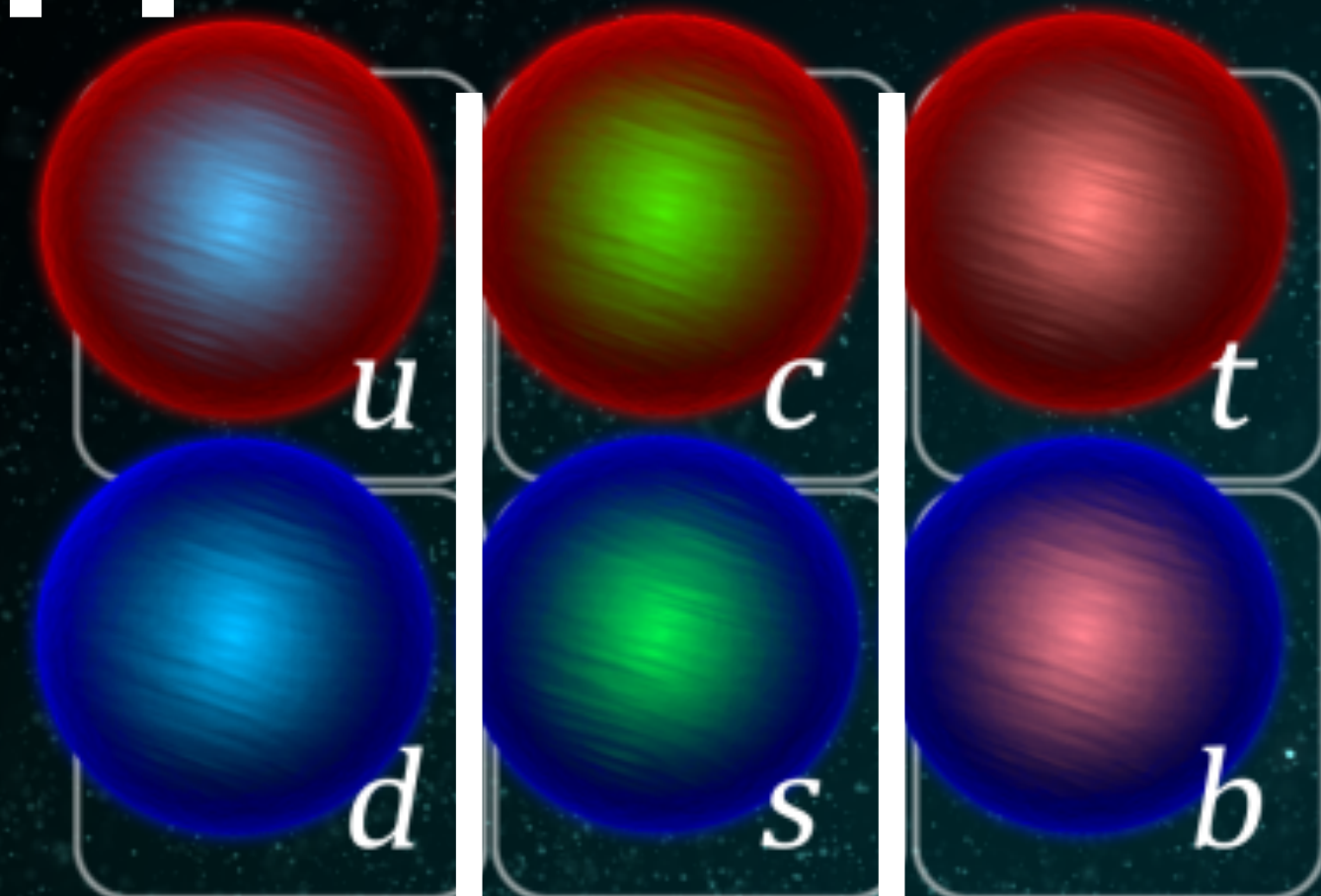
Comprendre l'infiniment petit

Physique des particules

(Cours basé sur celui de Y. Amhis et S. Descotes-Genon)

A. de Wit, 30/06/2026

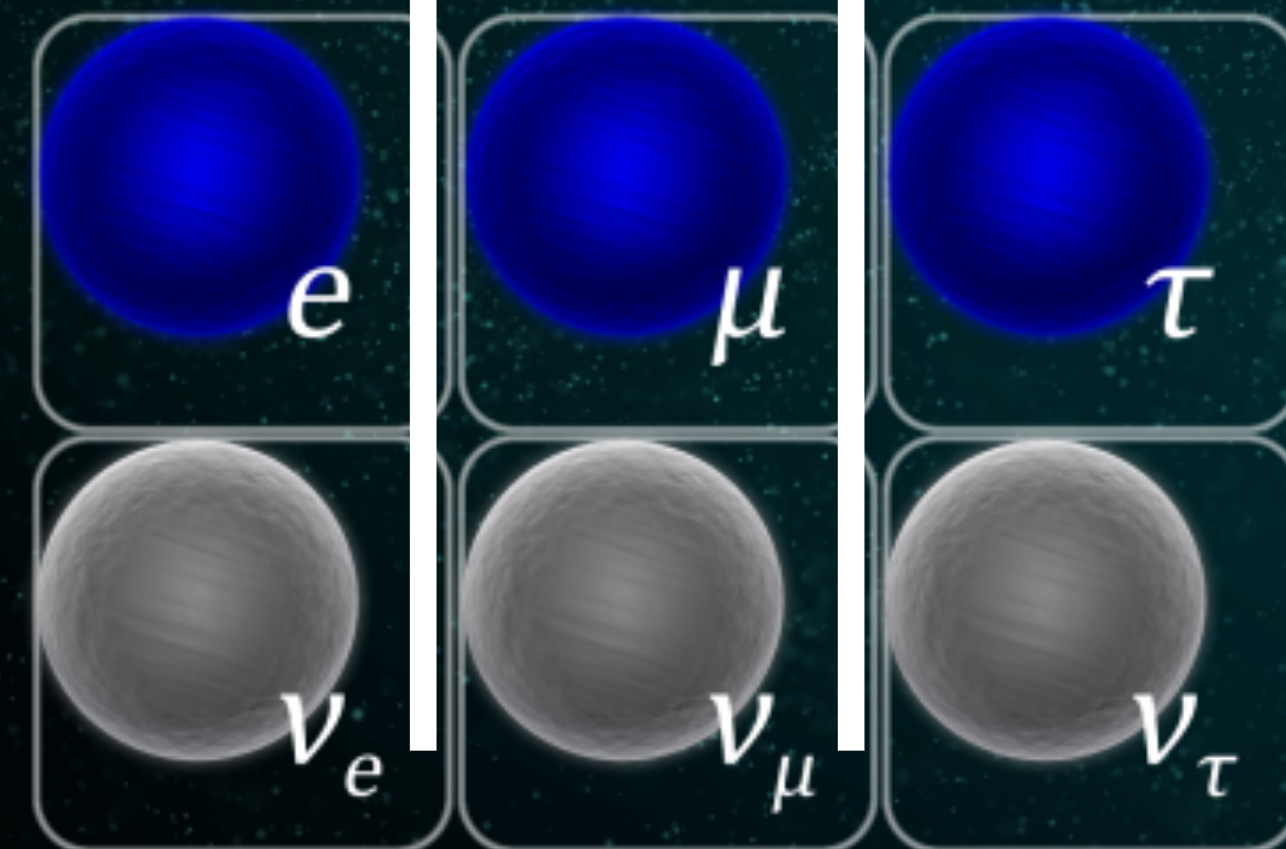
Rappel: le modèle standard



Quarks

Charge électrique: $+ 2/3$
Charges de couleur: vert, bleu, rouge

Charge électrique: $- 1/3$
Charges de couleur: vert, bleu, rouge



Leptons

Higgs boson
Charge électrique: -1

Charge électrique: 0

masse

3 familles de fermions (spin $1/2$)

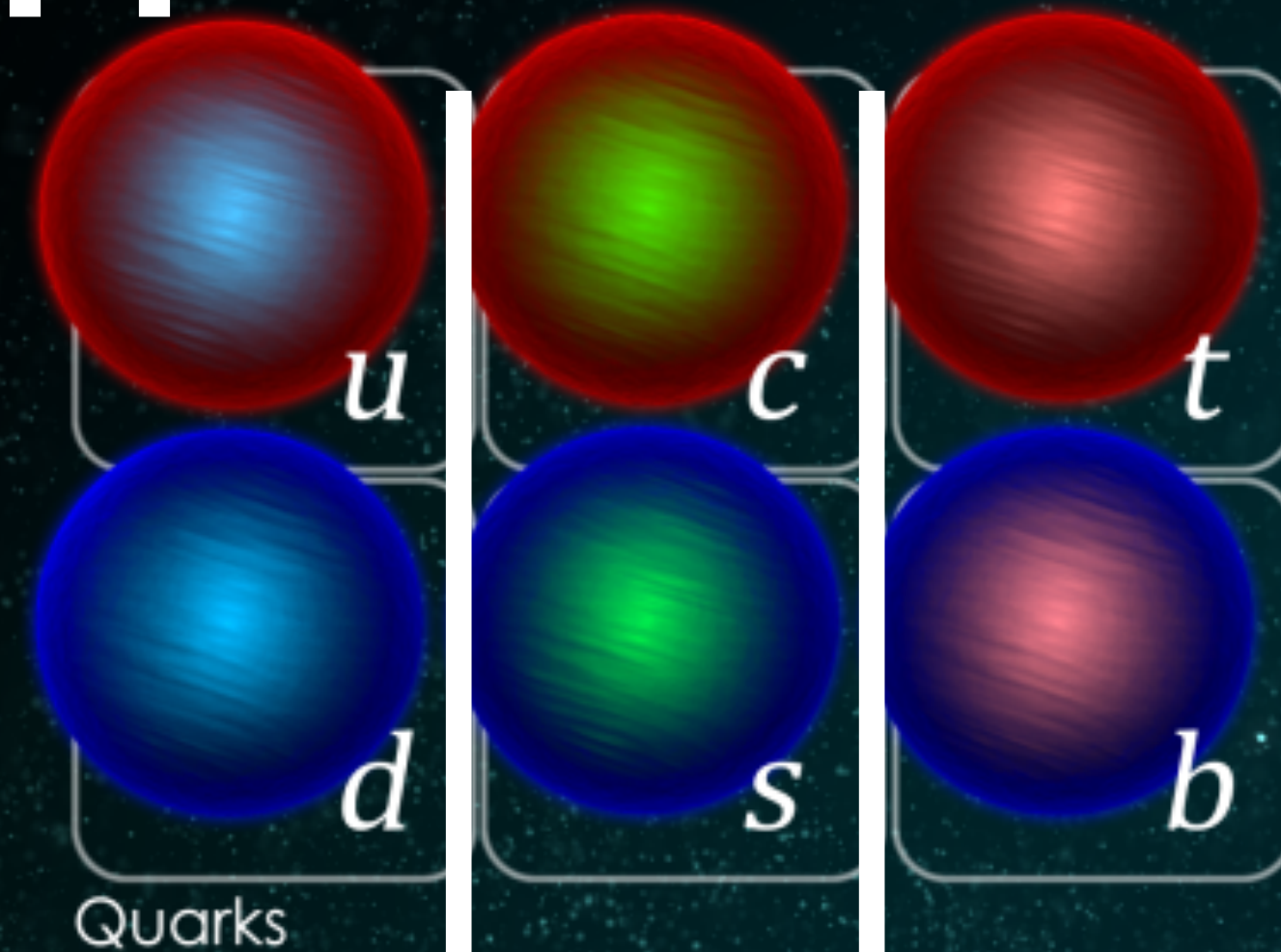


Forces



ACCELERATING SCIENCE

Rappel: le modèle standard



Charge électrique: $+2/3$
Charges de couleur: vert, bleu, rouge

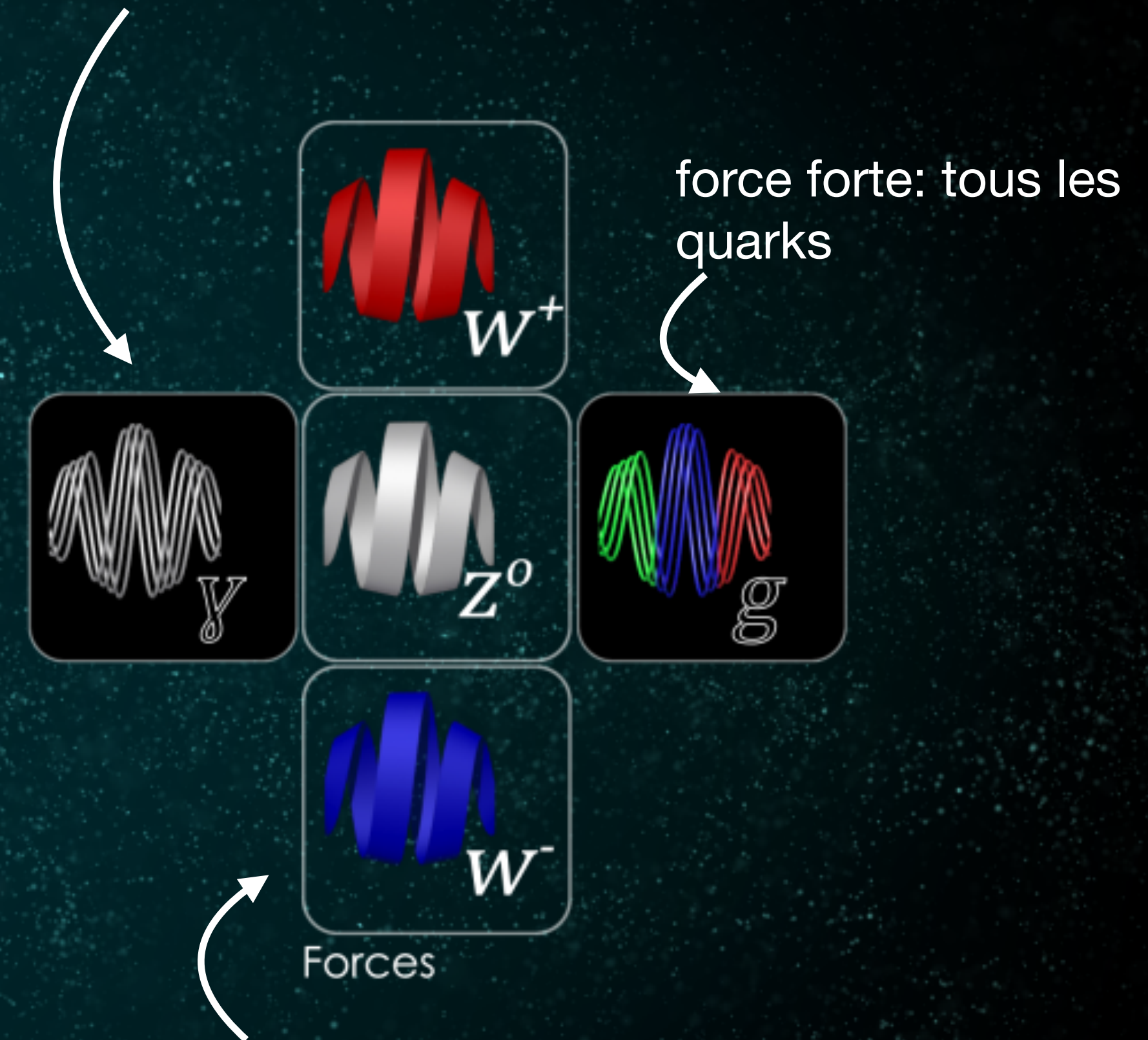
Charge électrique: $-1/3$
Charges de couleur: vert, bleu, rouge

Higgs boson
Charge électrique: -1

Charge électrique: 0

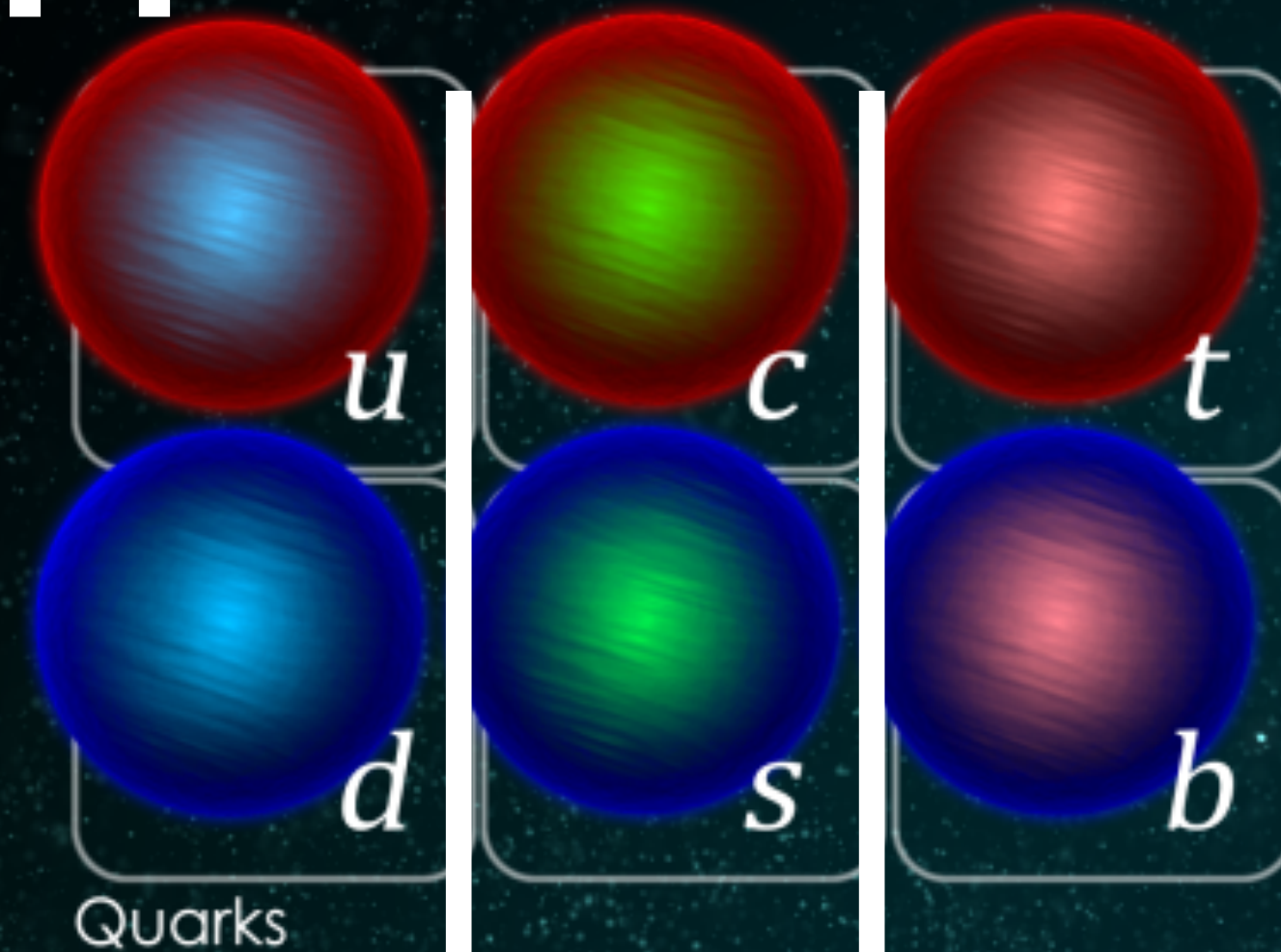
3 forces transportées par bosons médiateurs (spin 1)

électromagnétisme:
toutes les particules chargées électriquement



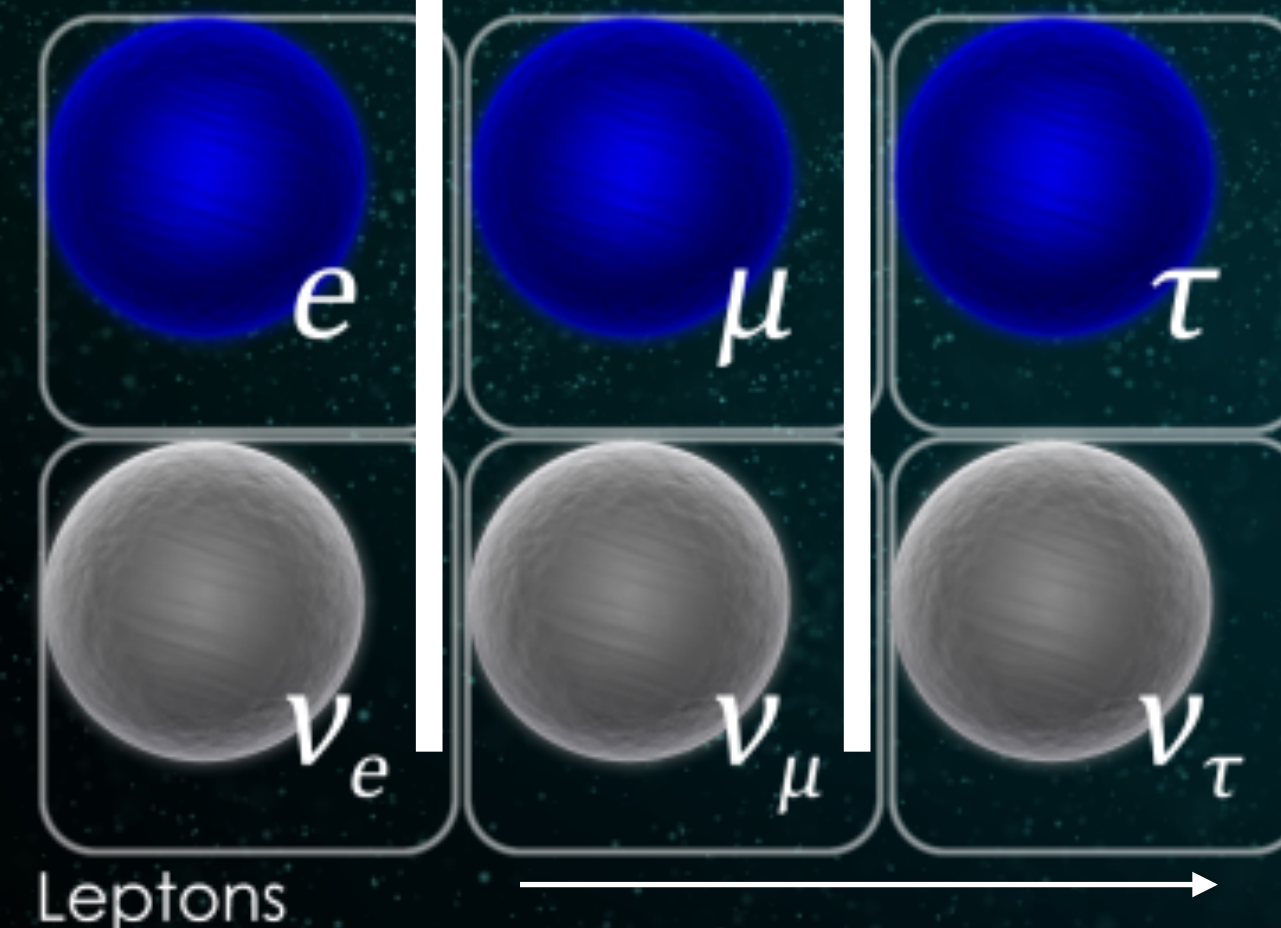
3 familles de fermions (spin 1/2)

Rappel: le modèle standard



Charge électrique: $+2/3$
Charges de couleur: vert, bleu, rouge

Charge électrique: $-1/3$
Charges de couleur: vert, bleu, rouge



Higgs boson
Charge électrique: -1

Charge électrique: 0

Boson de Higgs
(spin 0),
masse des
particules

3 forces transportées par bosons
médiateurs (spin 1)

électromagnétisme:
toutes les particules chargées électriquement

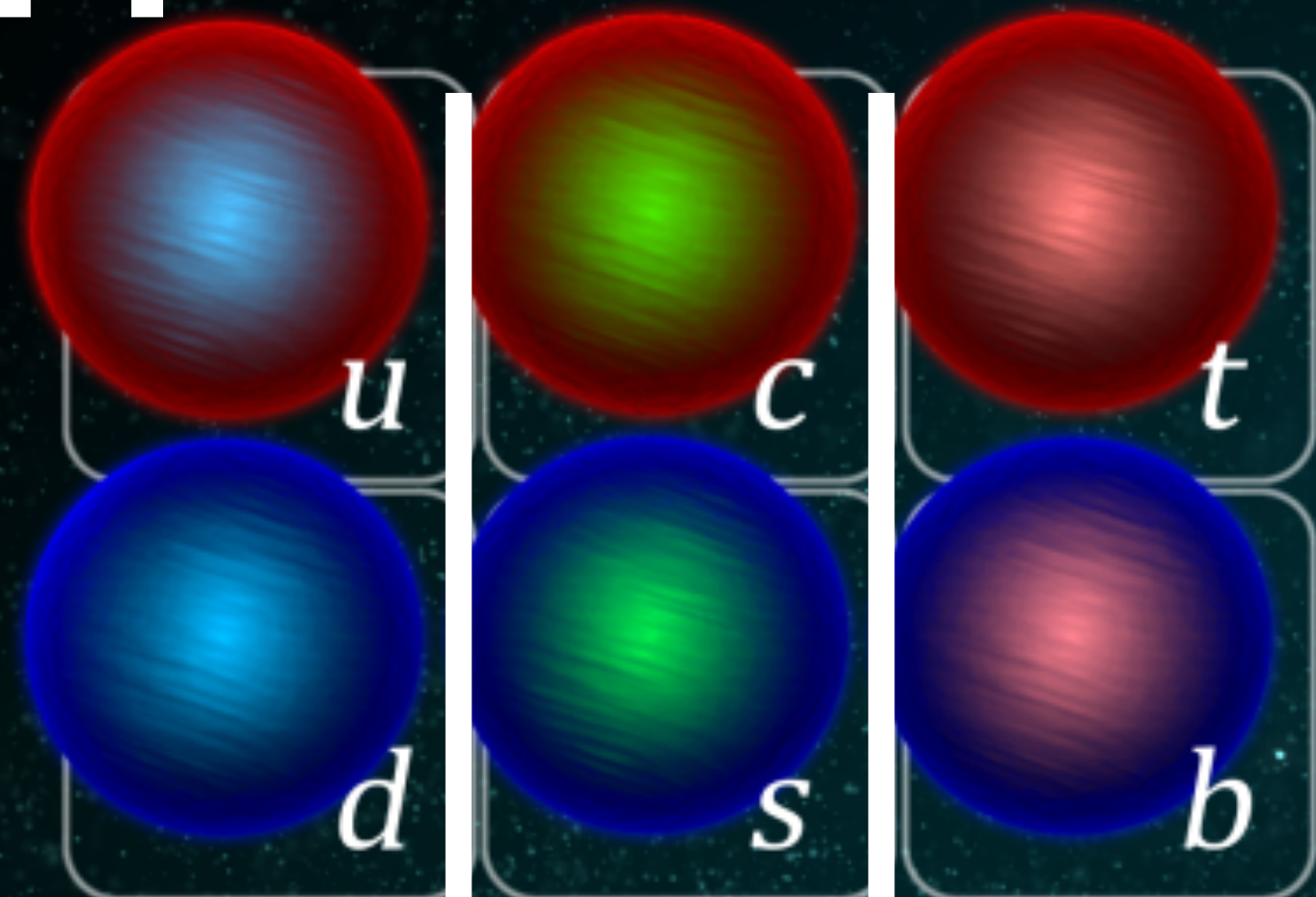


Forces

force faible: toutes les particules
sauf gluons

3 familles de fermions (spin 1/2)

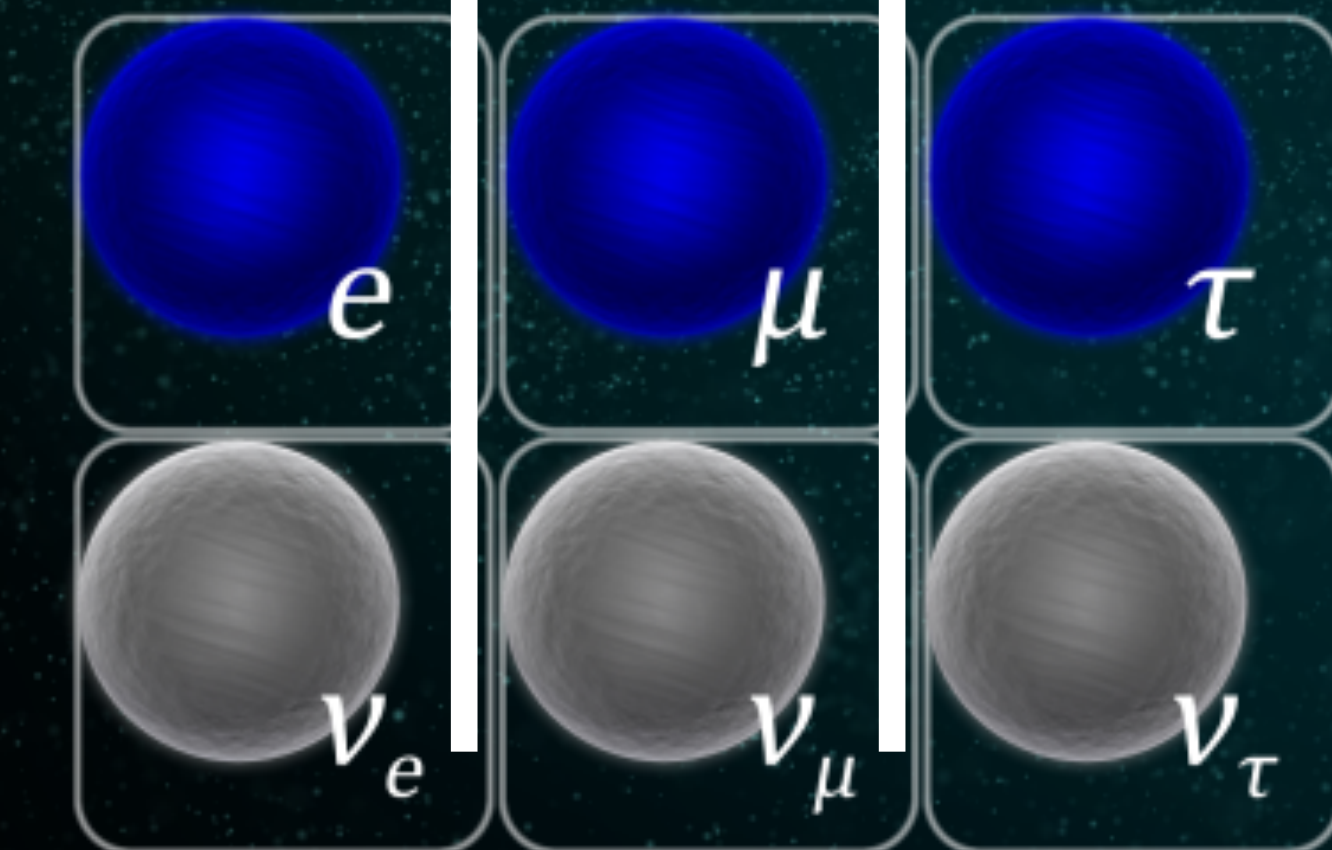
Rappel: le modèle standard



Quarks

Charge électrique: $+ 2/3$
Charges de couleur: vert, bleu, rouge

Charge électrique: $- 1/3$
Charges de couleur: vert, bleu, rouge



Leptons

Higgs boson
Charge électrique: -1

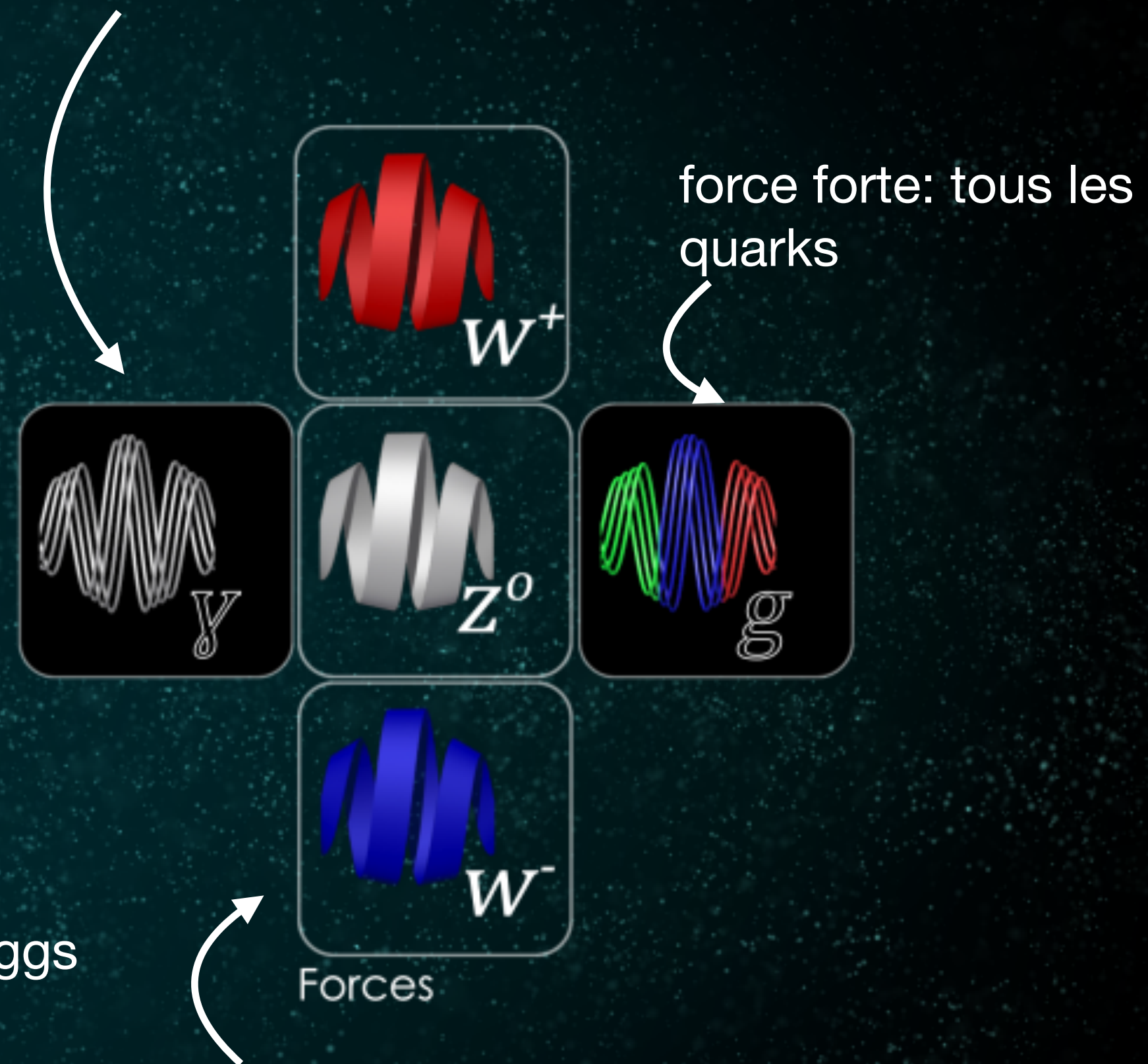
Charge électrique: 0



Boson de Higgs
(spin 0),
masse des
particules

3 forces transportées par bosons médiateurs (spin 1)

électromagnétisme:
toutes les particules chargées électriquement



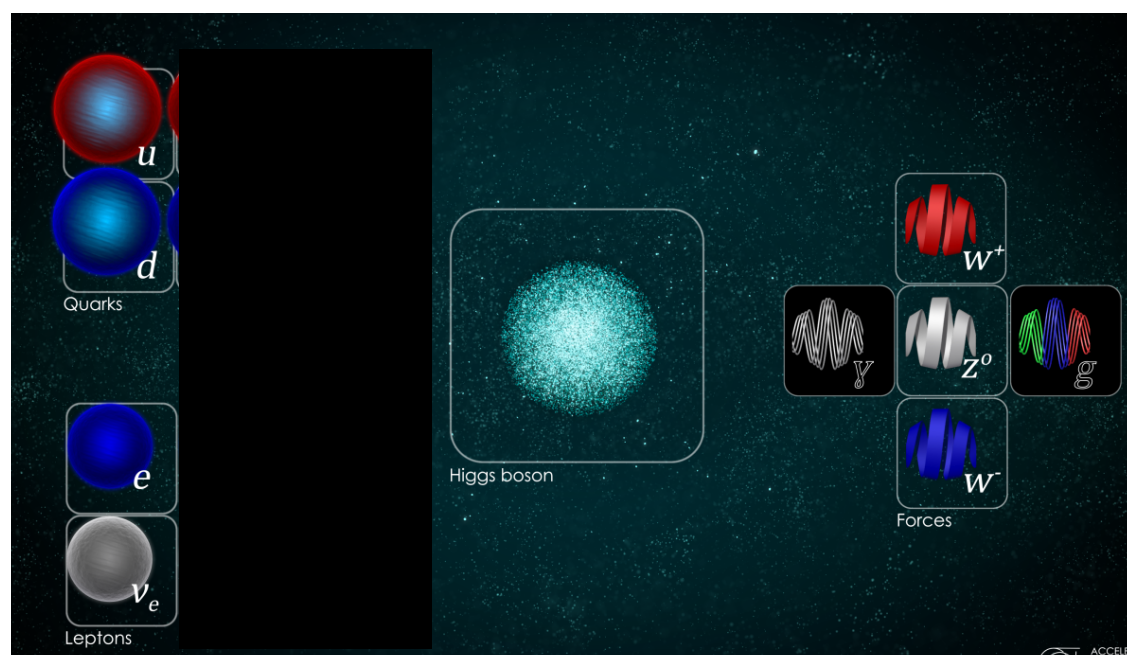
force faible: toutes les particules
sauf gluons

3 familles de fermions (spin 1/2) + antiparticules (même masse, charges opposées)

Comprendre les particules élémentaires



Ces briques constituent des objets



Ces briques constituent tout l'univers



Comprendre les particules élémentaires

Quelles briques
composent ces objets ?



Comprendre les particules élémentaires

Quelles briques
composent ces objets ?



On les casse !



Comprendre les particules élémentaires

Quelles briques
composent ces objets ?



On les casse !



Quelles briques
composent la matière ?



Comprendre les particules élémentaires

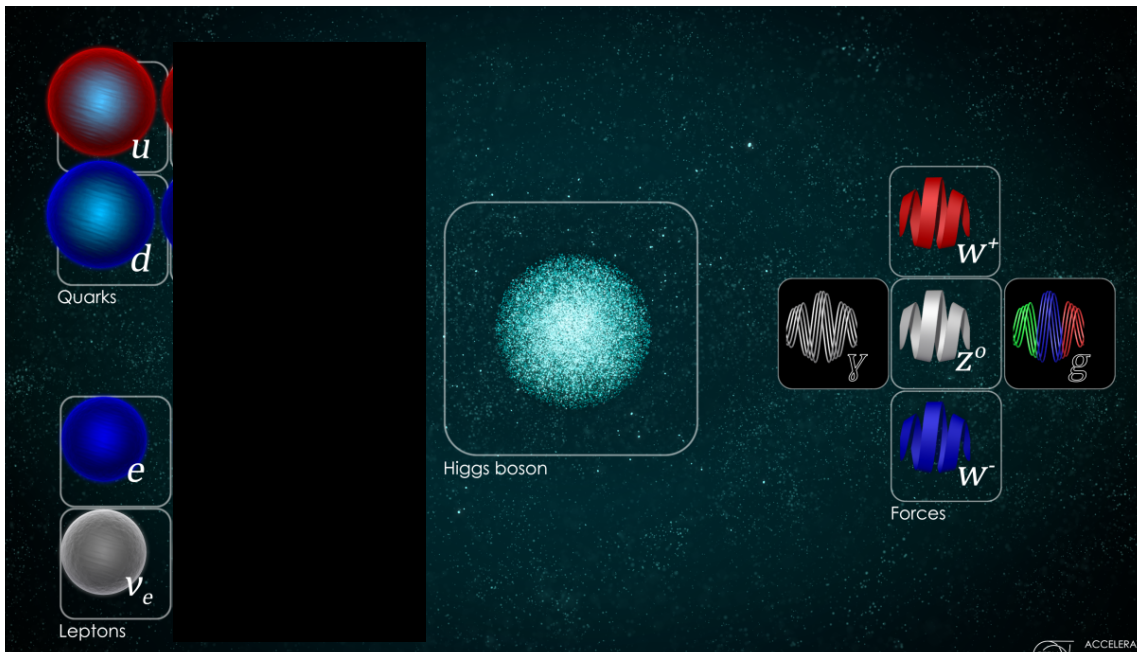
Quelles briques
composent ces objets ?



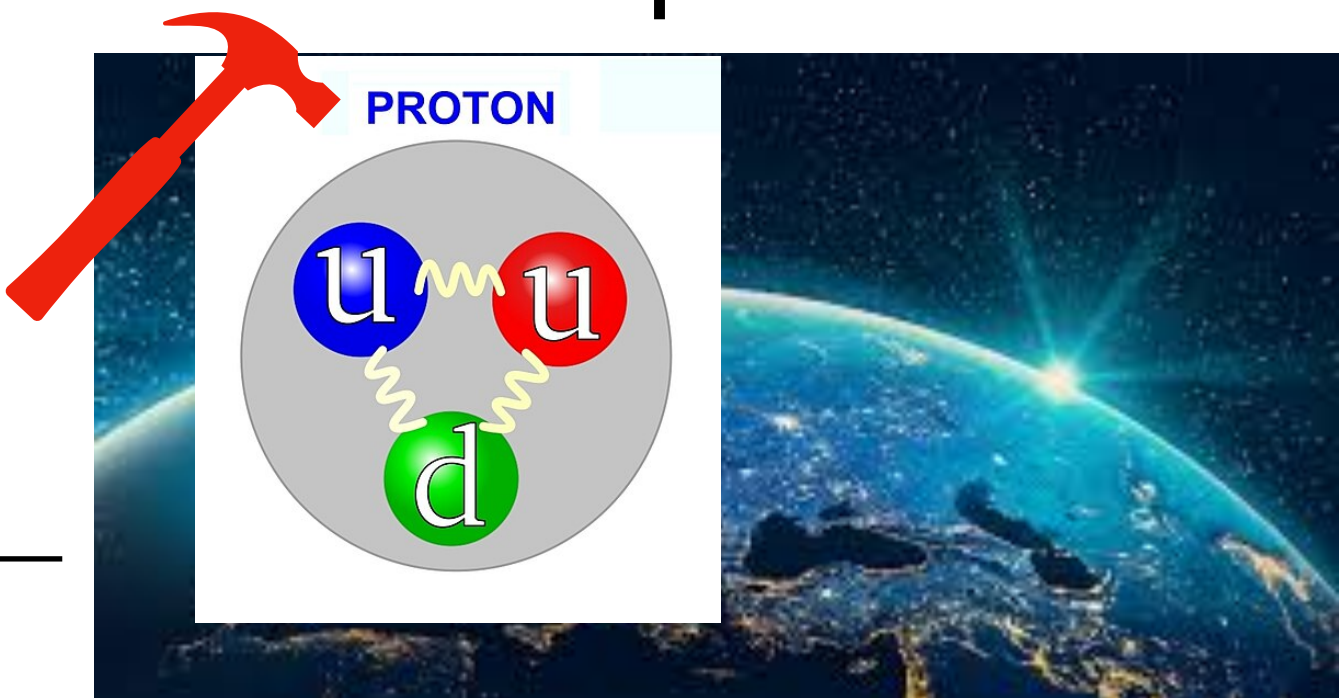
On les casse !



Quelles briques
composent la matière ?



On "casse" des protons !



Comprendre les particules élémentaires

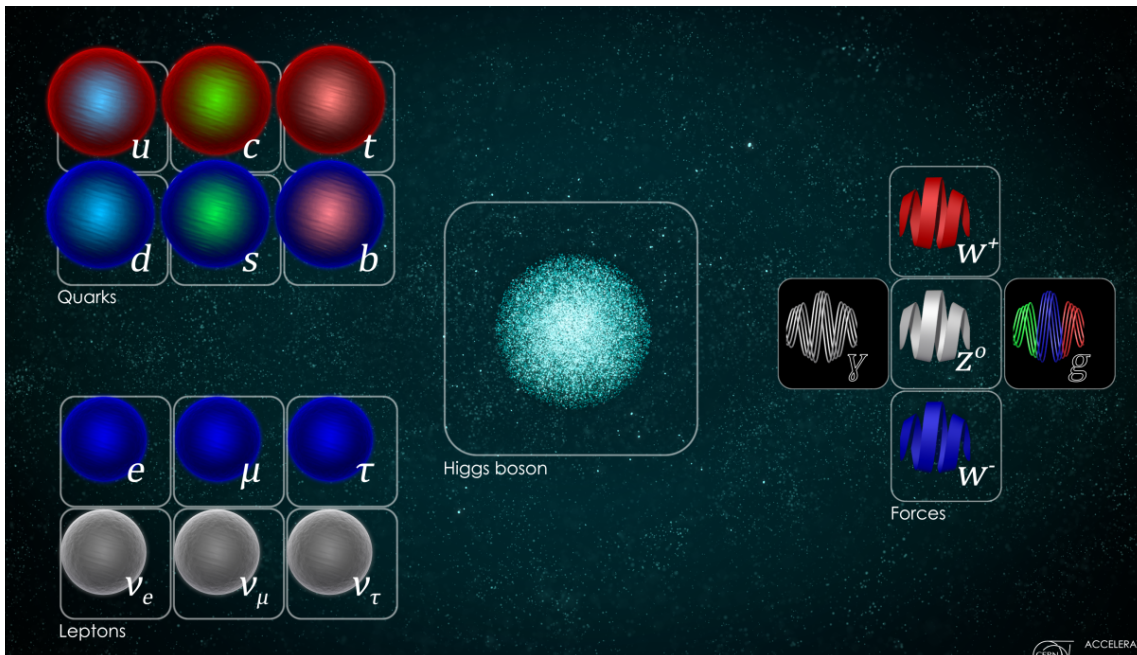
Quelles briques
composent ces objets ?



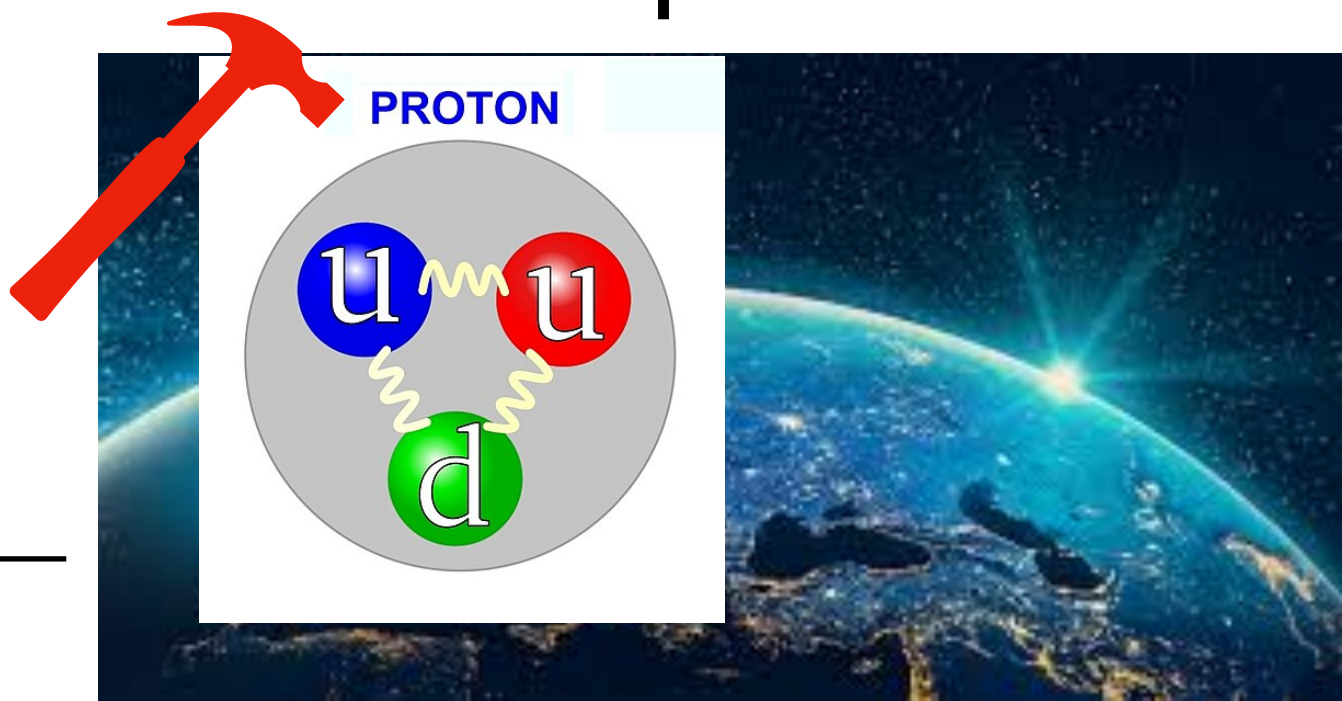
On les casse !



Quelles briques
composent la matière ?



On "casse" des protons !



Comprendre les particules élémentaires

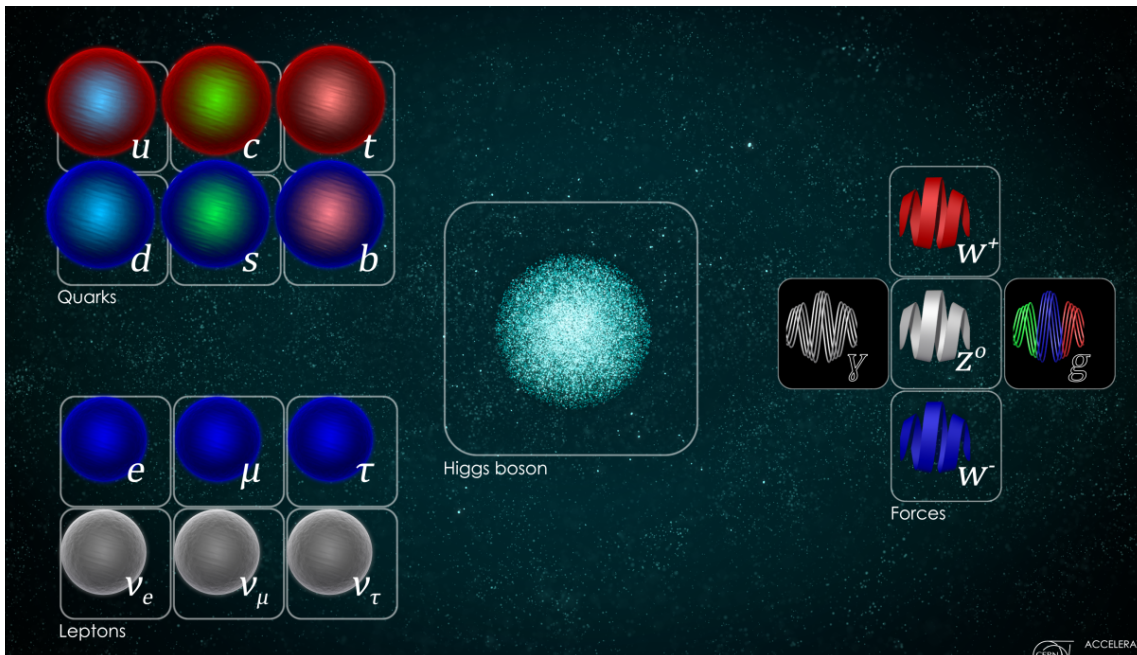
Quelles briques
composent ces objets ?



On les casse !

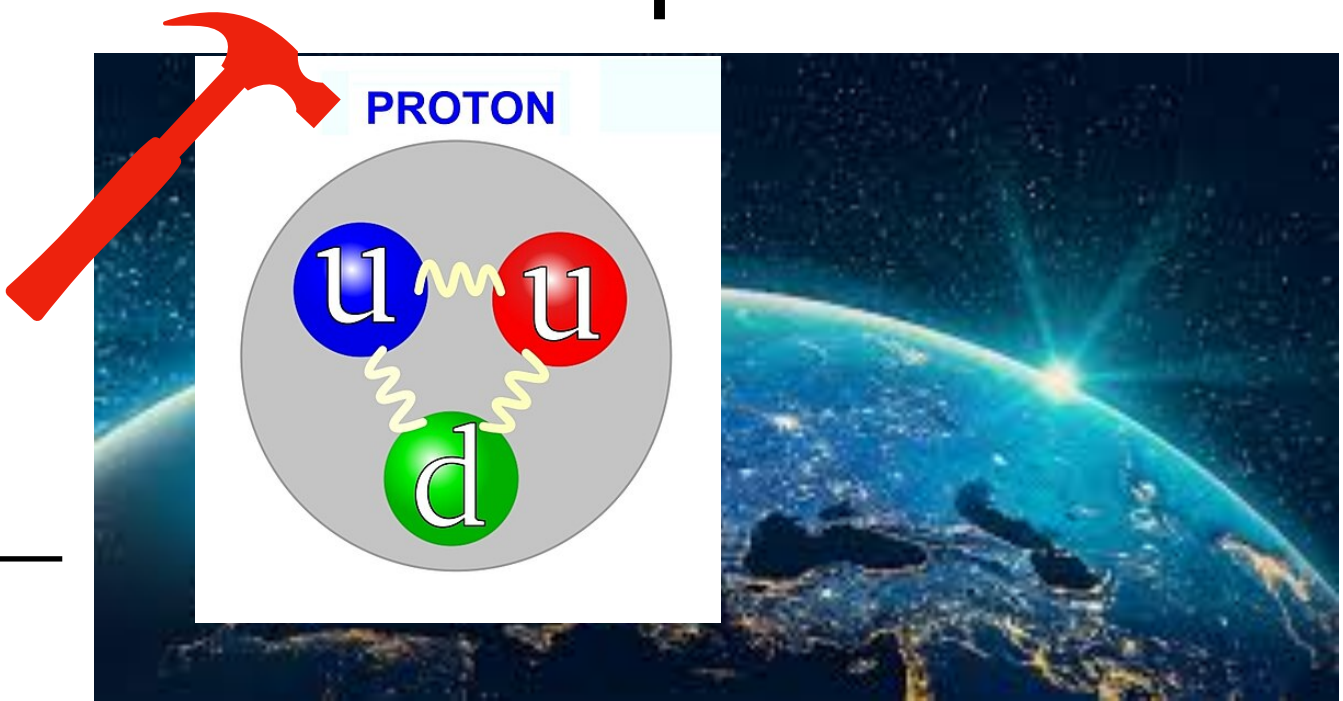


Quelles briques
composent la matière ?

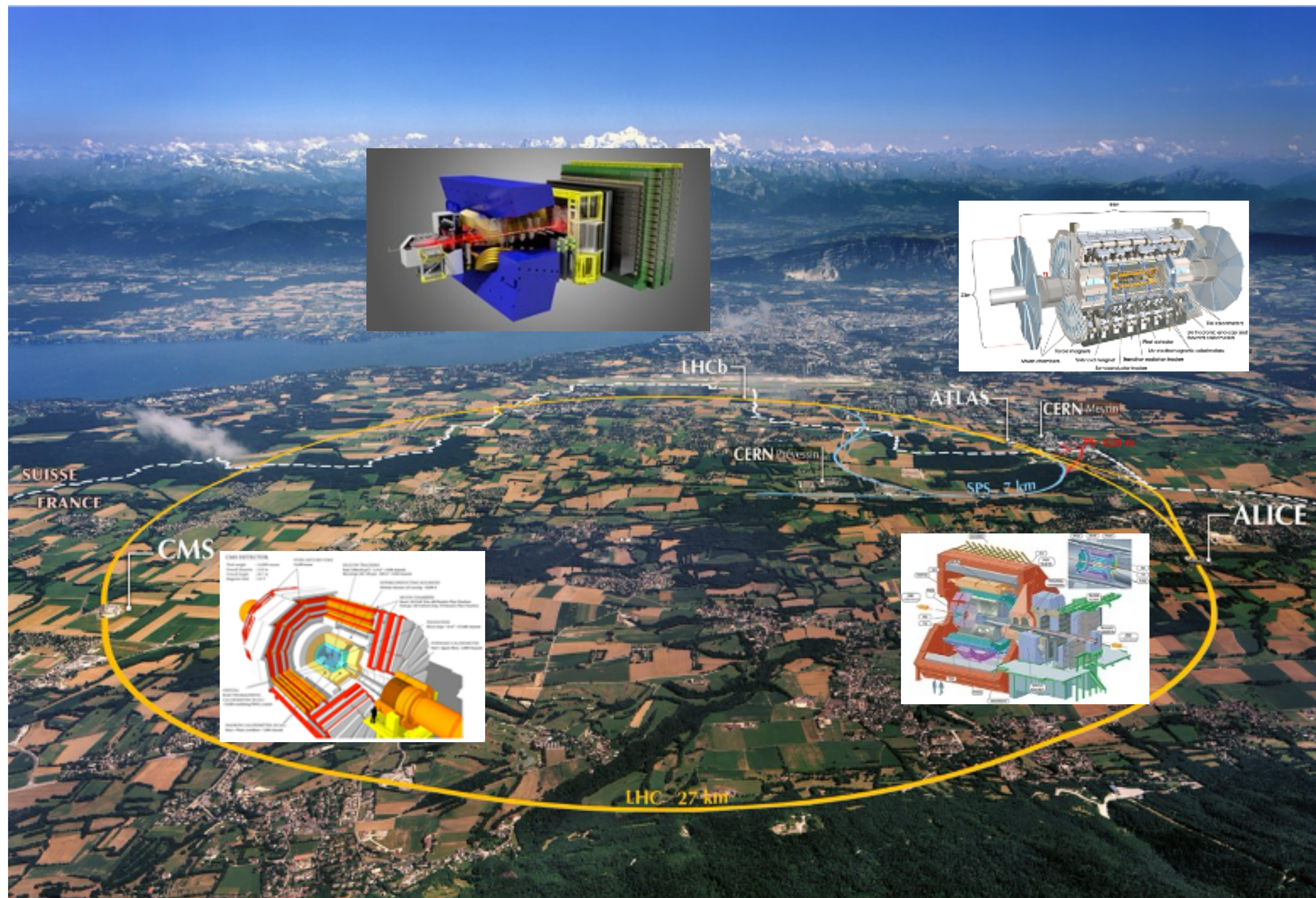


On "casse" des protons !

($E=mc^2$, on en crée d'autres!)



Le LHC au CERN



27km de tunnel au
42ème sous-sol
pour accélérer des
protons
et ions lourds

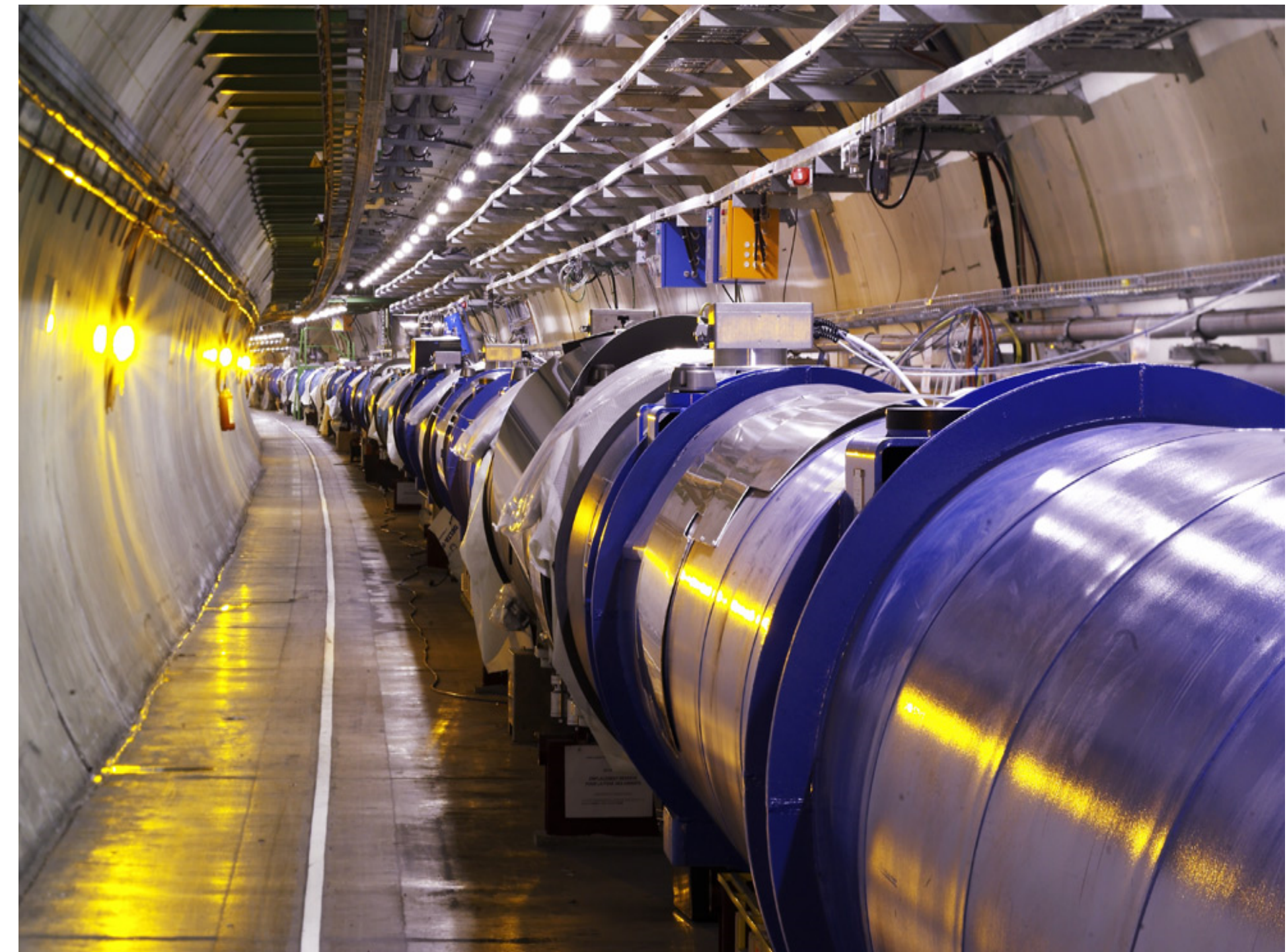
4 expériences qui
mesurent les
particules créées
lors des collisions

Le LHC en images et chiffres

27km de circonférence, 2 faisceaux de protons (ou ions lourds)

Faisceaux déviés par plus de 1500 aimants supraconducteurs refroidis à -271°C

Vide poussé: pression 10x plus faible que l'atmosphère lunaire

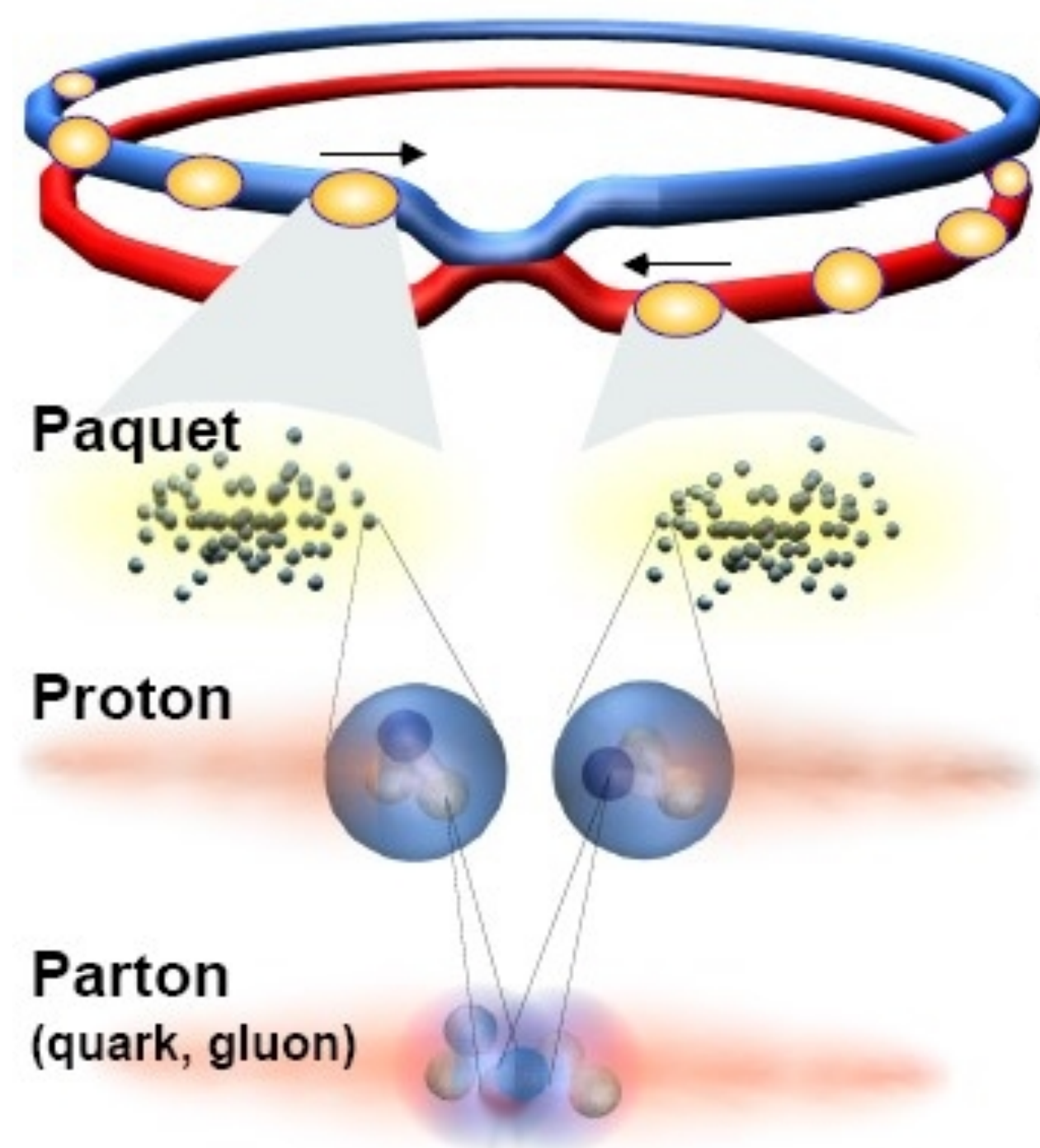


Le LHC en images et chiffres

27km de circonférence, 2 faisceaux de protons (ou ions lourds)

Faisceaux déviés par plus de 1500 aimants supraconducteurs refroidis à -271°C

Vide poussé: pression 10x plus faible que l'atmosphère lunaire



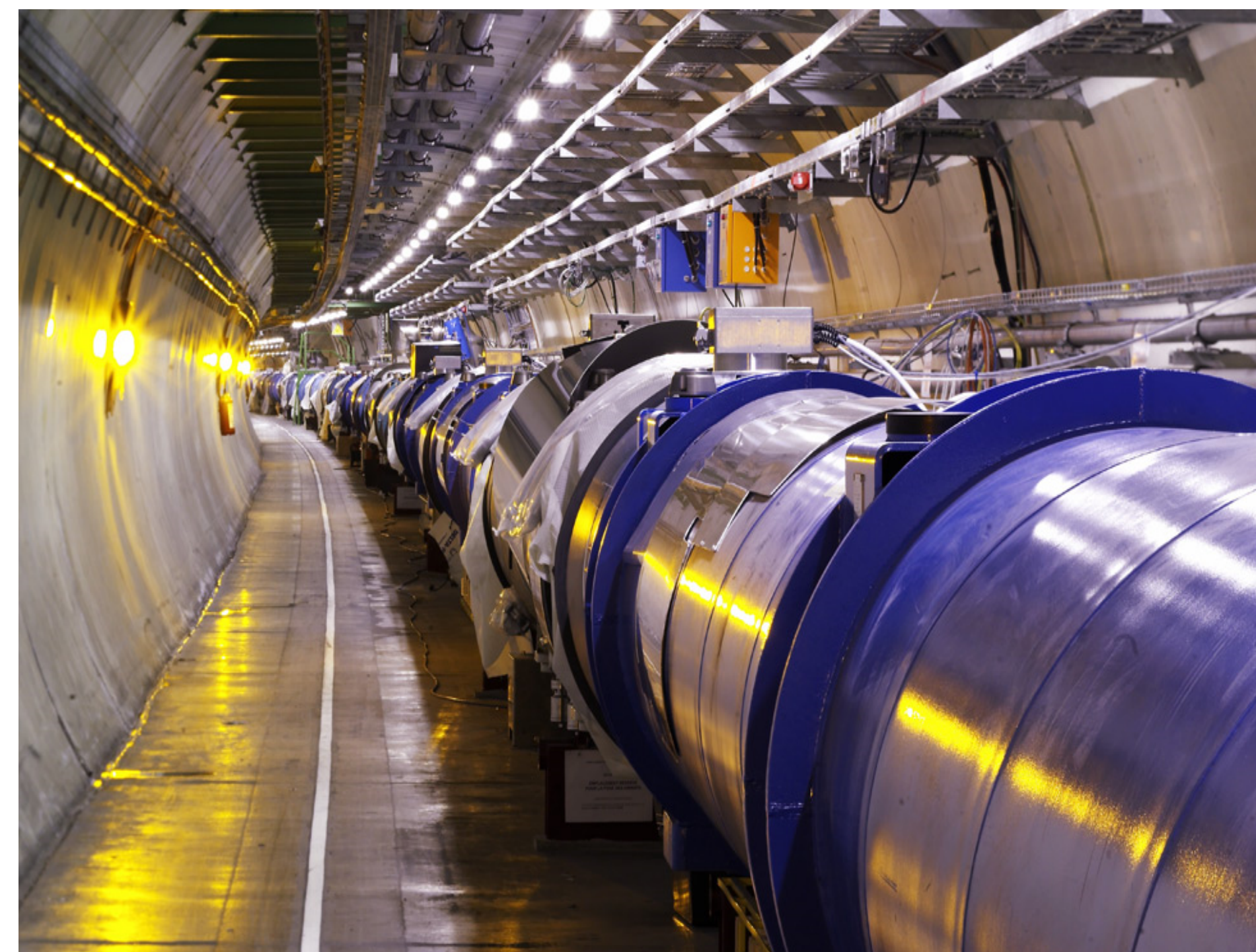
Faisceaux de protons:
~3000 paquets de protons

10^{11} protons/paquet

Energie des faisceaux: 6.8
TeV par faisceau

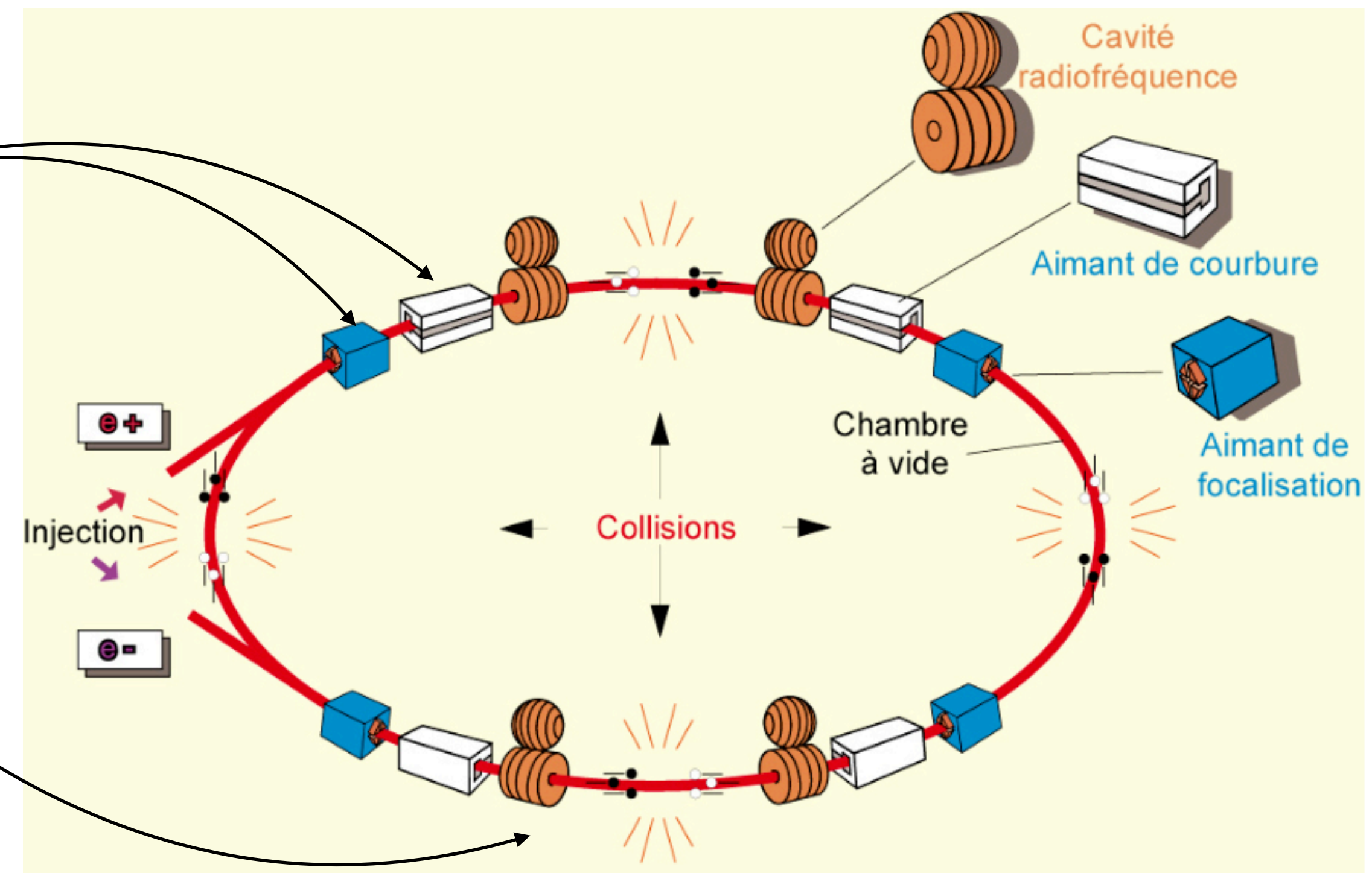
Taux des croisements 40 MHz

10^7 - 10^9 collisions par
seconde

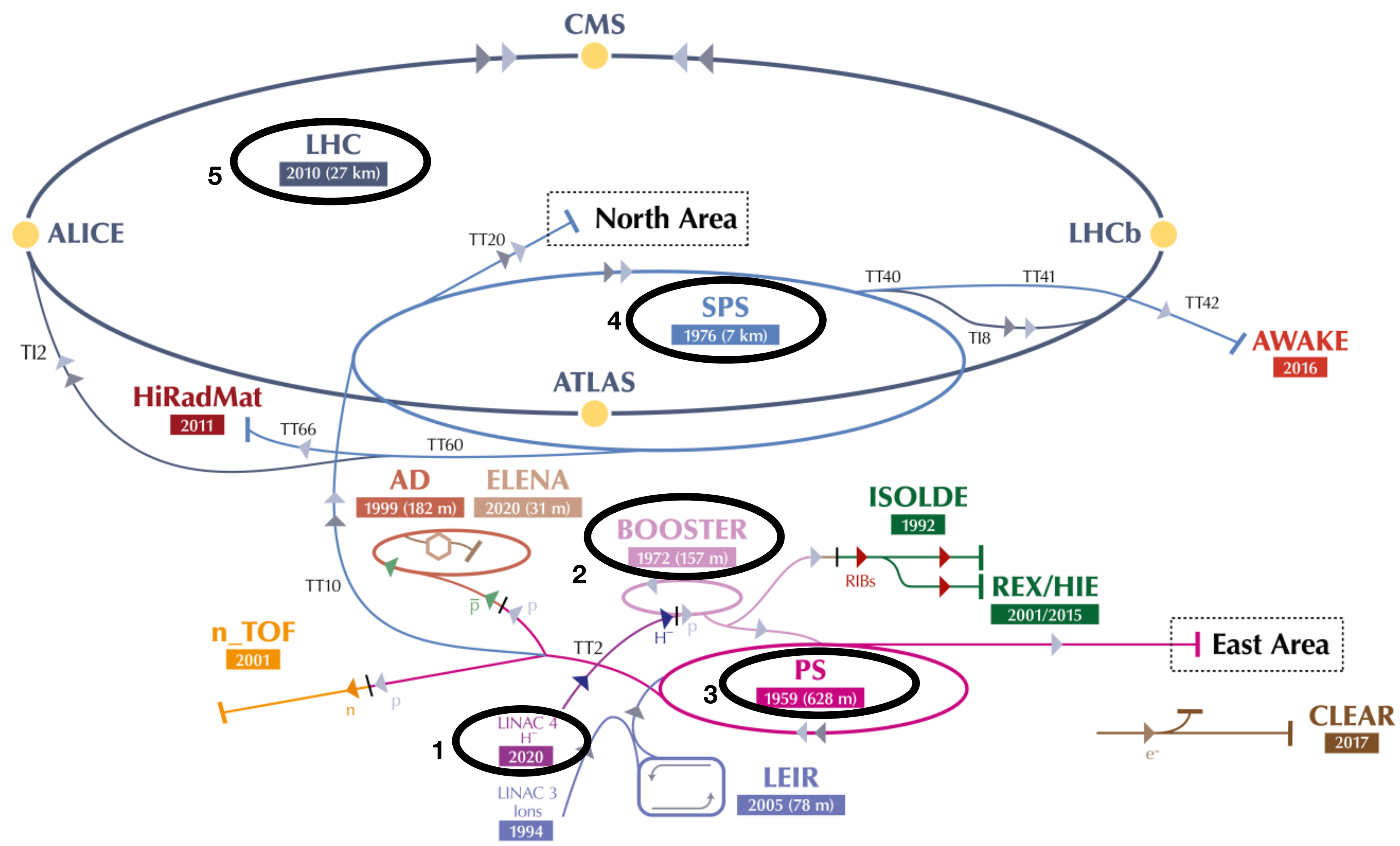


Comment accélérer ?

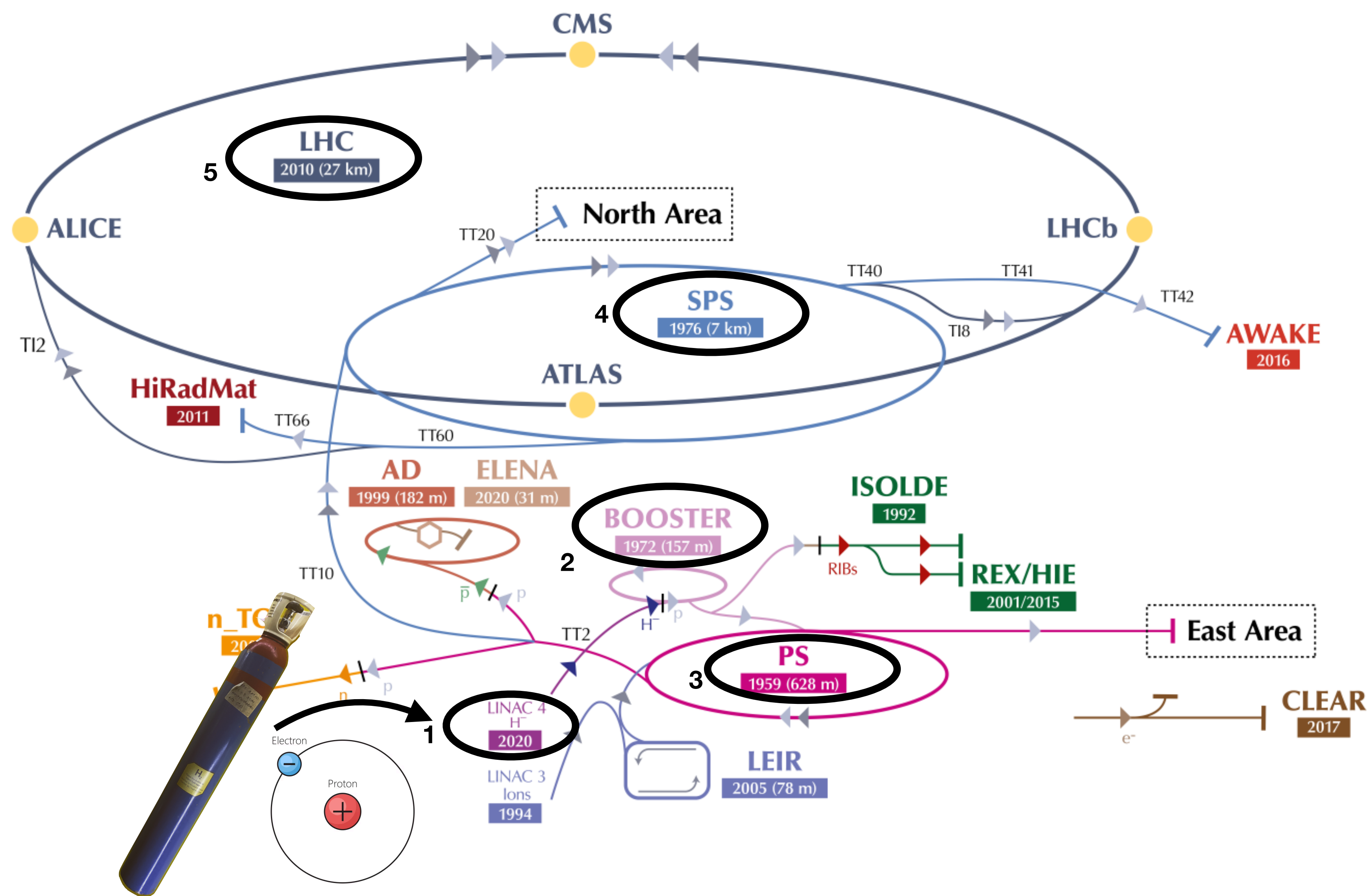
- Particules chargées focalisées et gardées sur une trajectoire circulaire par aimants dipolaires, quadripolaires,... (champ magnétique)
- Gagnent de l'énergie dans des cavités de radiofréquence (champ électrique)
- Paquets séparés les uns des autres: + de collisions
- Illustration pour LEP (prédécesseur du LHC)



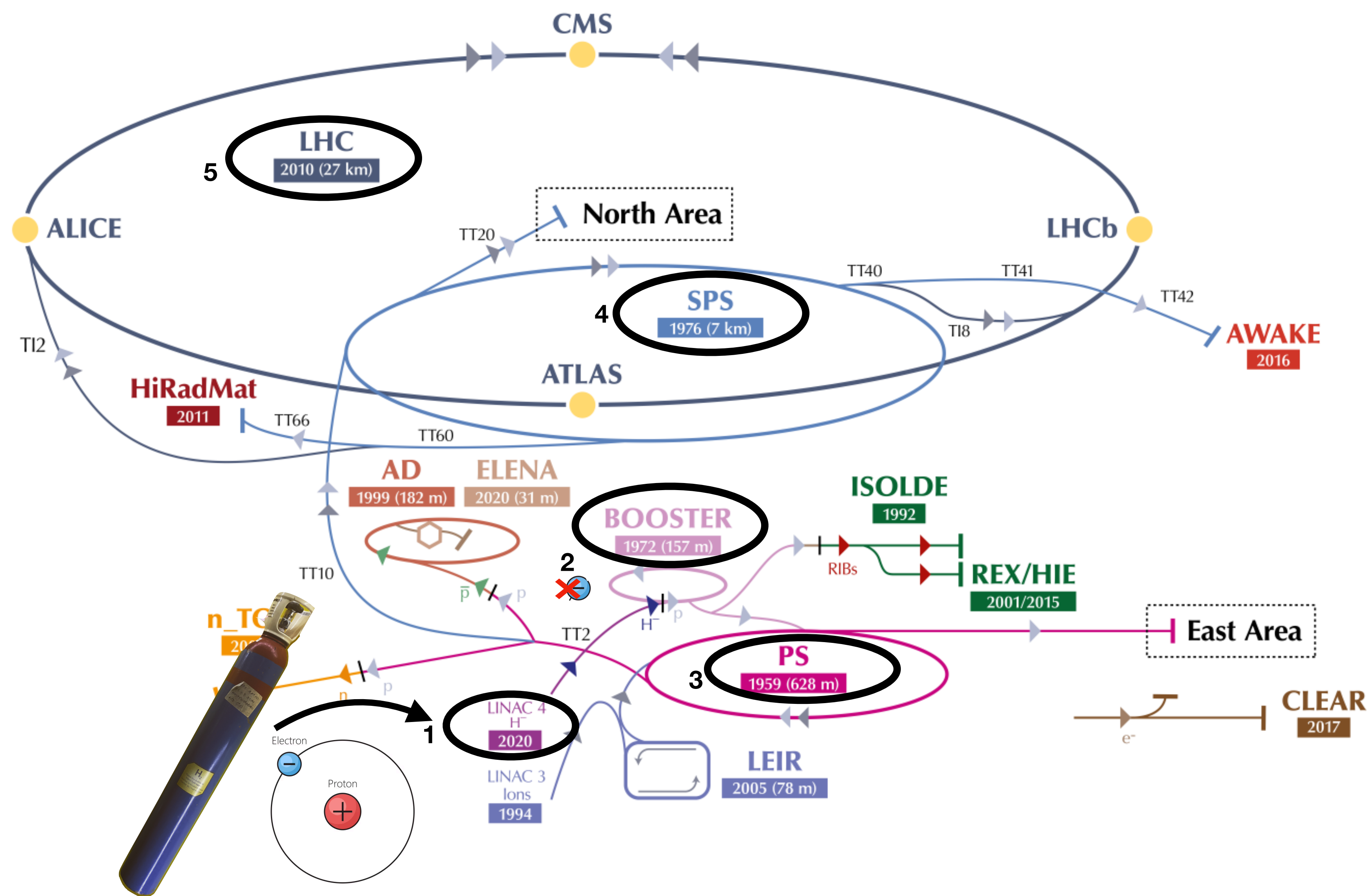
Comment accélérer ?



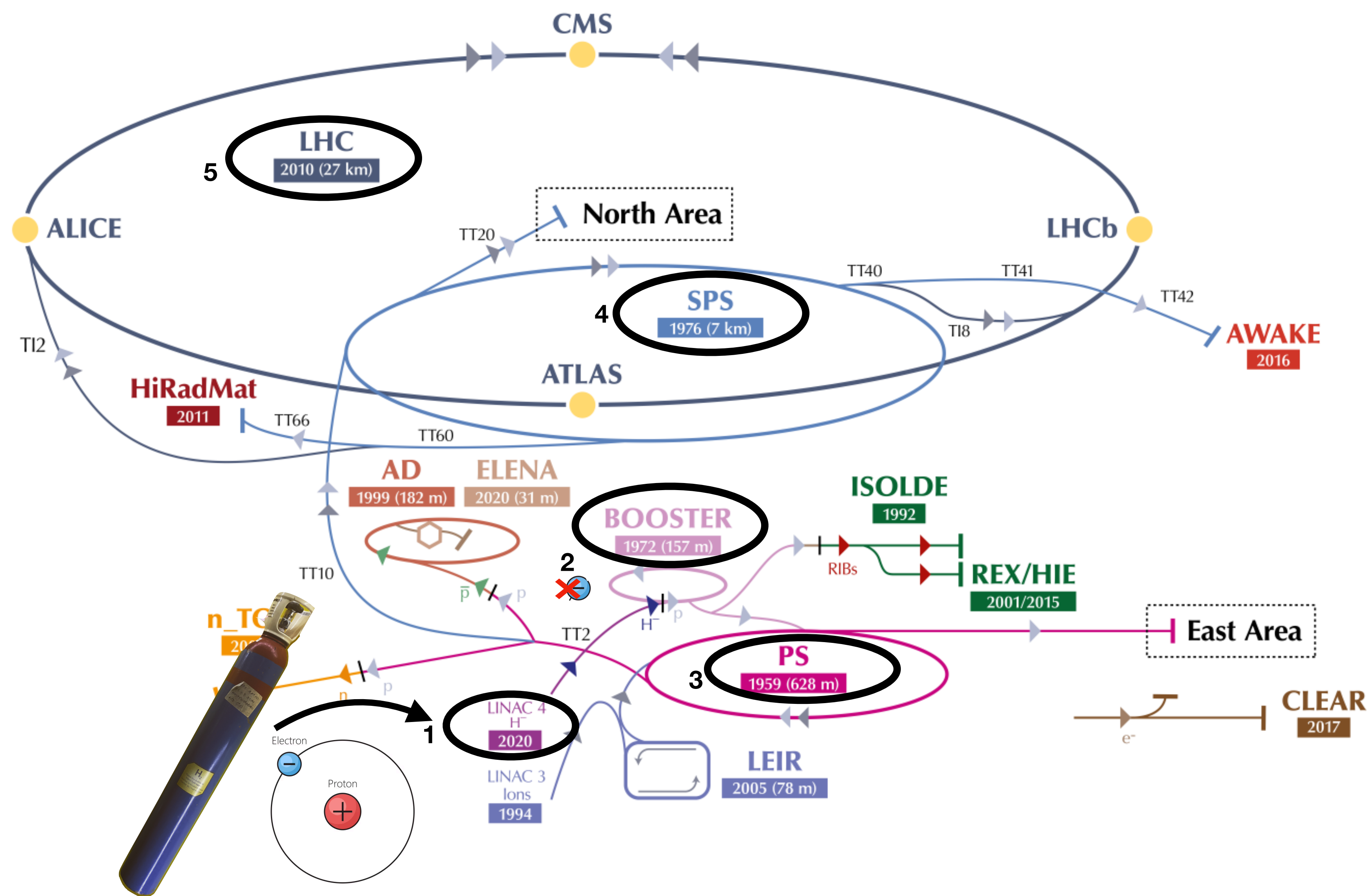
Comment accélérer ?



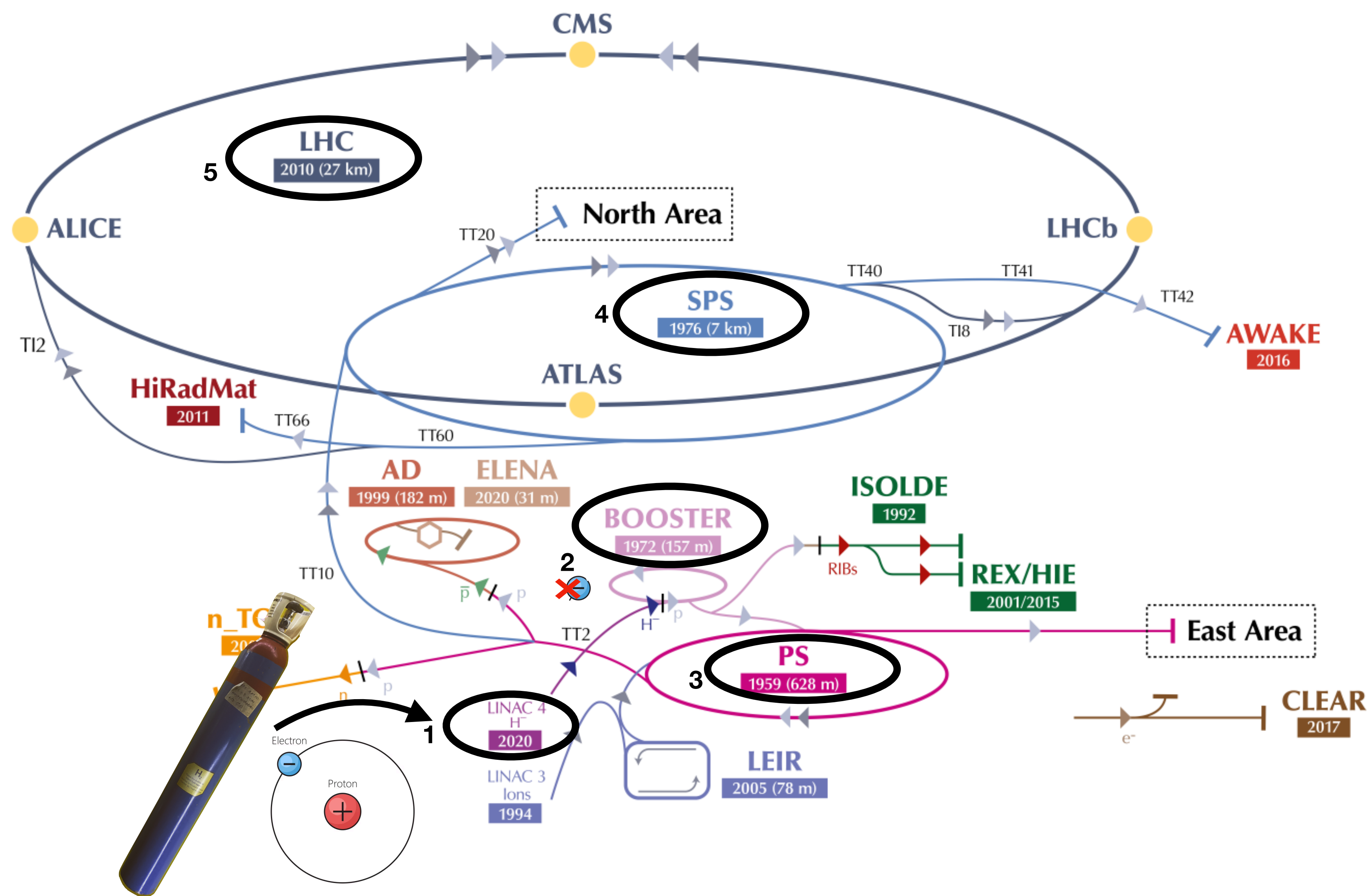
Comment accélérer ?



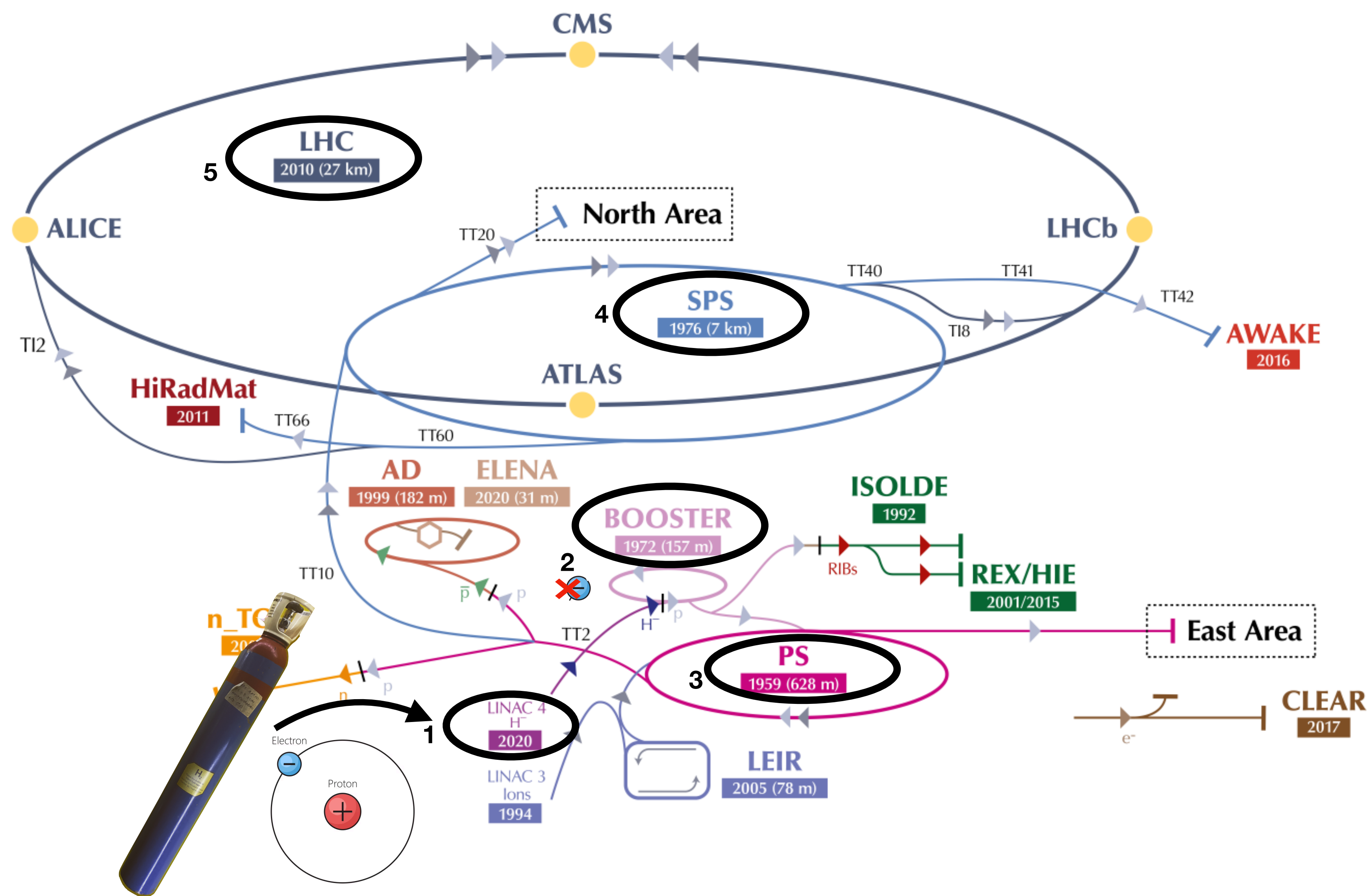
Comment accélérer ?



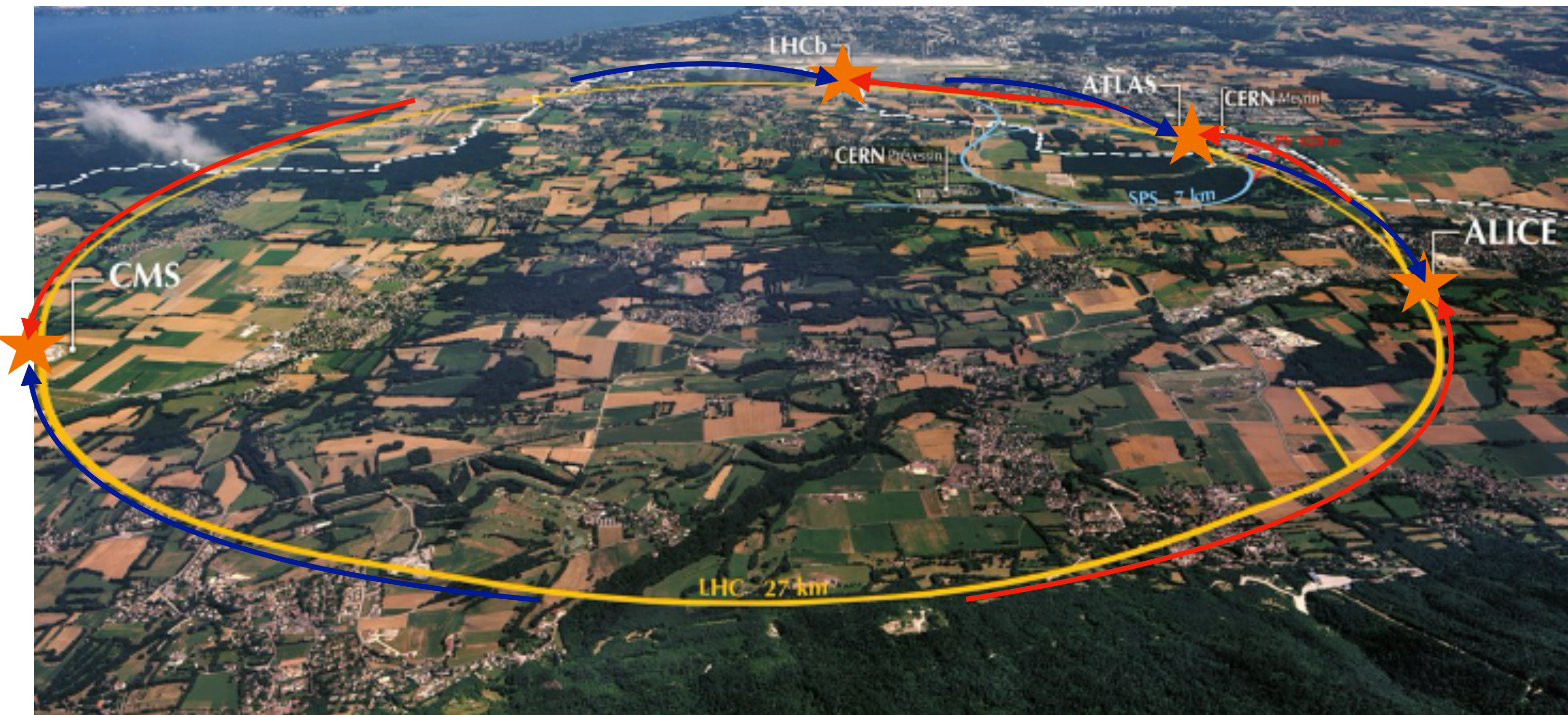
Comment accélérer ?



Comment accélérer ?



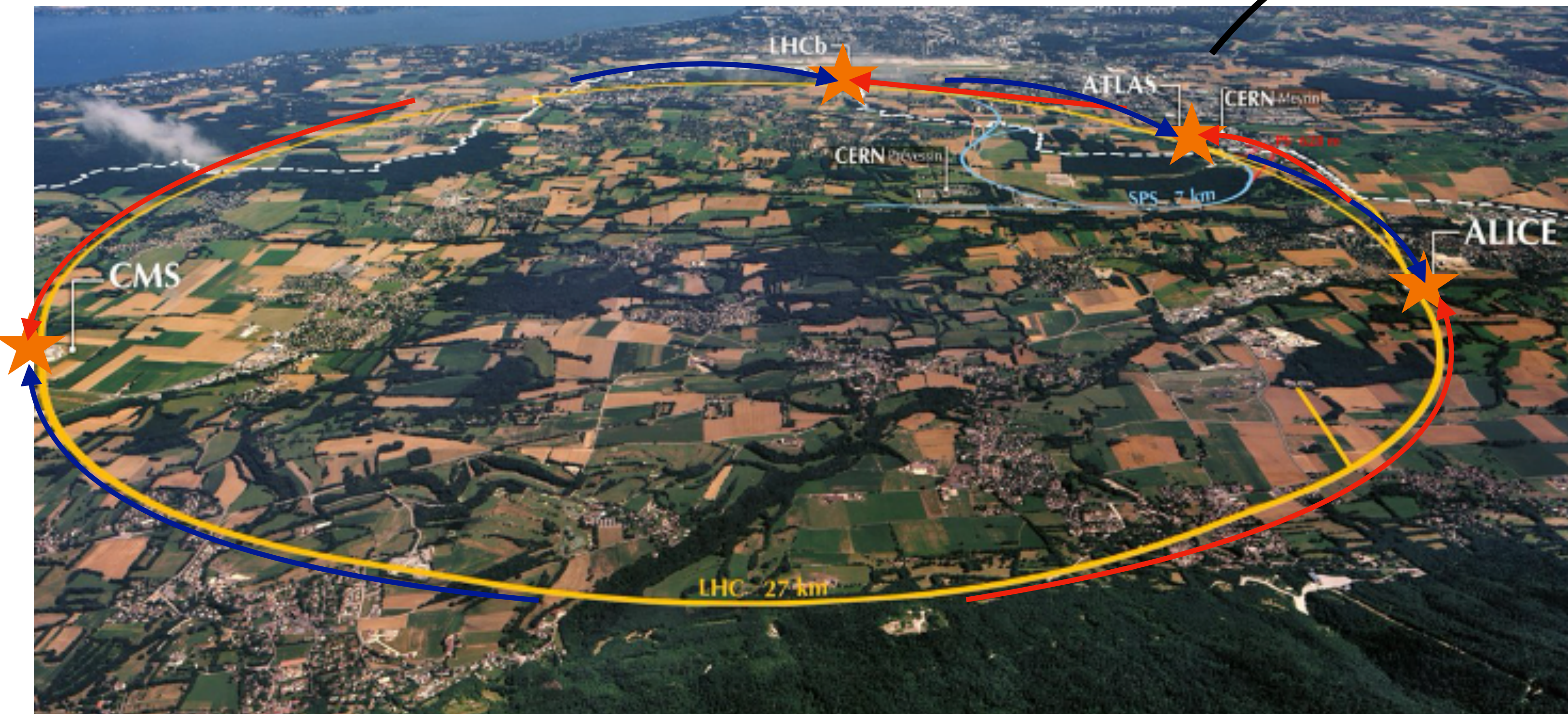
Comment collisionner ?



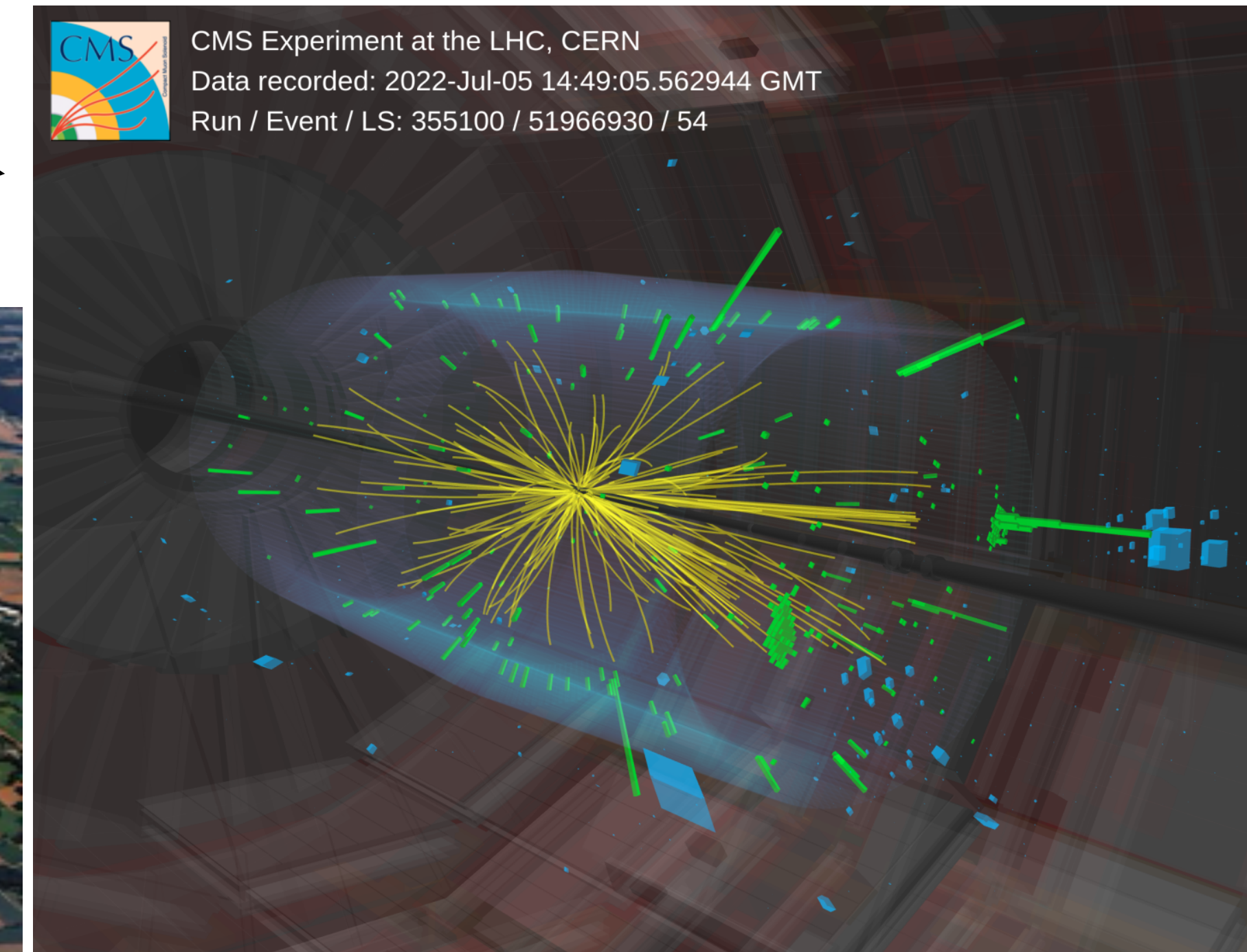
Comment collisionner ?

Collision: energie des protons
élevée → création de particules...

$$E=mc^2$$



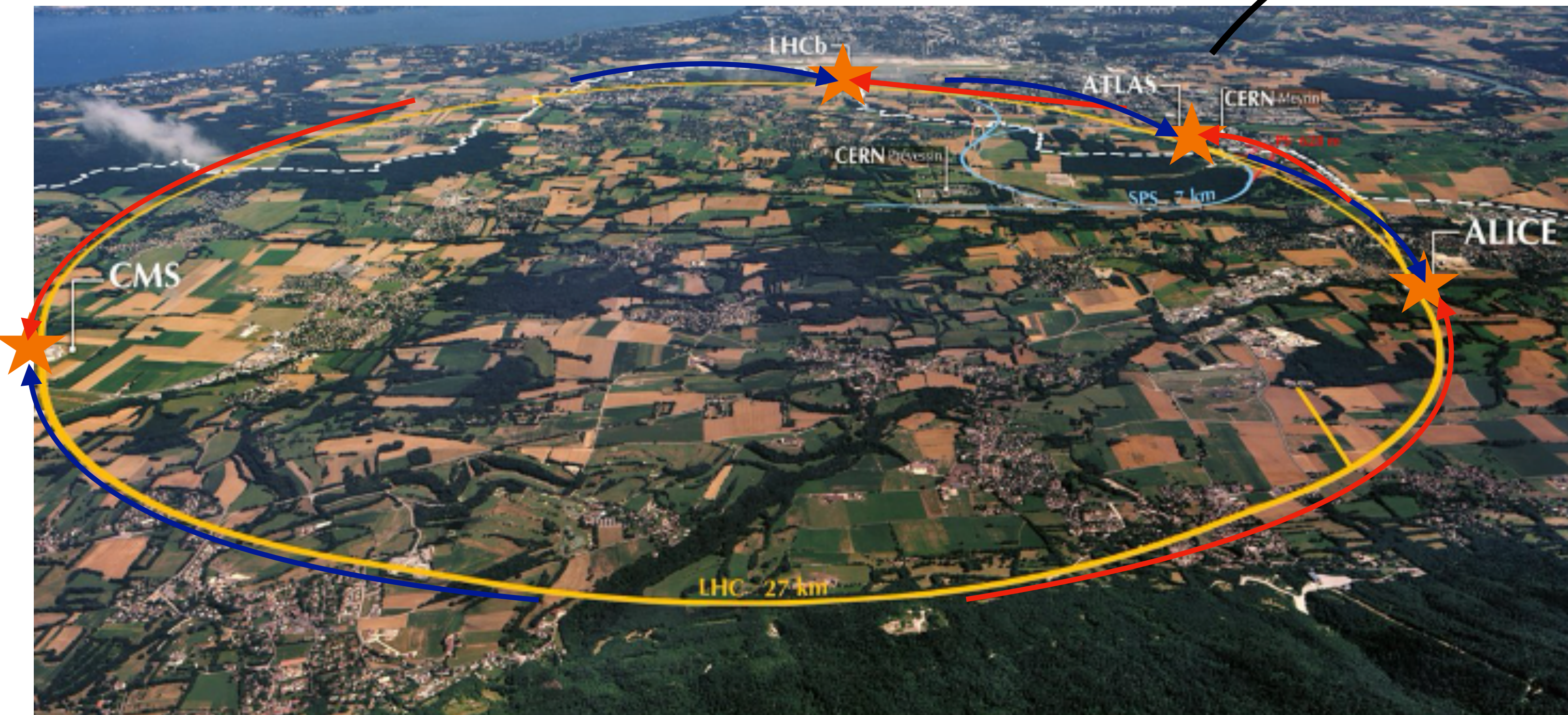
... qui se désintègrent après



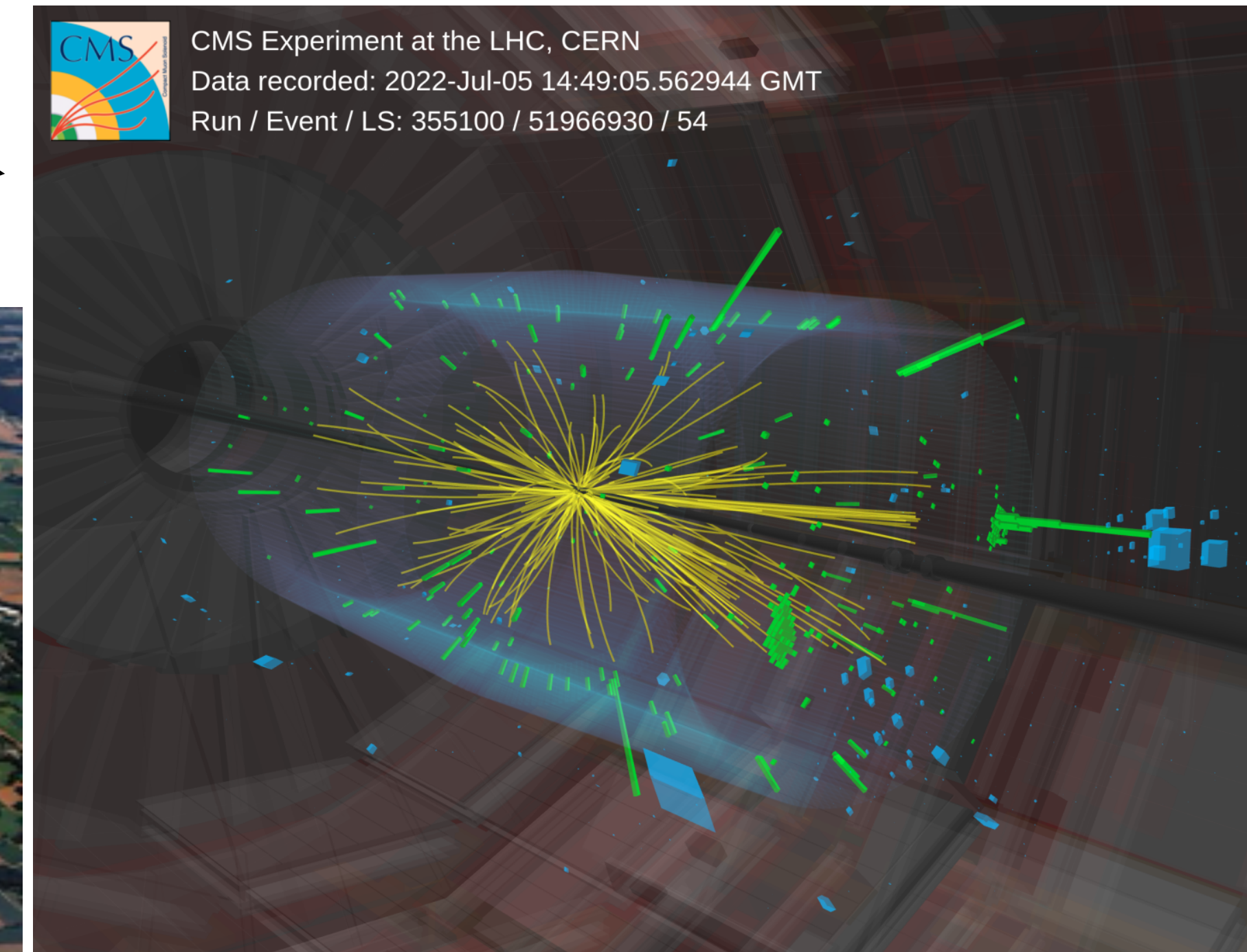
Comment collisionner ?

Collision: energie des protons
élevée → création de particules...

$$E=mc^2$$



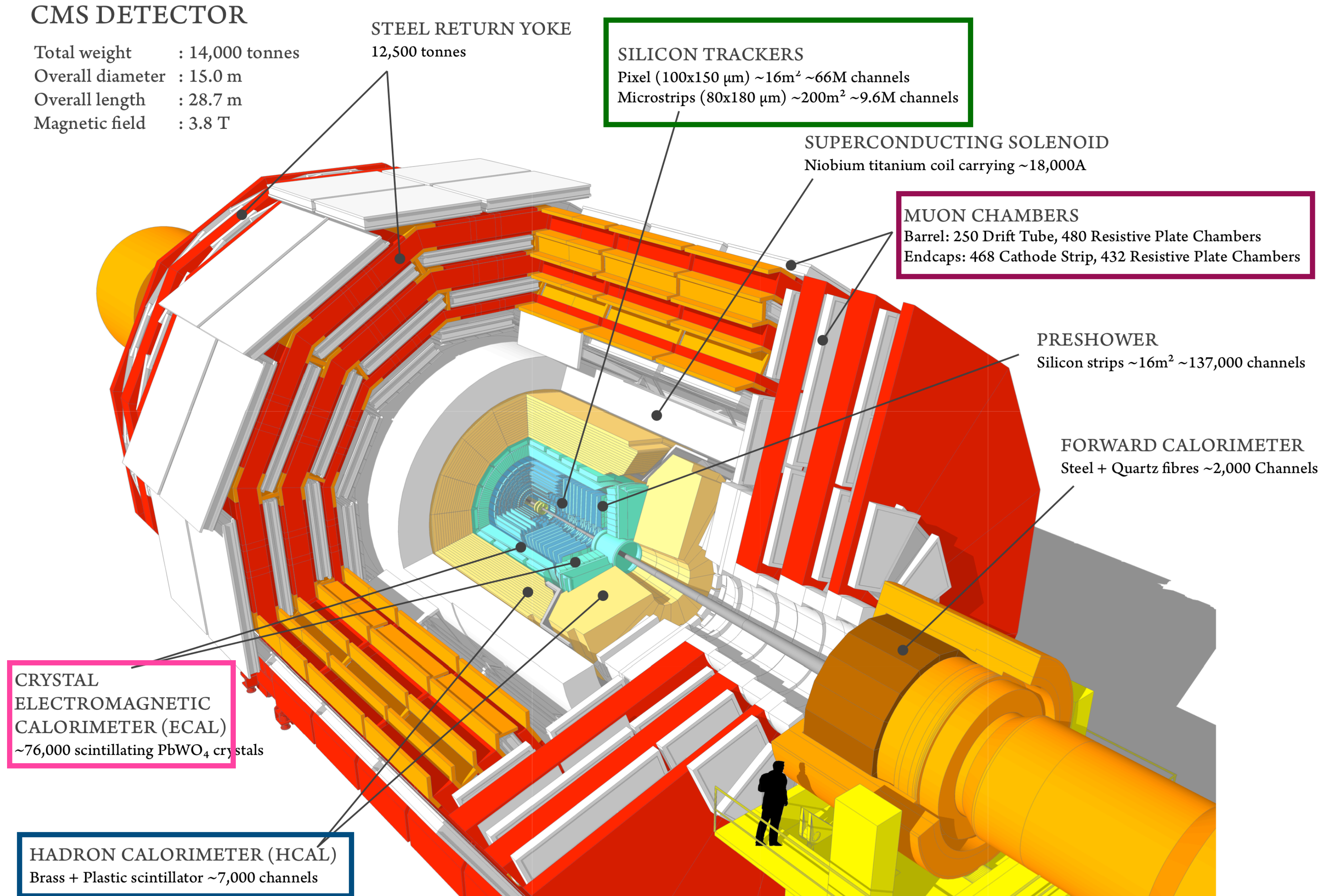
... qui se désintègrent après



Produits des collisions mesurés
dans des détecteurs

Comment détecter ? Exemple: CMS

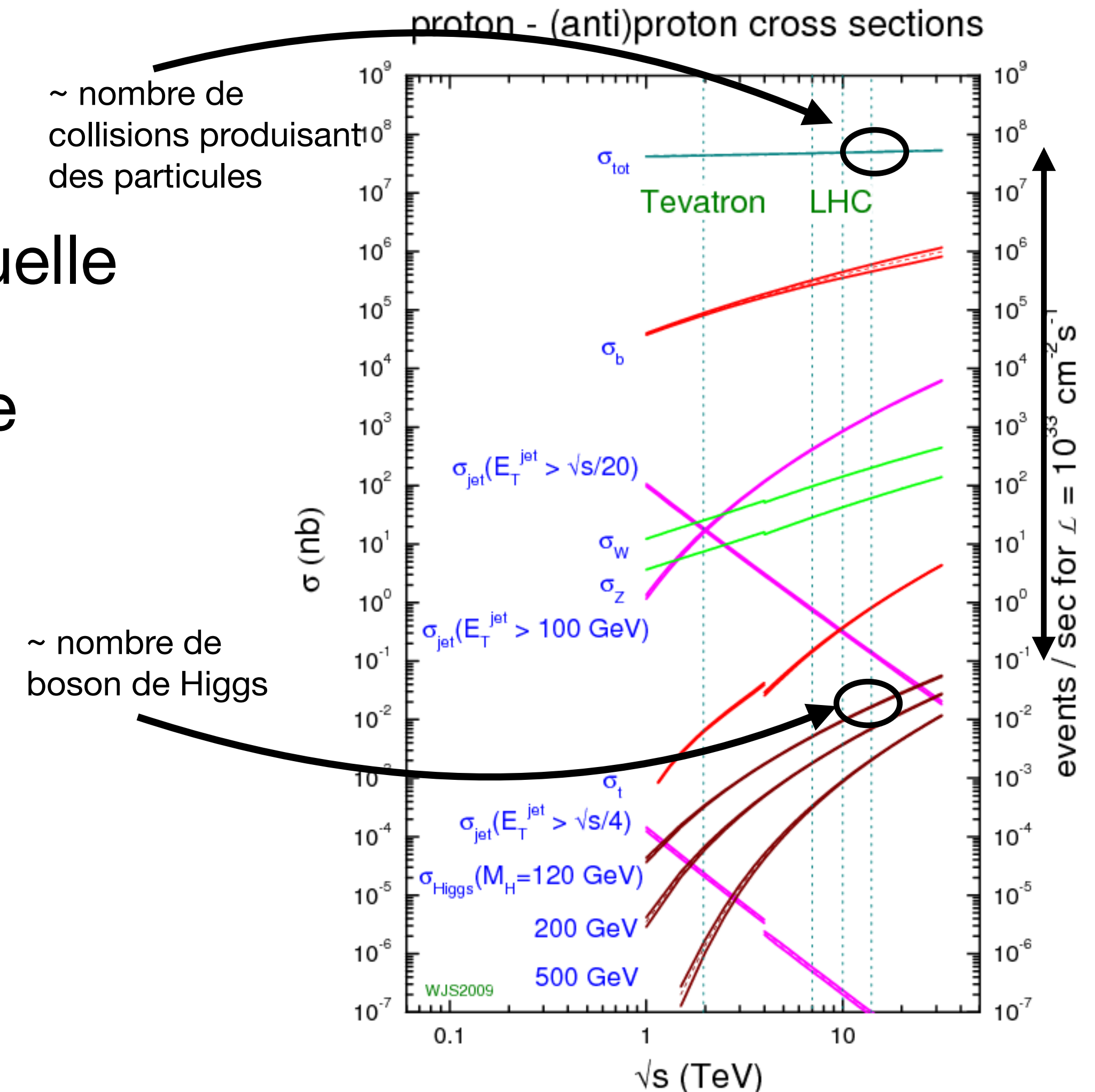
- 15m de haut, longueur près de 30m
- Différentes couches de détection:
 - Trajectographe (trajectoire/vitesse des particules)
 - Calorimètre électromagnétique et calorimètre hadronique (énergie)
 - Détecteurs à muons (~trajectographe pour muons)



Plusieurs milliers de scientifiques (également pour ATLAS)

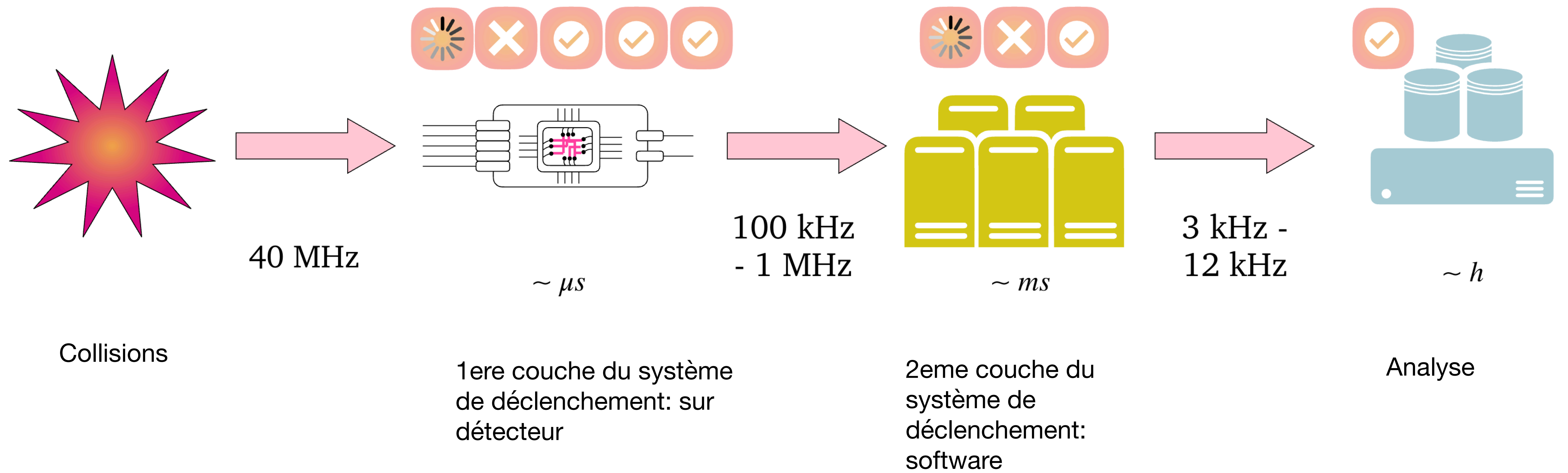
Enregistrer

- Des centaines de millions de collisions par seconde (taux de croisement * nombre de collisions simultanés)
- Toutes ne nous intéressent pas
- Exemple: nombre de collisions dans laquelle un boson de Higgs est produit 9 ordres de grandeur plus faible que le nombre de collisions produisant une particule
- → On n'enregistre pas tout: système de déclenchement



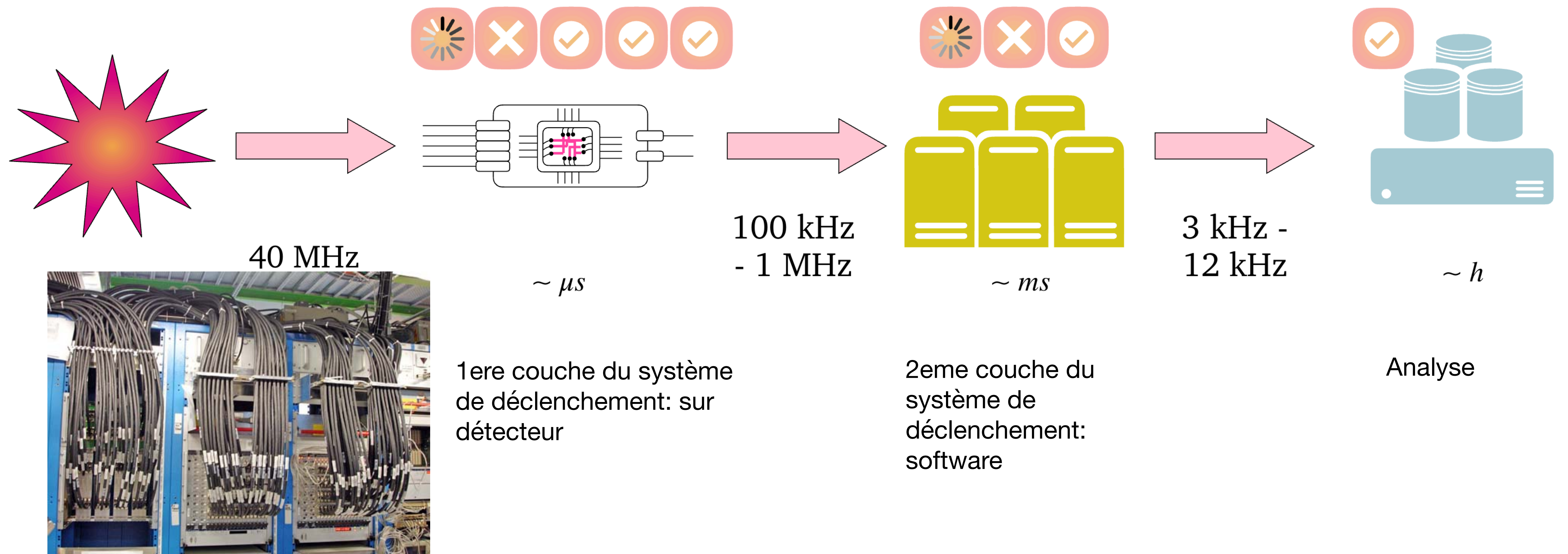
Enregistrer

- Des centaines de millions de collisions par seconde (taux de croisement * nombre de collisions simultanés)



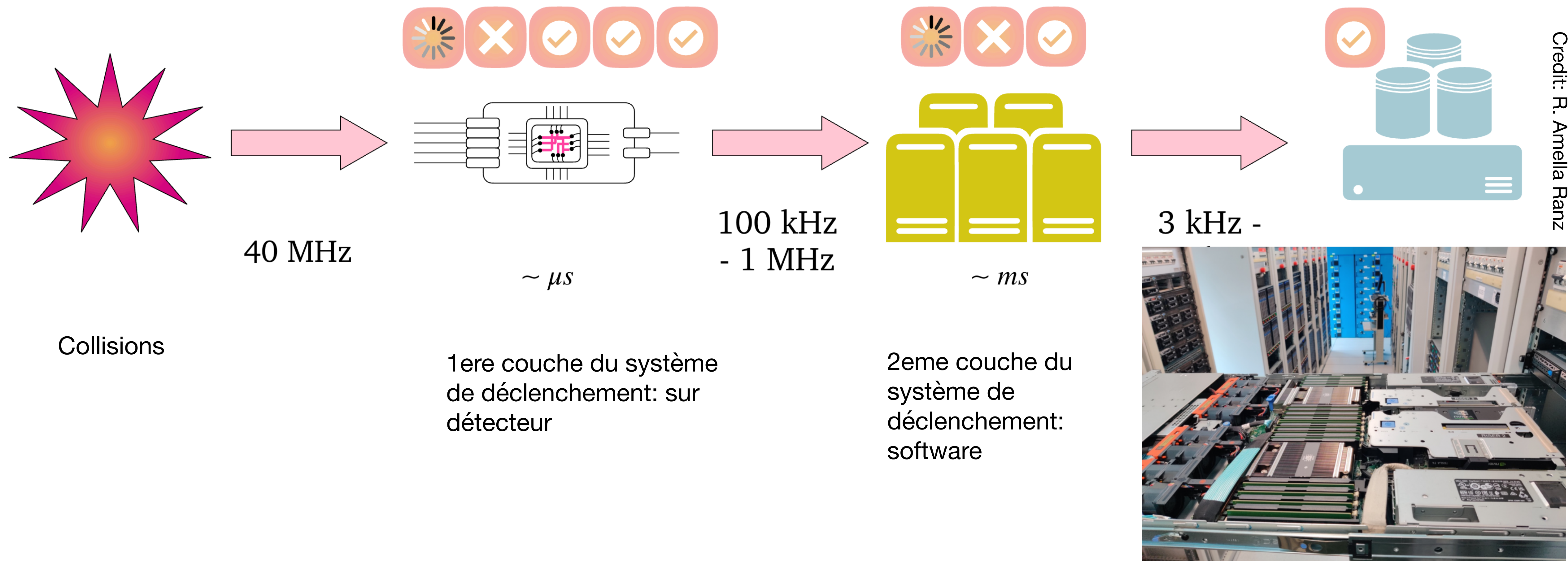
Enregistrer

- Des centaines de millions de collisions par seconde (taux de croisement * nombre de collisions simultanés)



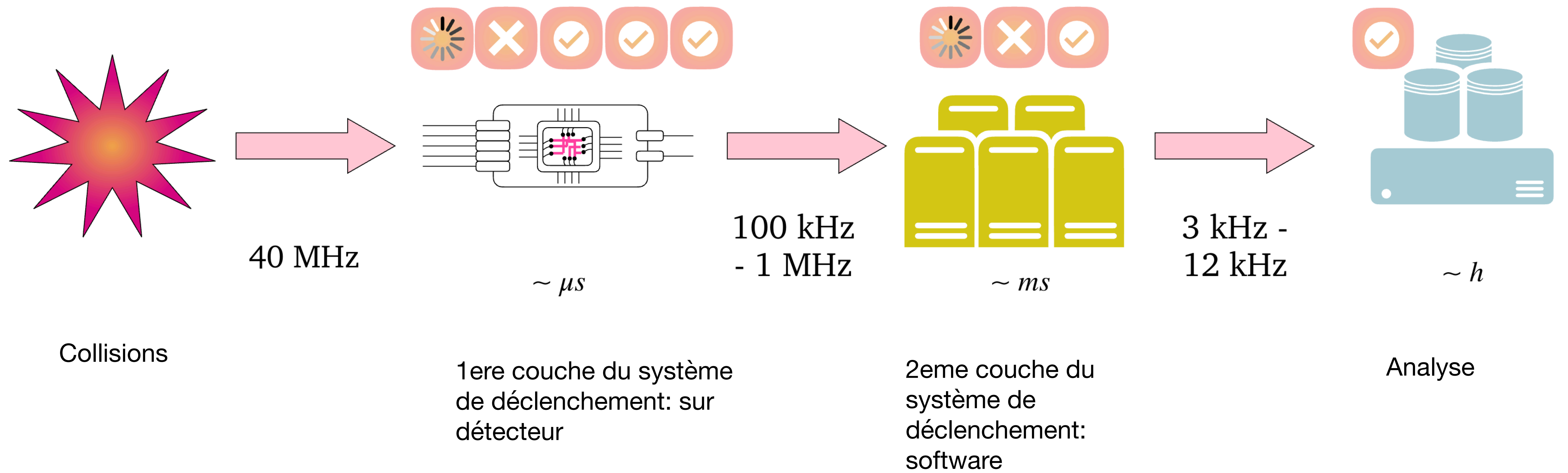
Enregistrer

- Des centaines de millions de collisions par seconde (taux de croisement * nombre de collisions simultanés)

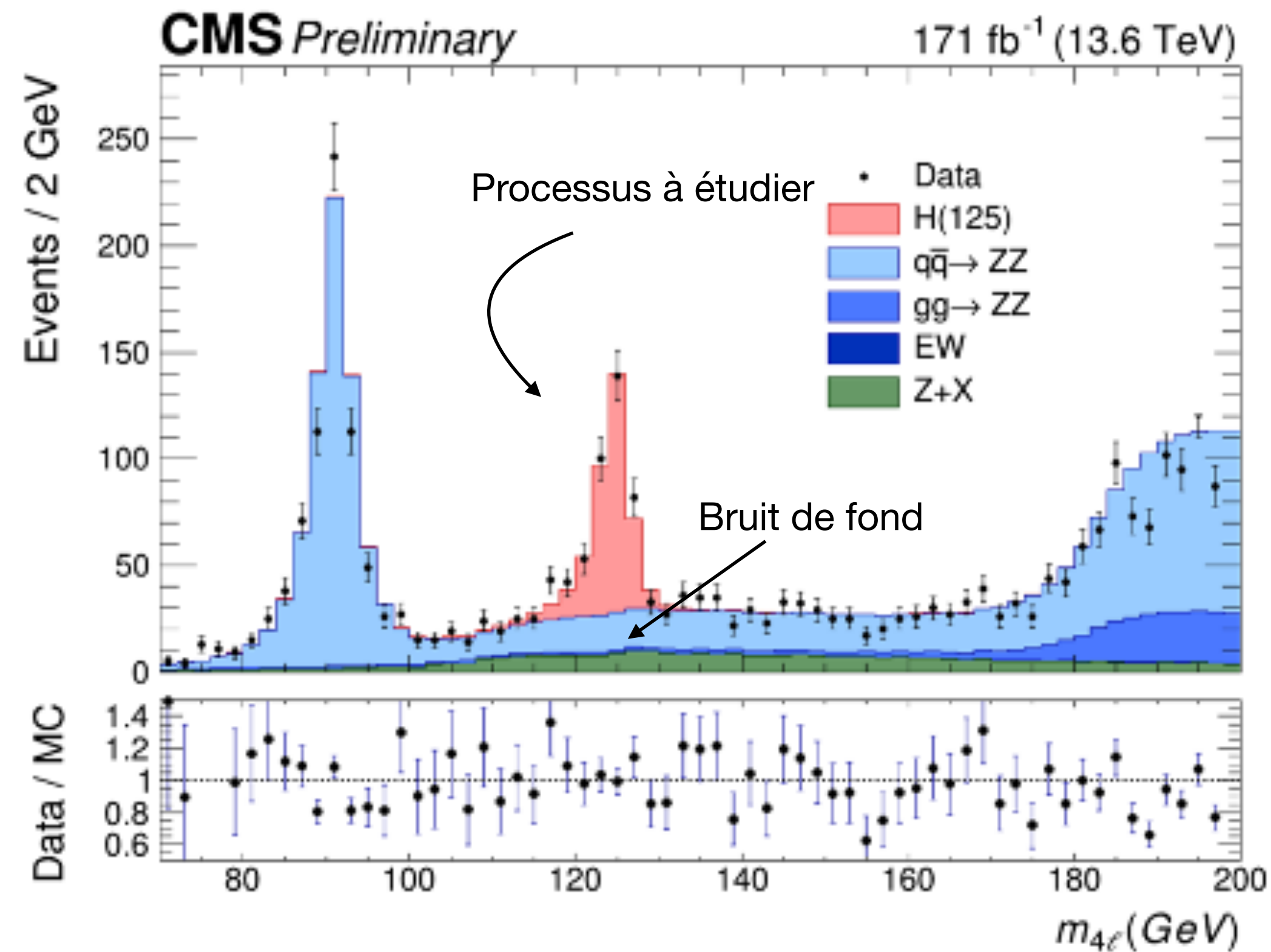


Enregistrer

- Des centaines de millions de collisions par seconde (taux de croisement * nombre de collisions simultanés)



Analyser



- Processus peu fréquents
- Particules créées se désintègrent → suivre cascade de désintégrations pour étudier la particule
- Certaines particules ne sont pas détectées
- Sélection des événements pour éliminer bruit de fond

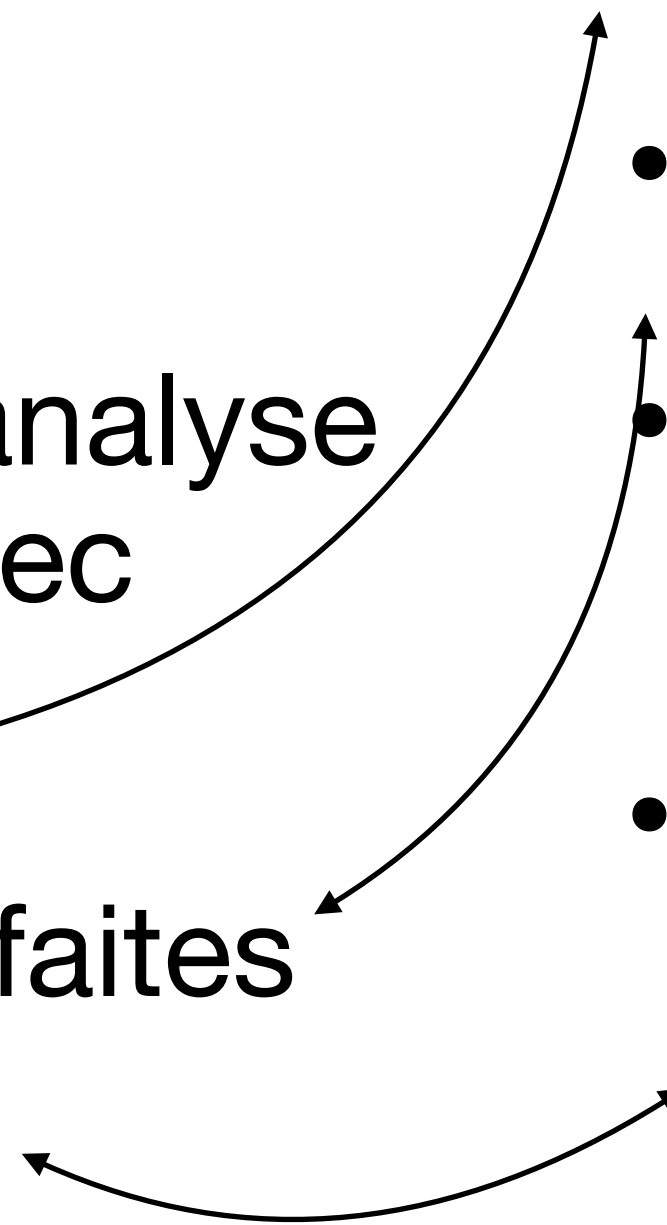
Interpréter

Expérimentateur

- Récolte des données
- Expertise du détecteur
- Analyse des données (incl analyse statistique, comparaison avec prévisions)
- Interpretation des mesures faites (modèles,...)

Théoricien

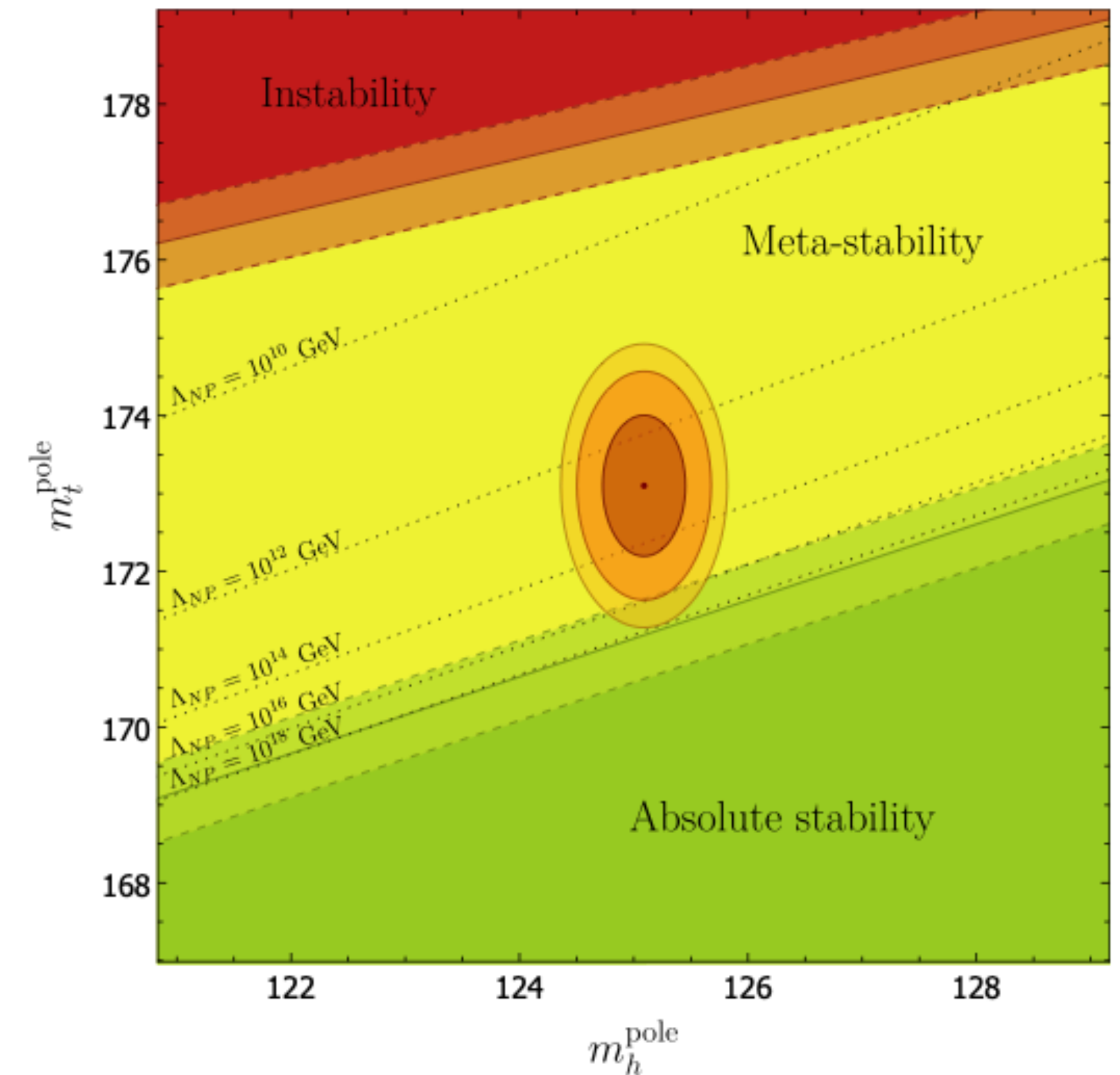
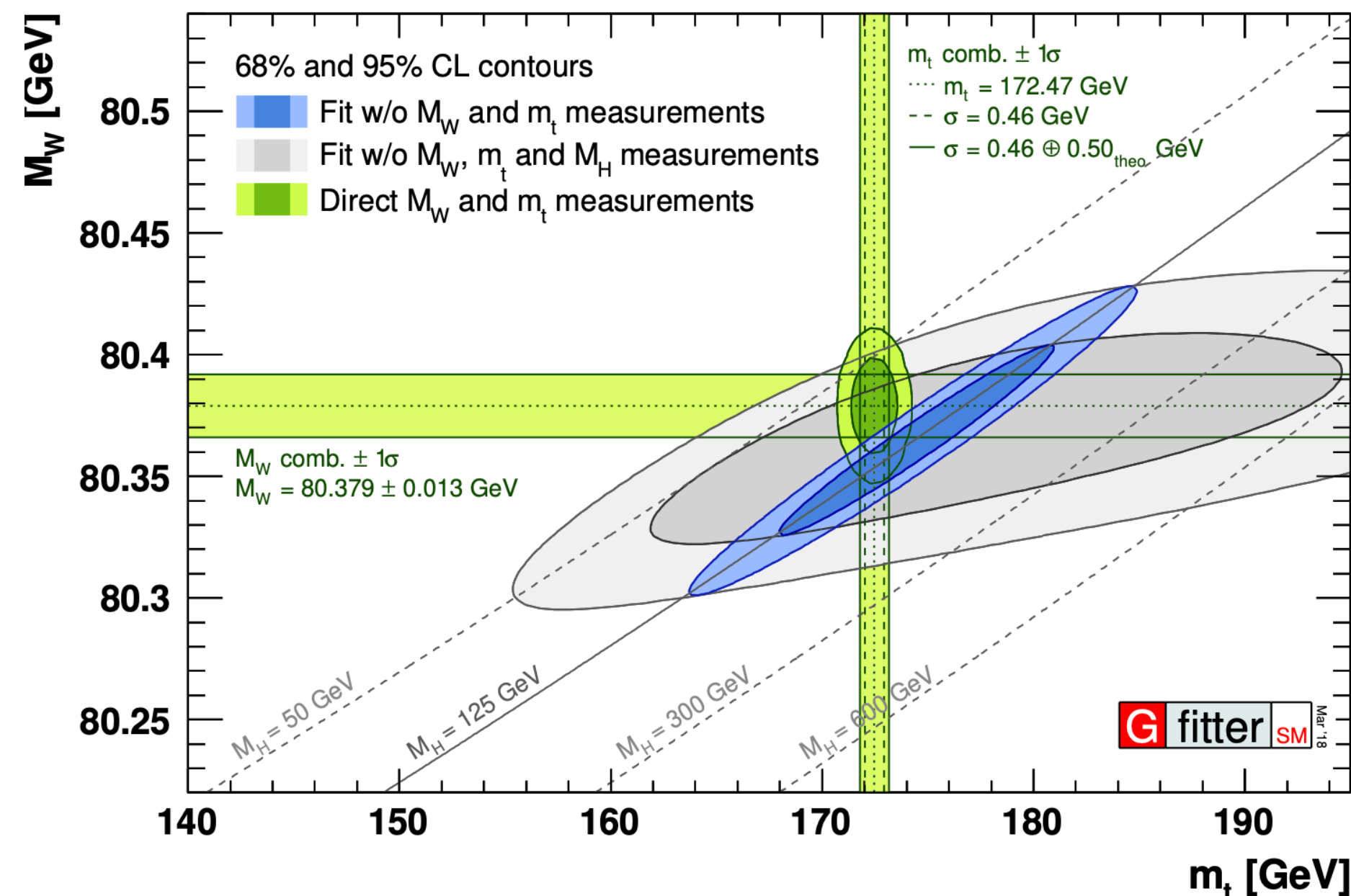
- Calcul des prévisions (très complexe)
- Proposer de nouveaux modèles
- Parfois aussi de nouvelles idées d'analyses
- Prise en main des résultats expérimentales pour affiner modèles, prévisions,...



Le modèle standard en test

Boson de Higgs, bosons vecteur, quarks massifs

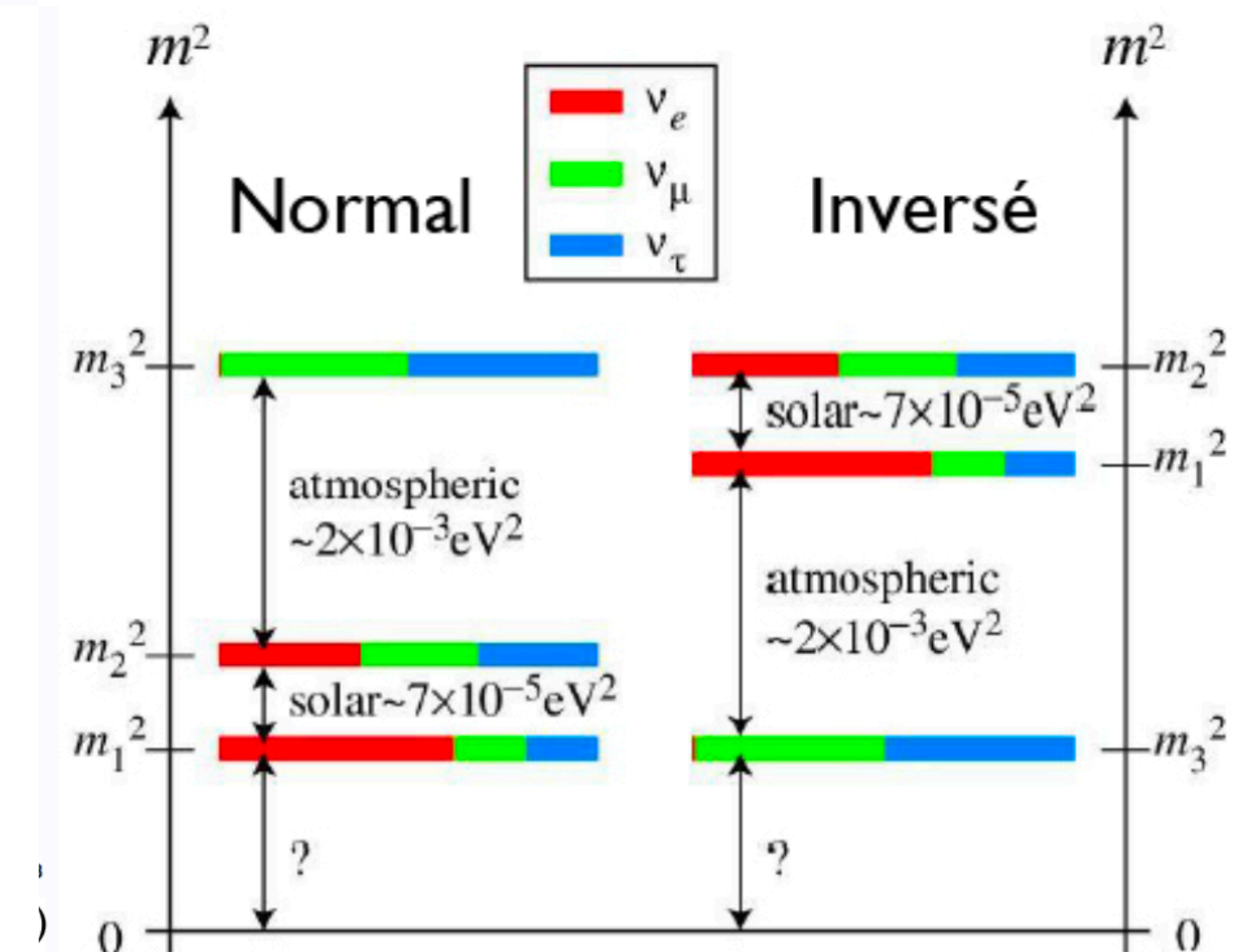
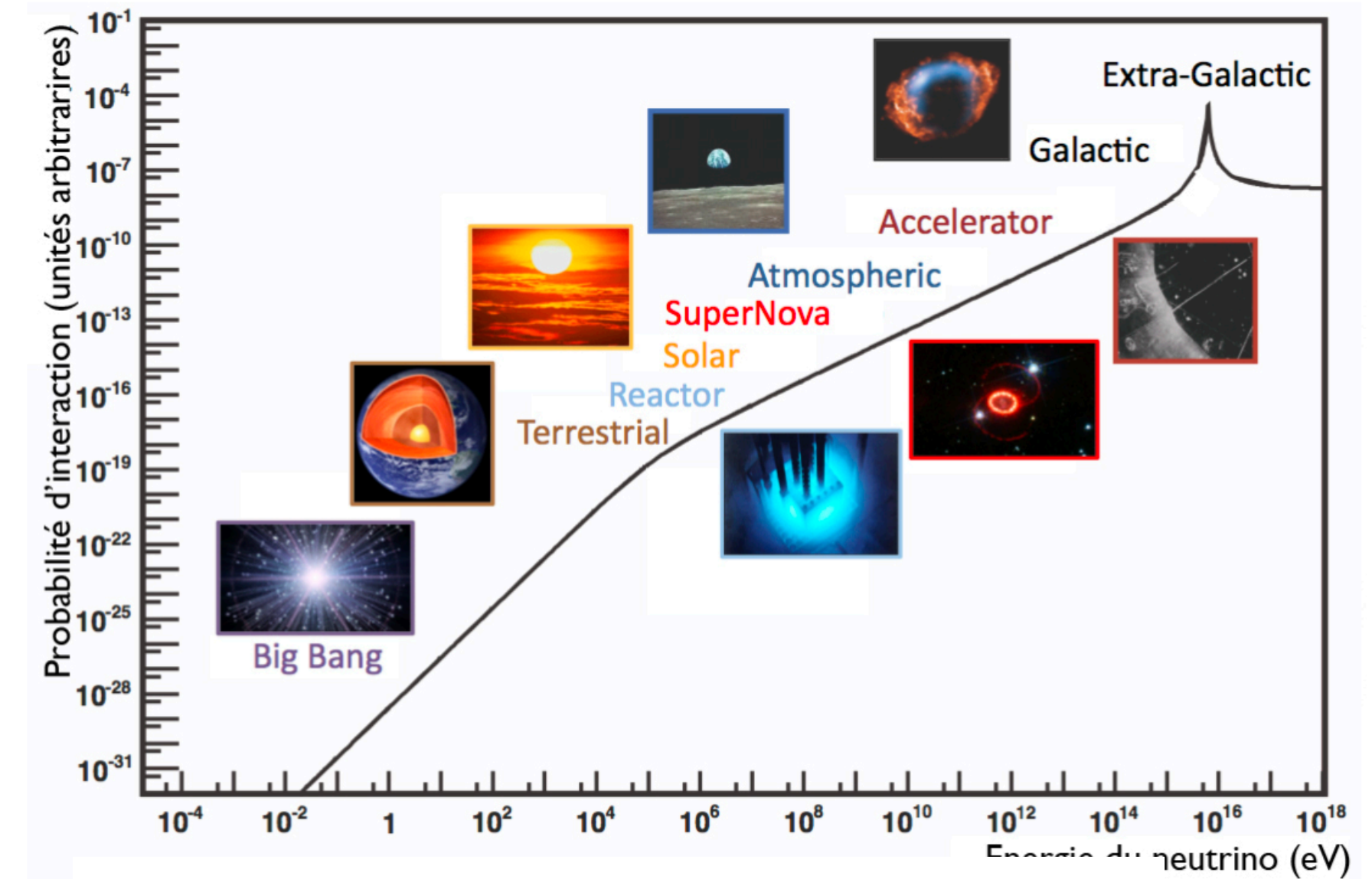
- Stabilité de notre vide $\leftrightarrow$ potentiel du champ de Higgs, masse du Higgs, masse du quark top
- Paramètres du modèle standard



Le modèle standard en test

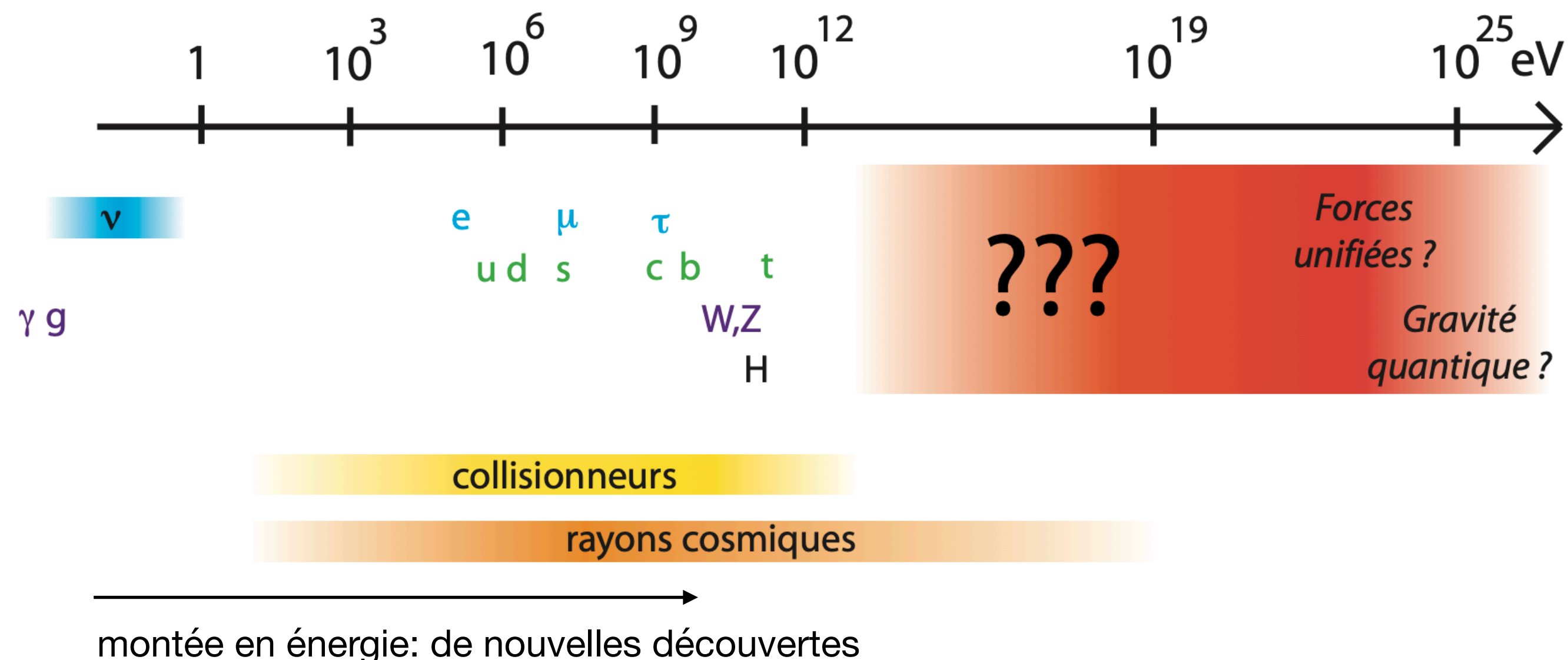
Neutrinos

- Neutrinos venant de supernovae, Soleil, rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère, réacteurs nucléaires, accélérateurs
- Des questions:
 - Masse des neutrinos ?
 - Sont-ils leurs propres antiparticules?
 - Asymétrie entre particule et antiparticule?
 - Plus de 3 neutrinos?
- De nombreuses expériences en cours pour y répondre



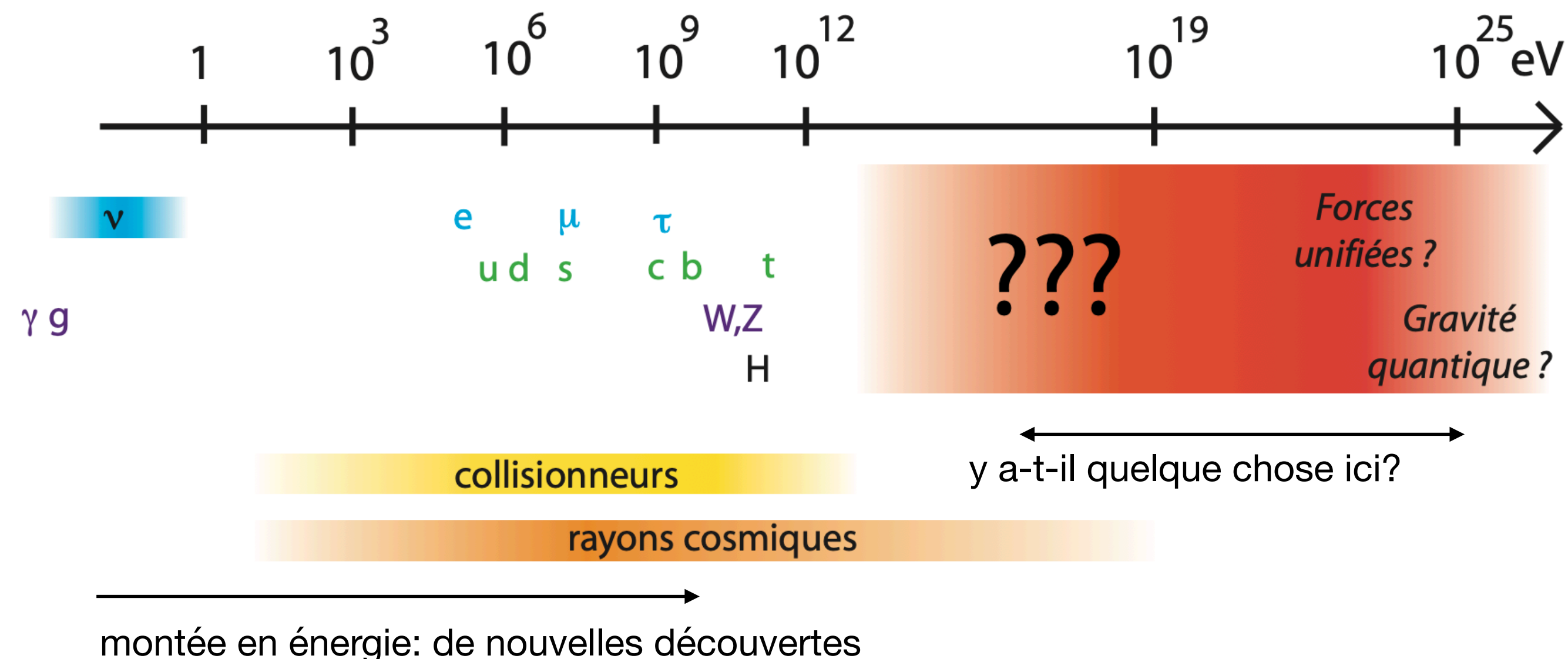
Les limites du Modèle Standard

- Le Modèle Standard reproduit très bien l'expérience, mais pas parfaitement satisfaisant
- Nombreux paramètres (19 !) fixés à des valeurs arbitraires
- Pourquoi trois familles avec la même structure d'interactions ?
- Pourquoi trois interactions très différentes ? Qu'en est de la gravitation ?



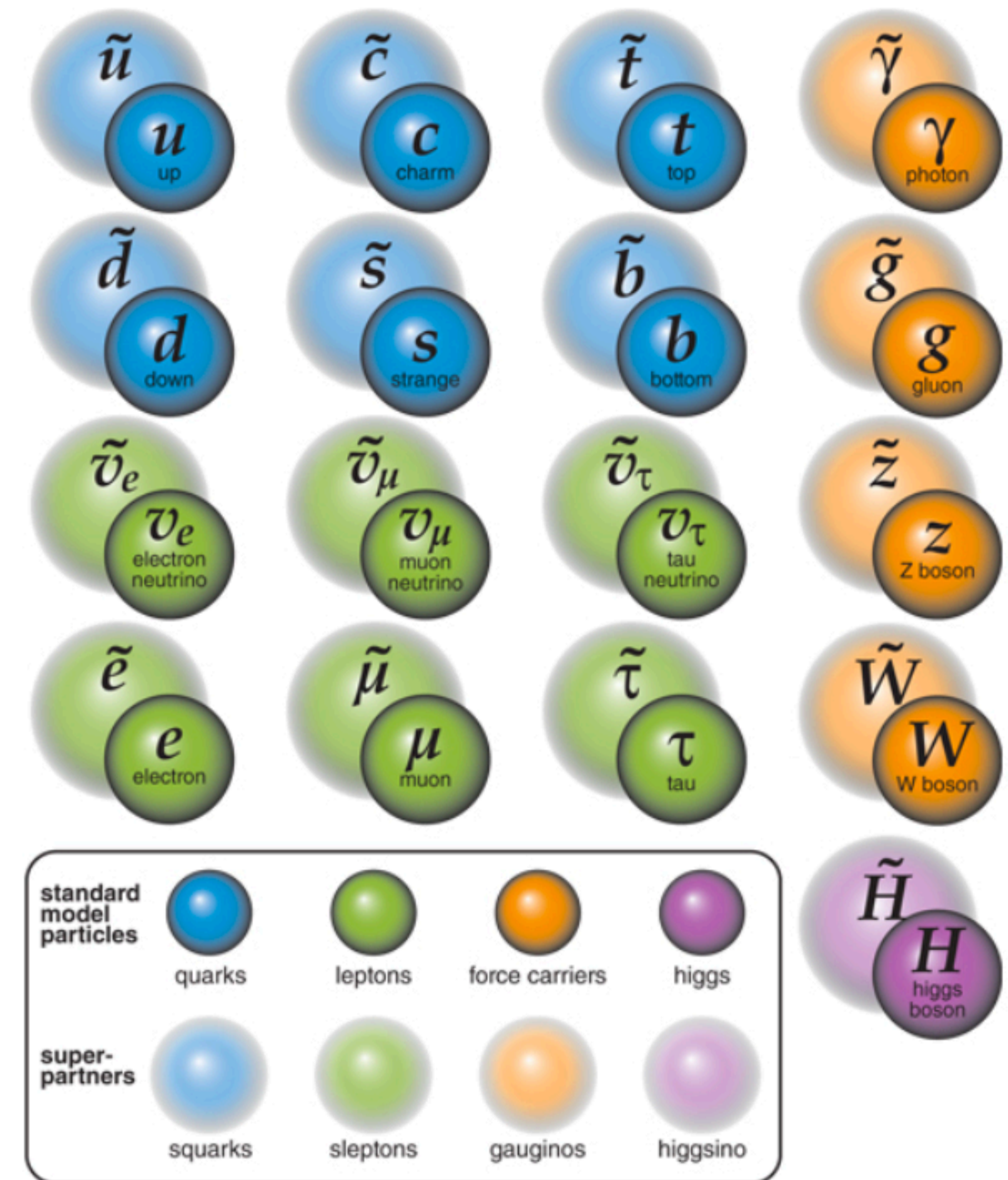
Les limites du Modèle Standard

- Le Modèle Standard reproduit très bien l'expérience, mais pas parfaitement satisfaisant
- Nombreux paramètres (19 !) fixés à des valeurs arbitraires
- Pourquoi trois familles avec la même structure d'interactions ?
- Pourquoi trois interactions très différentes ? Qu'en est de la gravitation ?



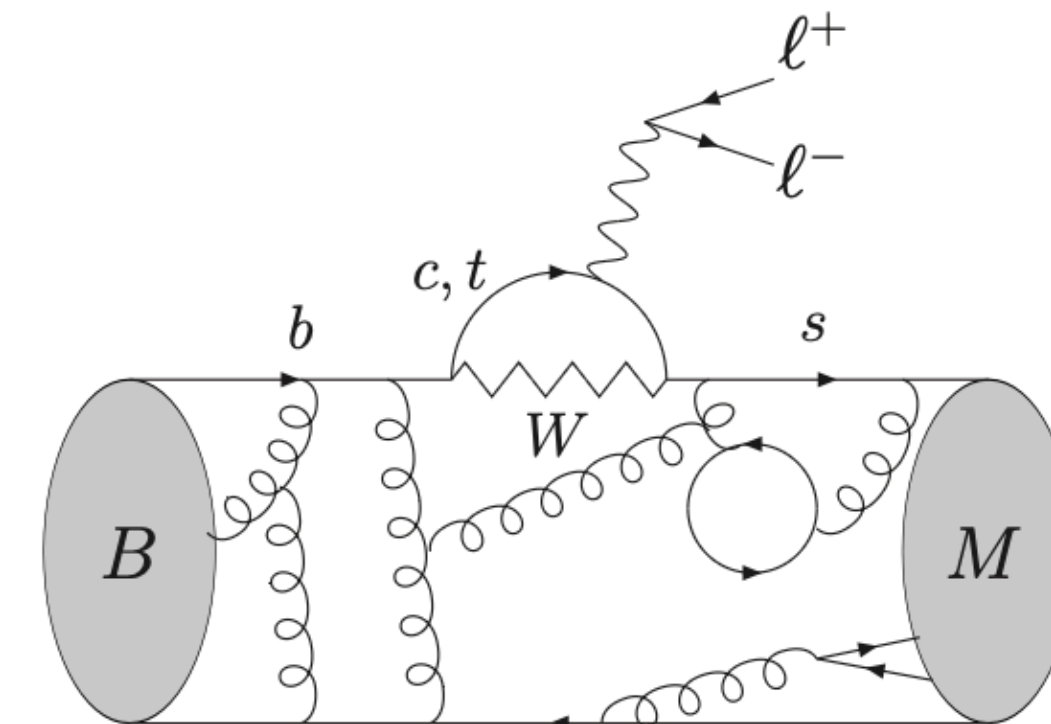
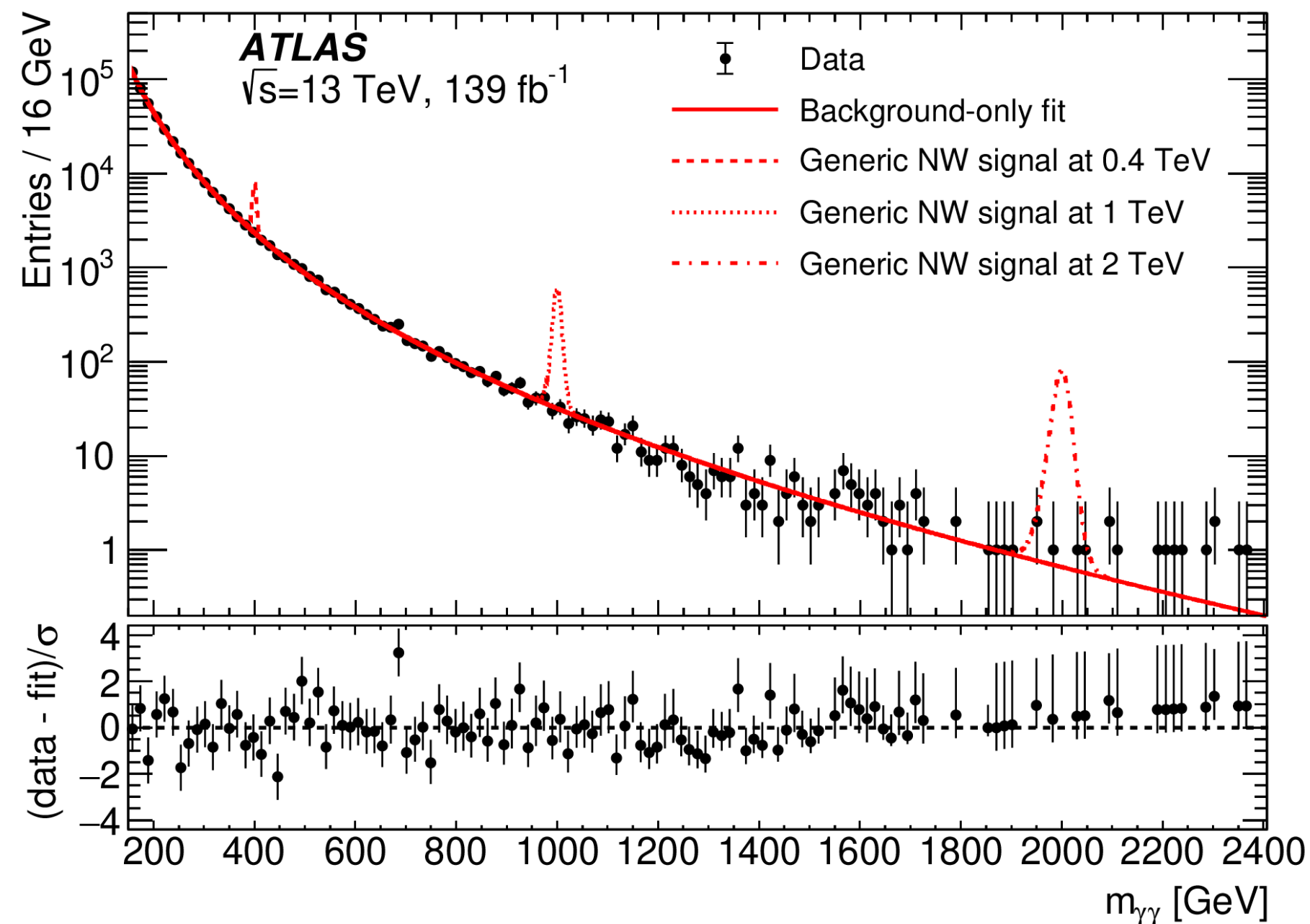
Au-delà du Modèle Standard

- De nouvelles symétries (limiter le nombre de paramètres ?)
- De nouvelles interactions (cadre plus cohérent ?)
- De nouvelles dimensions (accommoder la gravitation ?)
- Exemple: supersymétrie (partenaire lourd pour chaque particule)
- Pas d'indice jusque là: beaucoup d'alternatives sous étude

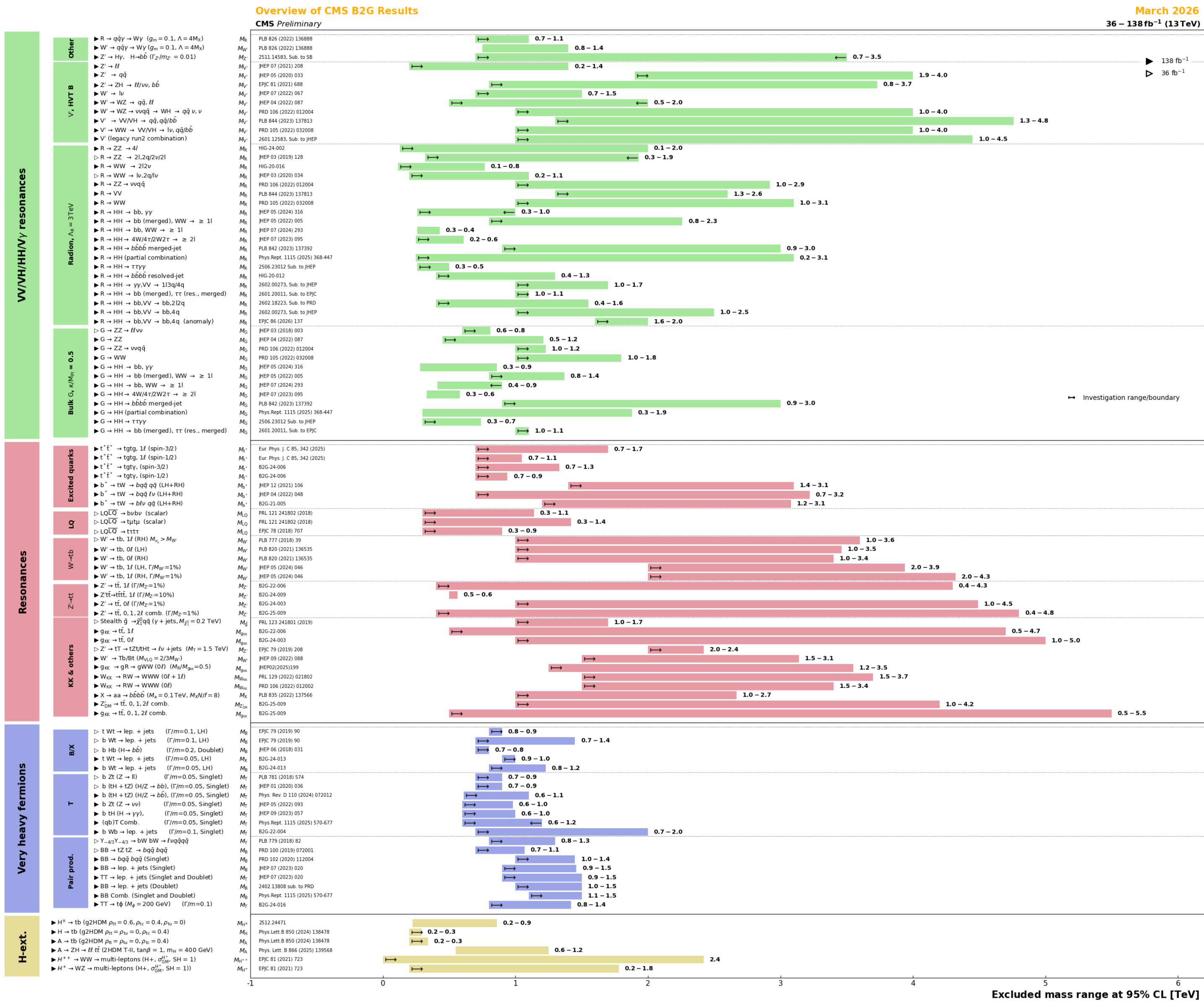


Deux voies vers la Nouvelle Physique

- Collisions avec assez d'énergie pour produire nouvelles particules
- Preuve "directe" (ATLAS/CMS)
- Petites deviations venant d'états intermédiaires avec des particules lourdes
- Preuve "indirecte" (LHCb, Belle-II, mais aussi ATLAS et CMS)



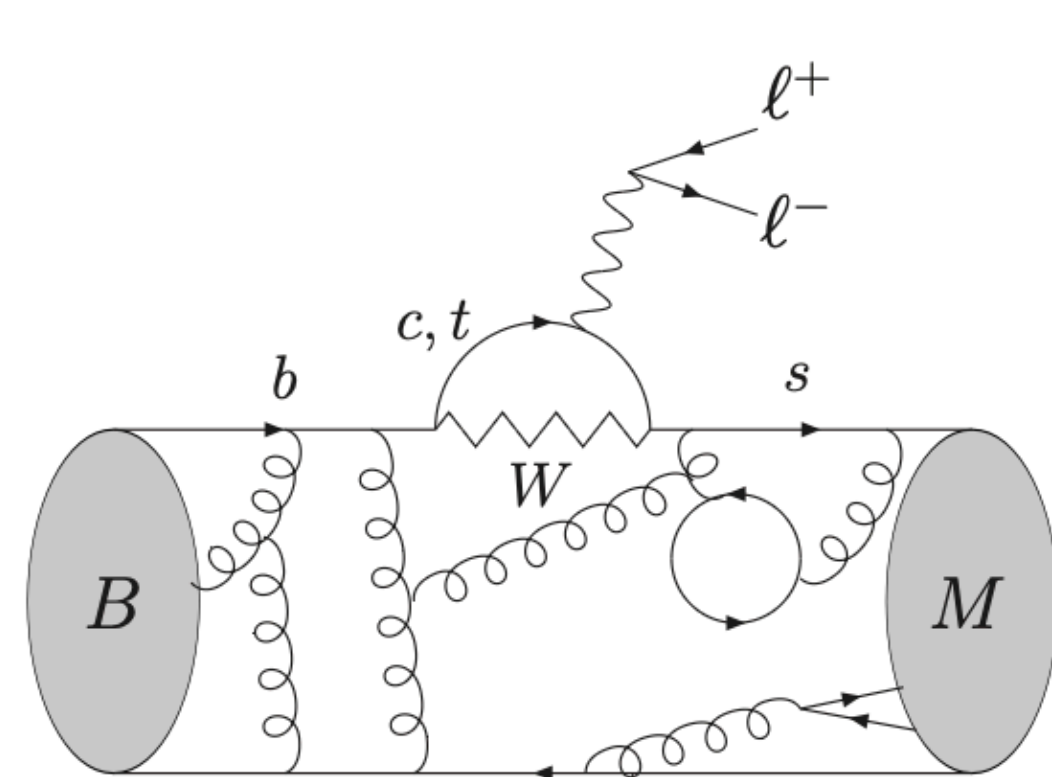
Recherche "directe" de nouvelles particules



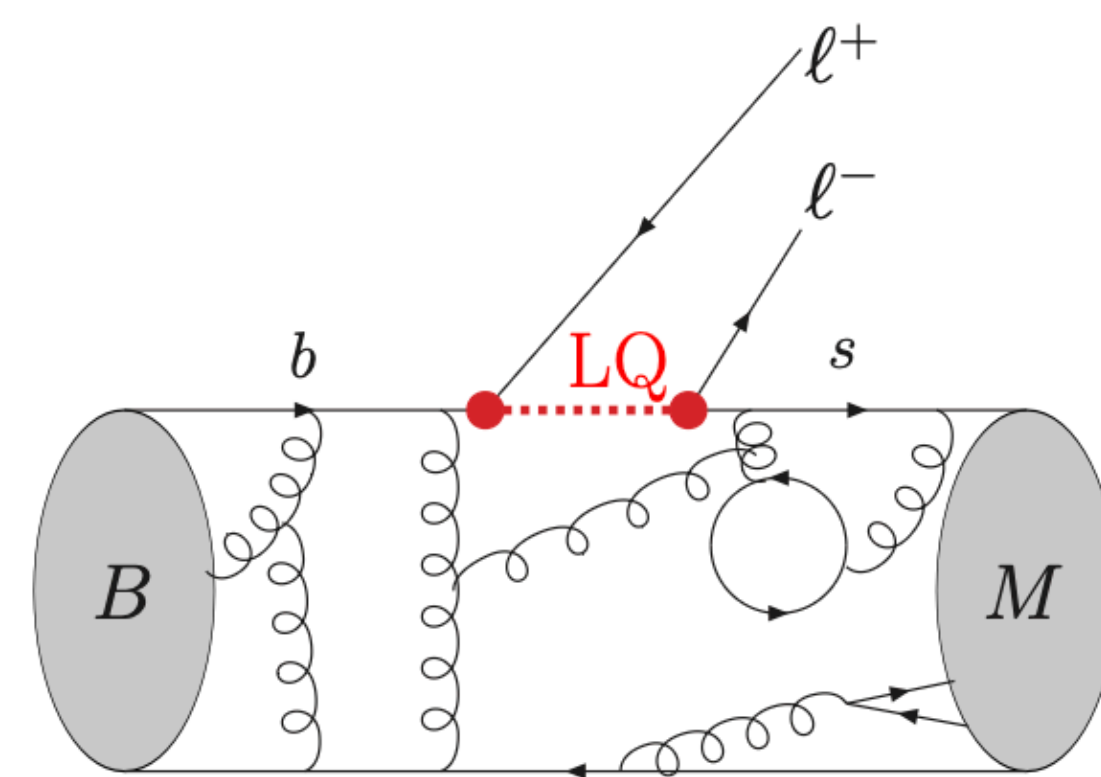
- Résumé d'une partie des recherches de nouvelles particules lourdes
- Des limites, mais pas d'observation
- Particule n'existe pas, est trop lourde pour être produite au LHC, ou peut être produite mais pas assez de données pour la voir
- HL-LHC dès ~2030 avec 10x plus de données que LHC

Recherche indirecte

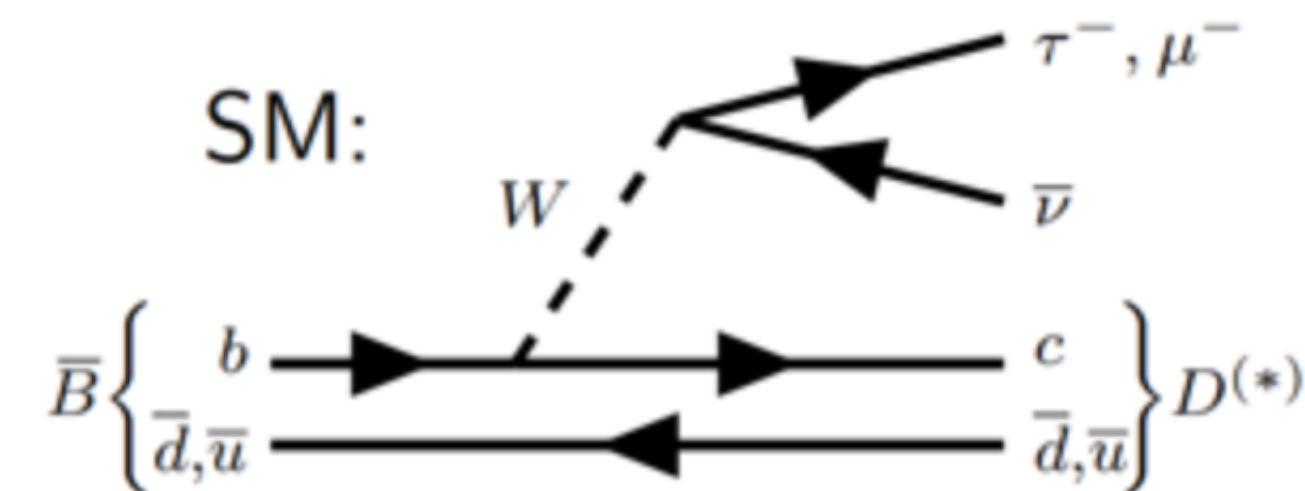
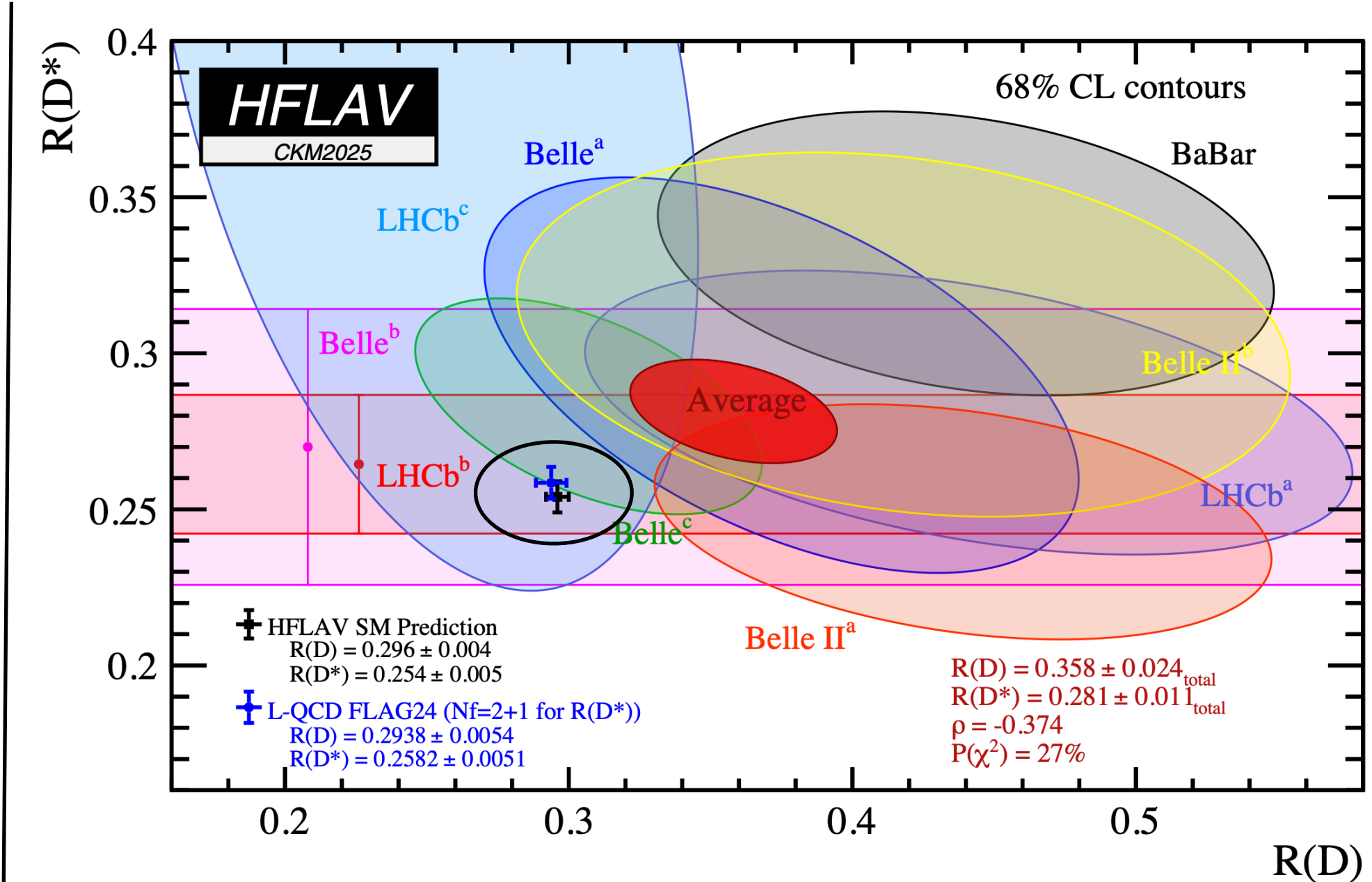
- Par exemple étude des désintégrations du quark b



Modèle Standard

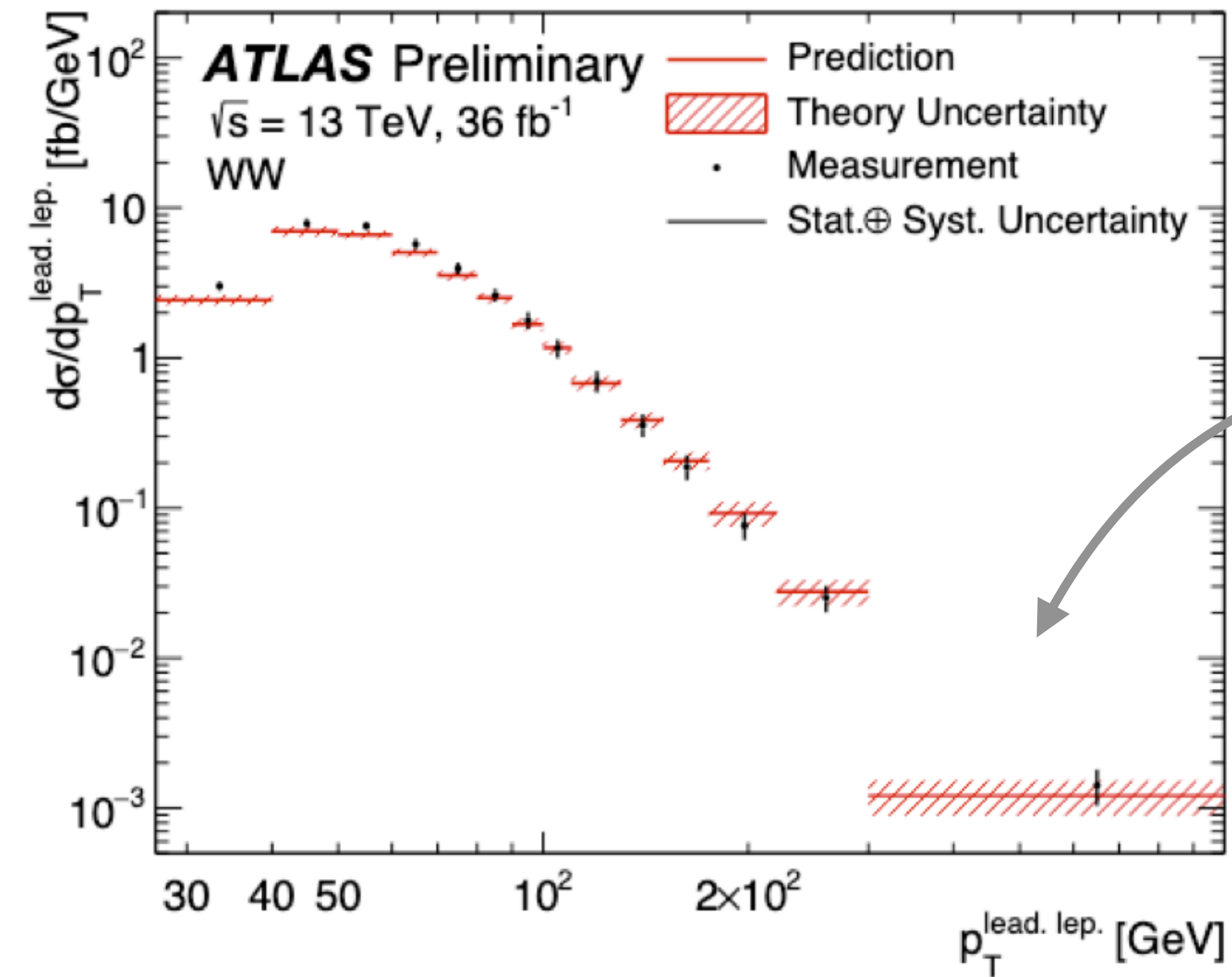
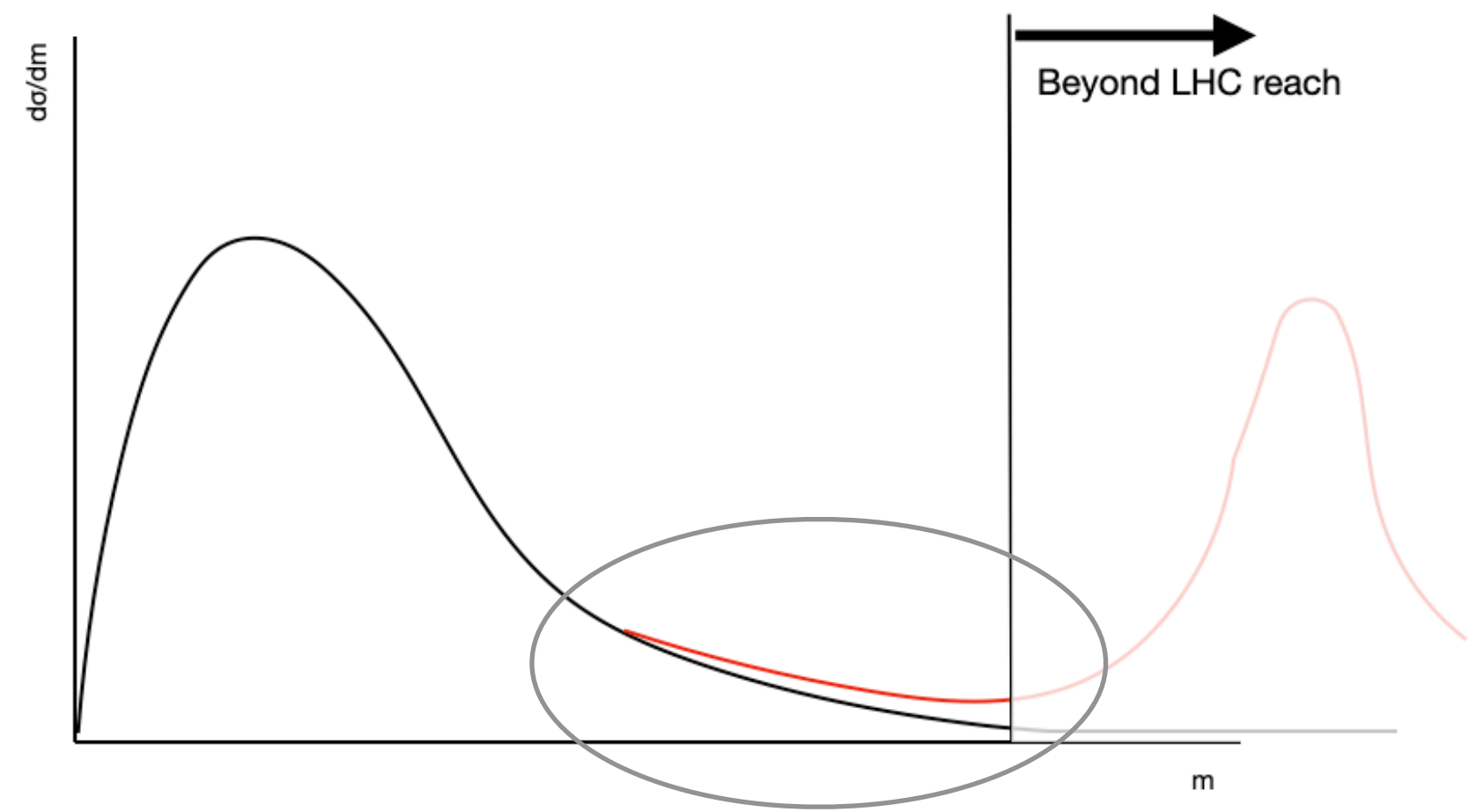


Contribution possible de nouvelle physique?



Recherche indirecte

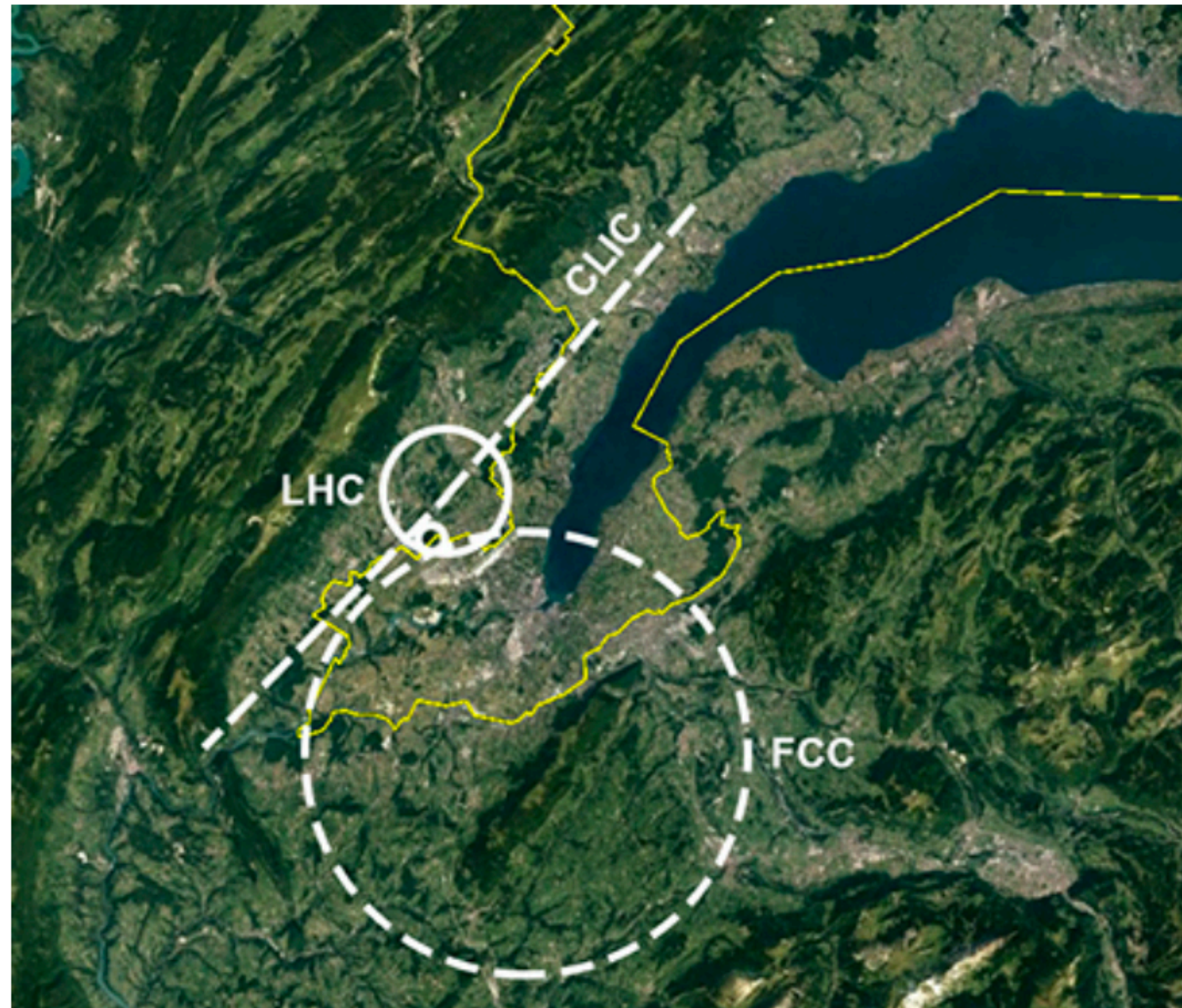
- Mais aussi des processus de haute énergie



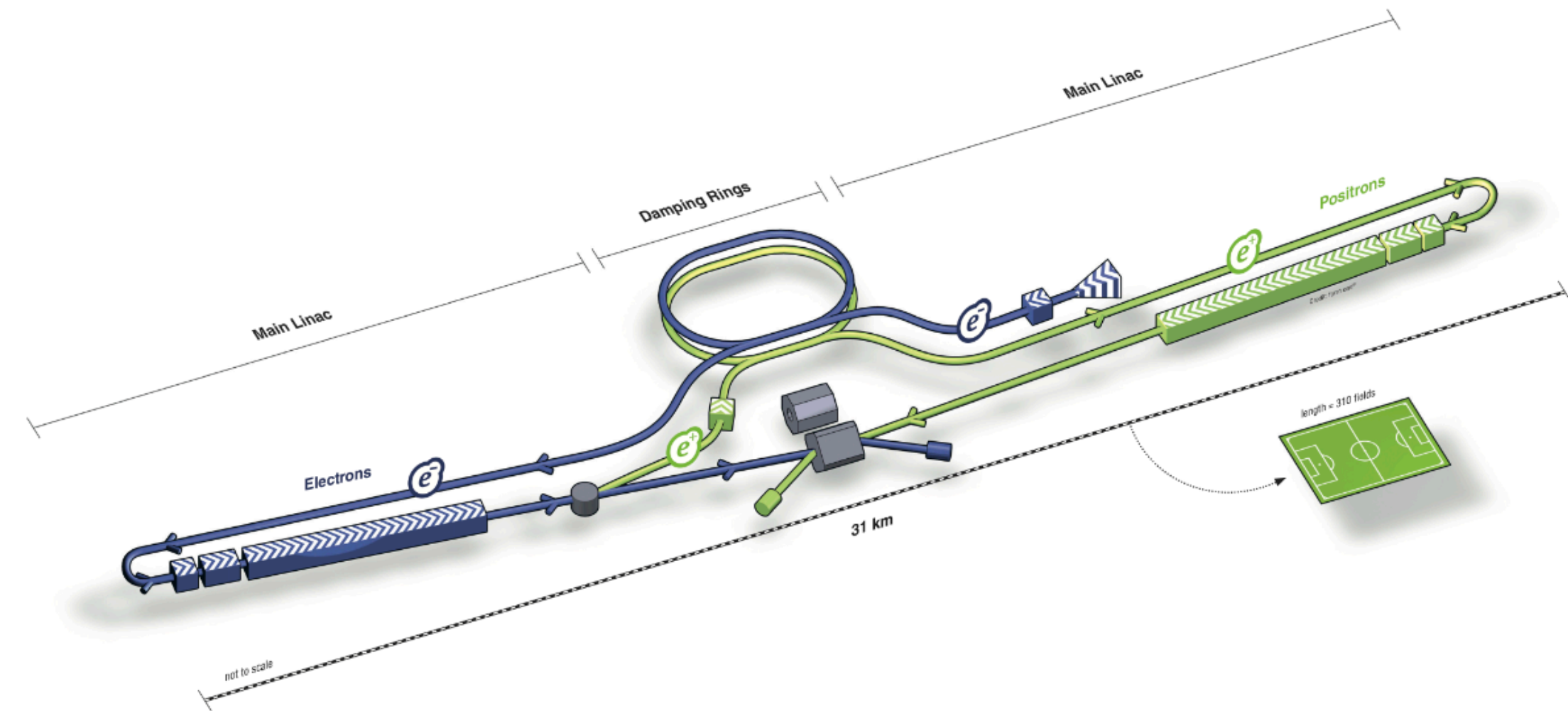
Expériences sur accélérateurs en cours et à venir

- En cours:
 - LHC (CERN): toutes les particules du modèle standard
 - Belle-II (Japon): quarks b et c
 - KOTO (Japon), NA62 (CERN): quark s
 - NOvA (USA), T2K (Japon): neutrinos
- Futur (approuvé en **gras**):
 - **HL-LHC (CERN): + d'évènements qu'au LHC**
 - **DUNE (USA): Neutrinos**
 - ILC (Japon): Usine à Z, H (linéaire)
 - FCC (CERN): Usine à Z, H (circulaire)

Le prochain accélérateur ?



FCC ~ 91km

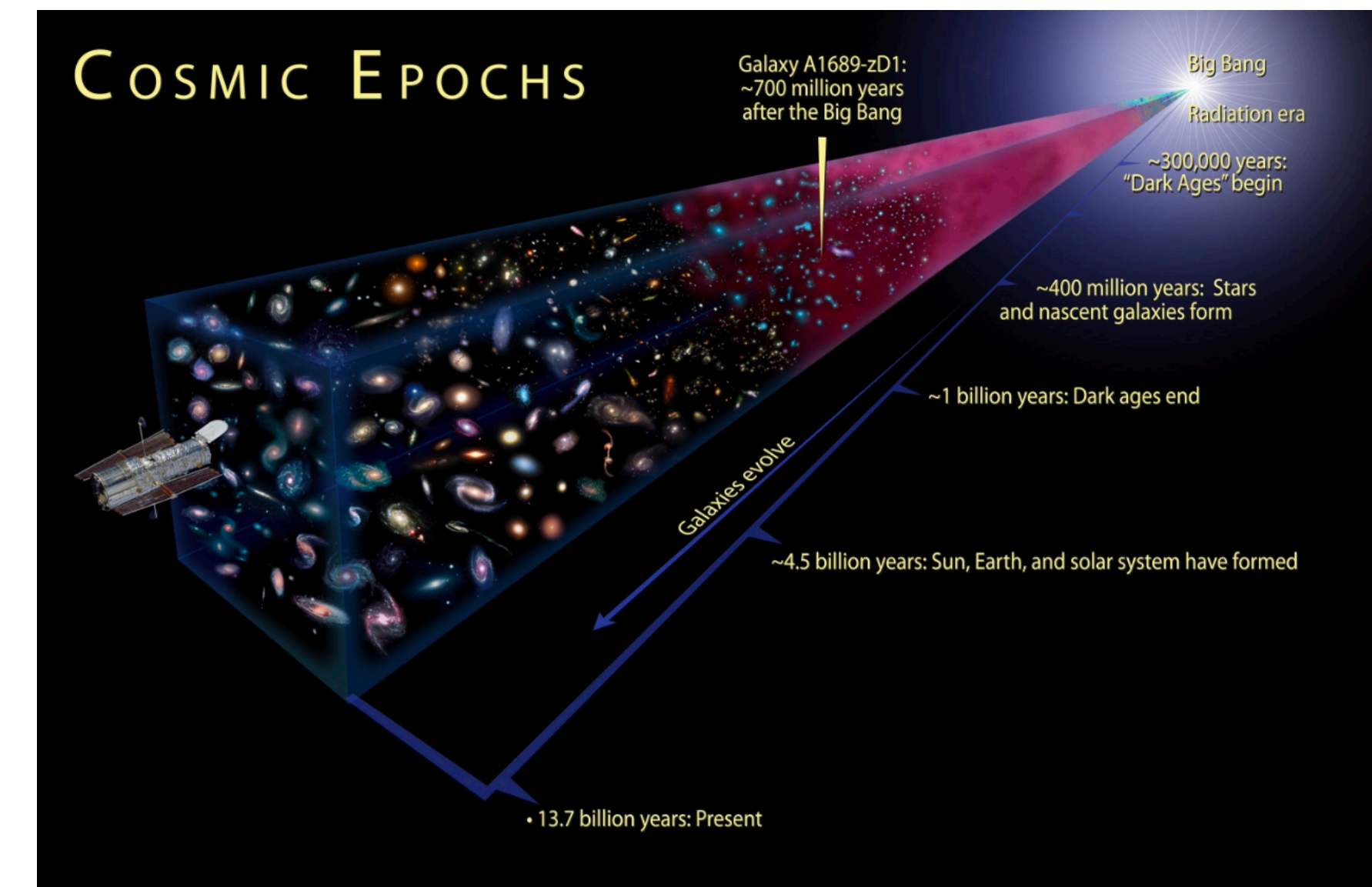


ILC - 30km

- Plusieurs options, p.ex e^+e^- , circulaire ou linéaire
- Production de grande quantités de particules du modèle standard (usine à particules)
- En cours de discussion
- ...ou autre chose?

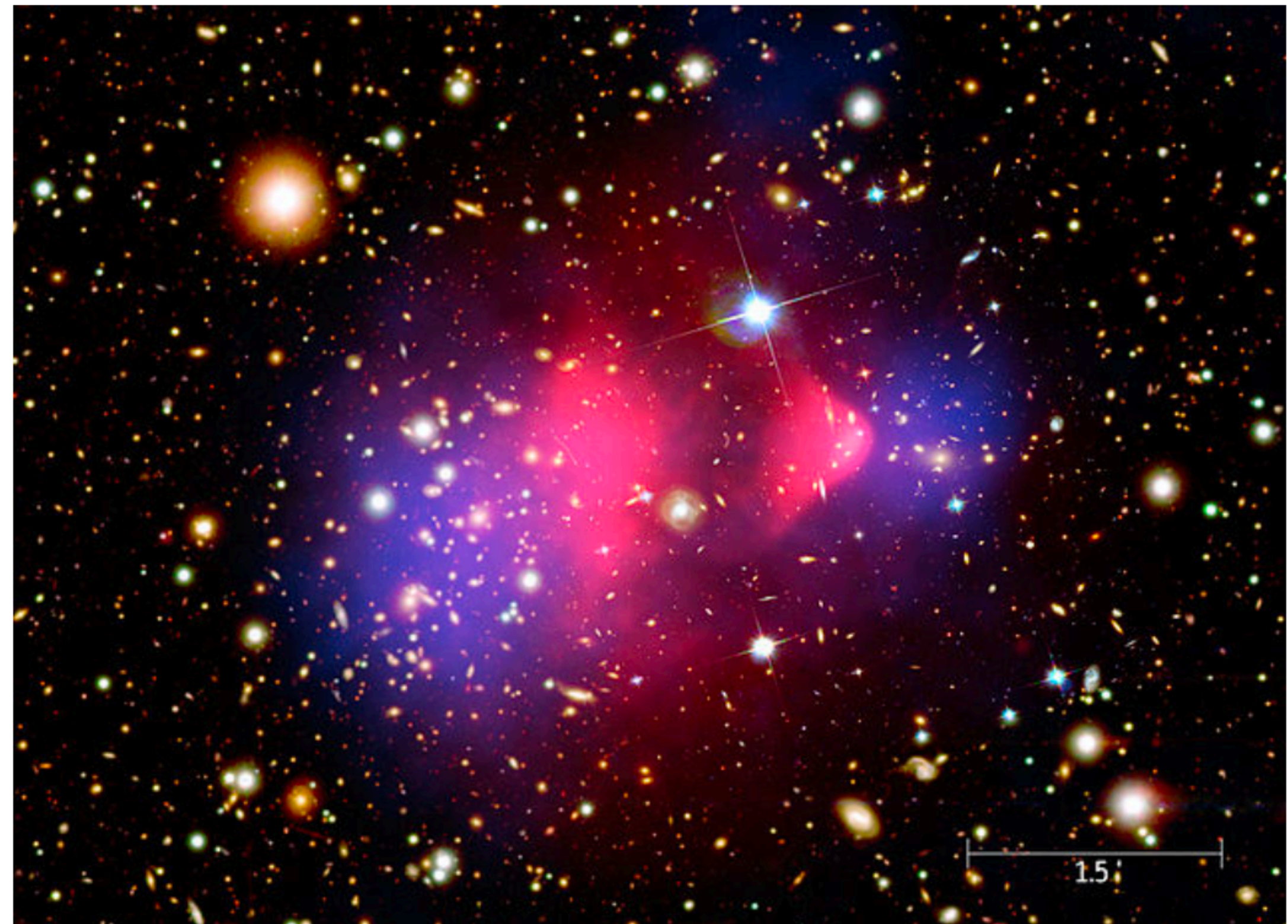
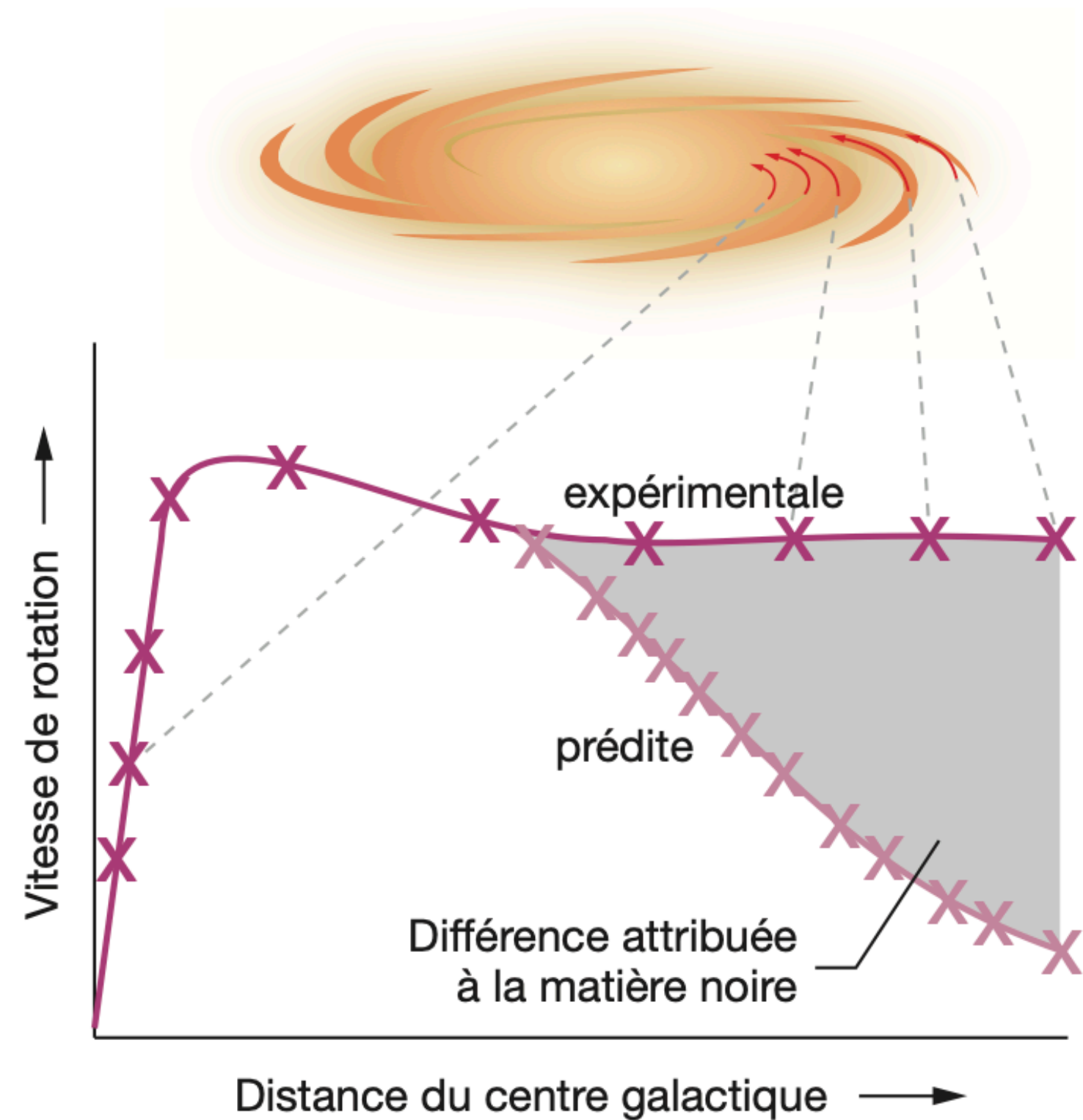
Au-delà des accélérateurs?

- Accélérateurs pour étudier de nouvelles particules lourdes
 - Production directe
 - Effets indirects dans des processus déjà connus
- D'autres voies vers les très hautes énergies:
 - Phénomènes astrophysiques (rayons cosmiques)
 - Histoire de l'univers (rayonnement de fond cosmologique)
 - Observation, pas d'expérience (on ne contrôle pas les conditions initiales)



La matière noire

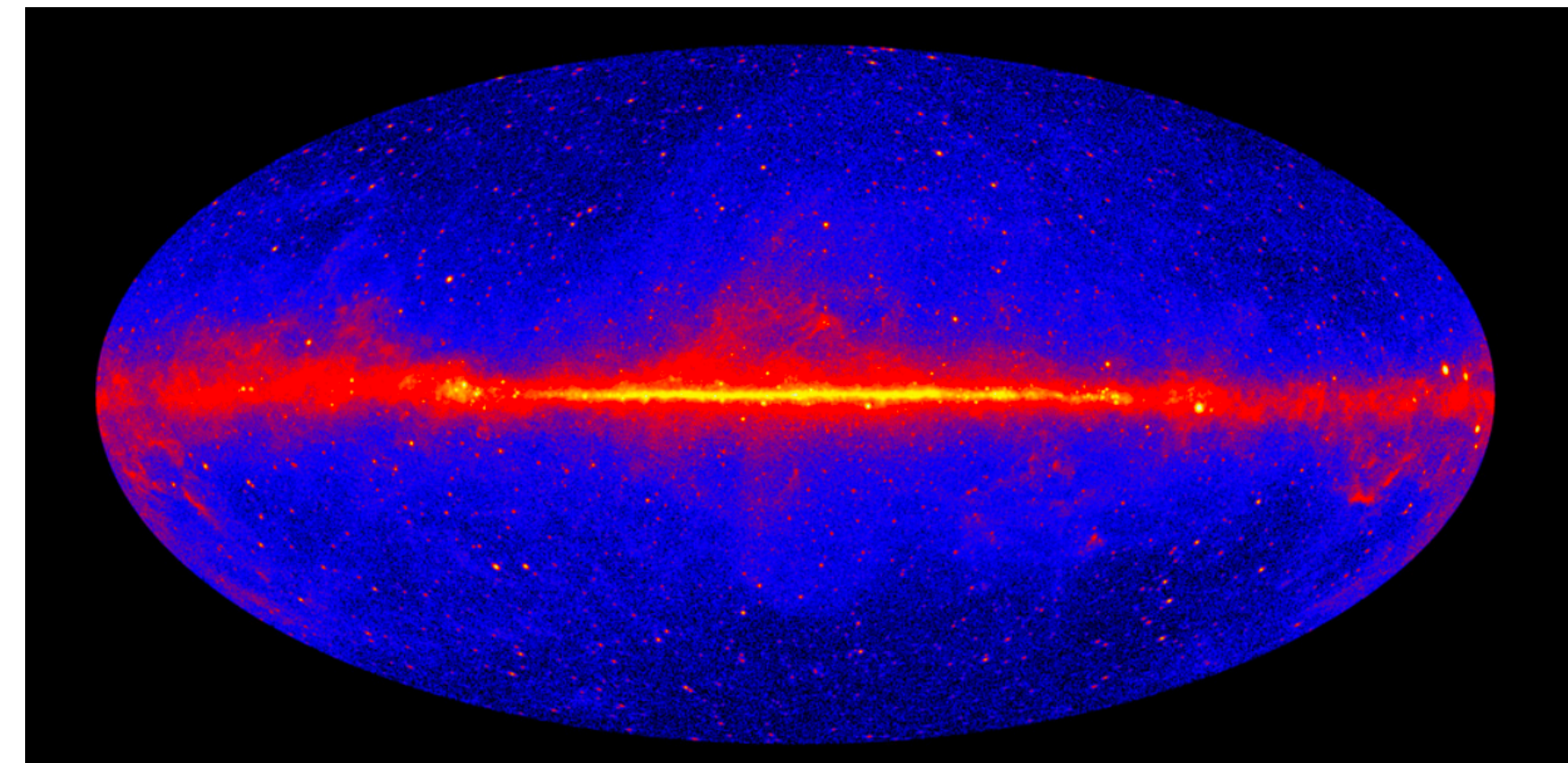
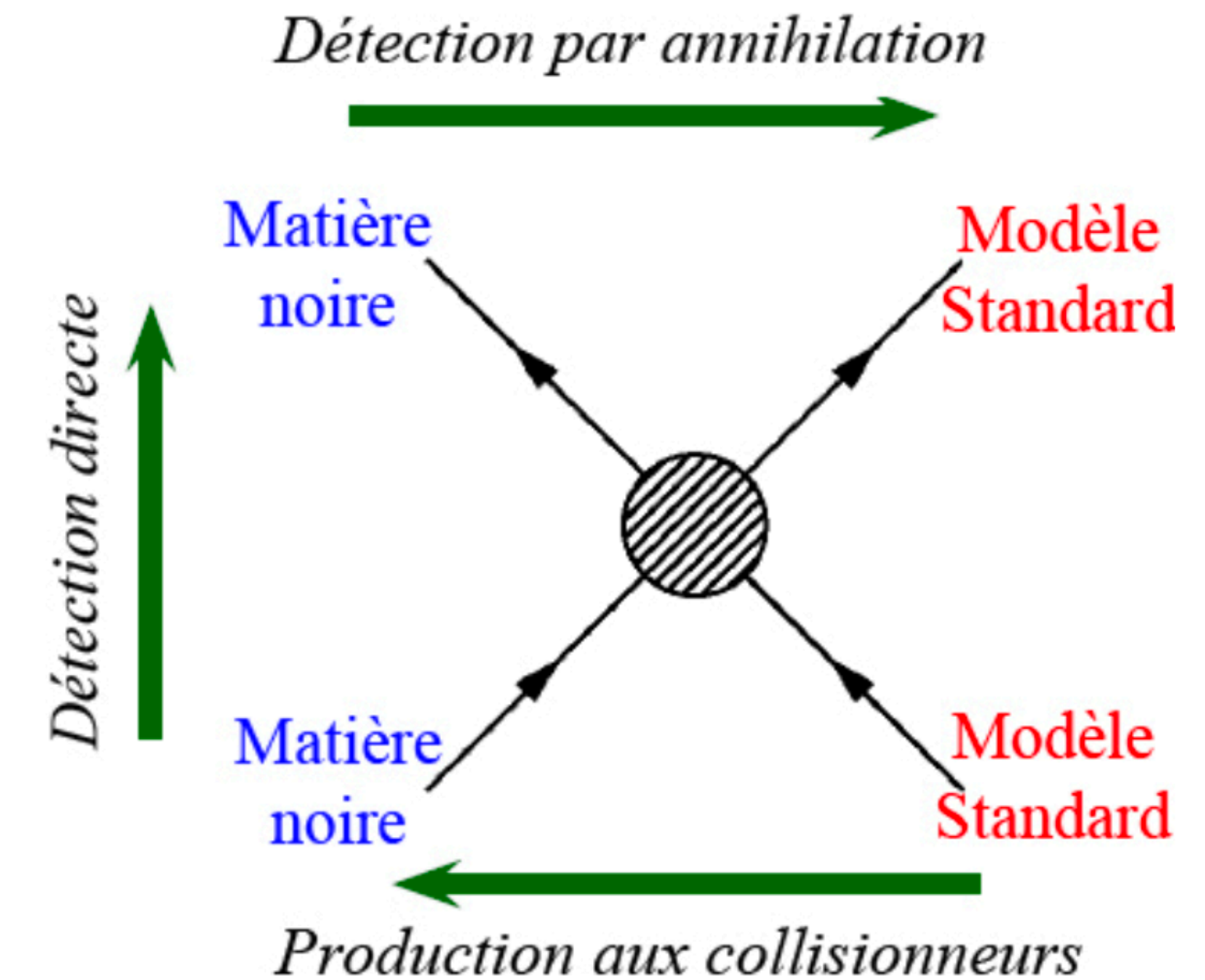
- Pas assez de matière visible pour expliquer la dynamique de grandes structures et pour décrire l'évolution de l'univers



Matière noire: lourde, stable, neutre, interagissant peu avec son environnement. Mais c'est quoi? 26

Observer la matière noire

- **La produire en accélérateur (si assez légère)**
- La détecter lors de son passage sur Terre (interaction avec noyau - recul du noyau)
- Voir son annihilation en observant le ciel
 - Rayons gamma monochromatiques
 - Excès de rayons cosmiques de haute énergie
- Détecter sa présence par observations astronomiques
 - Lentilles gravitationnelles, évolution des grandes structures

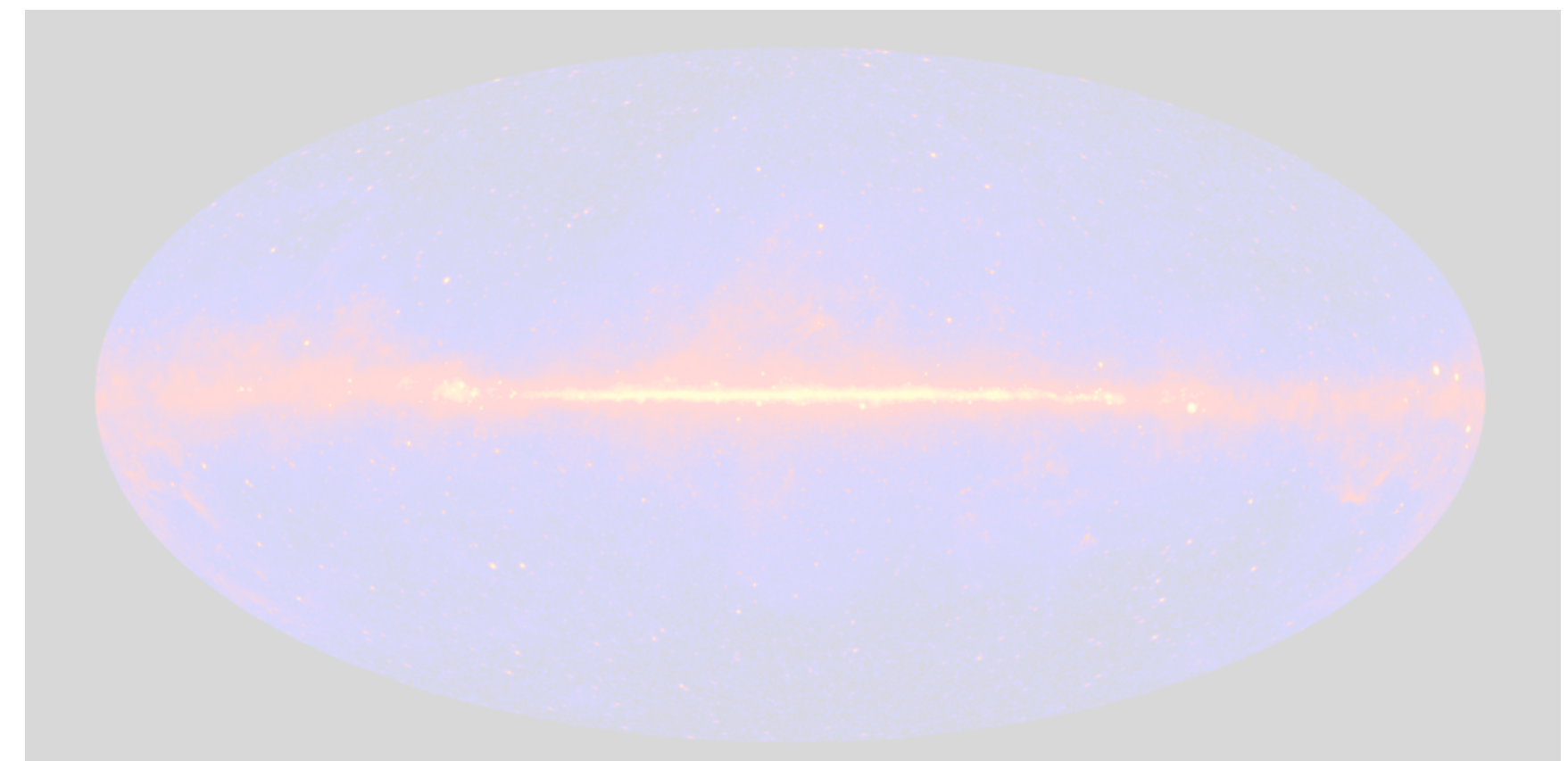
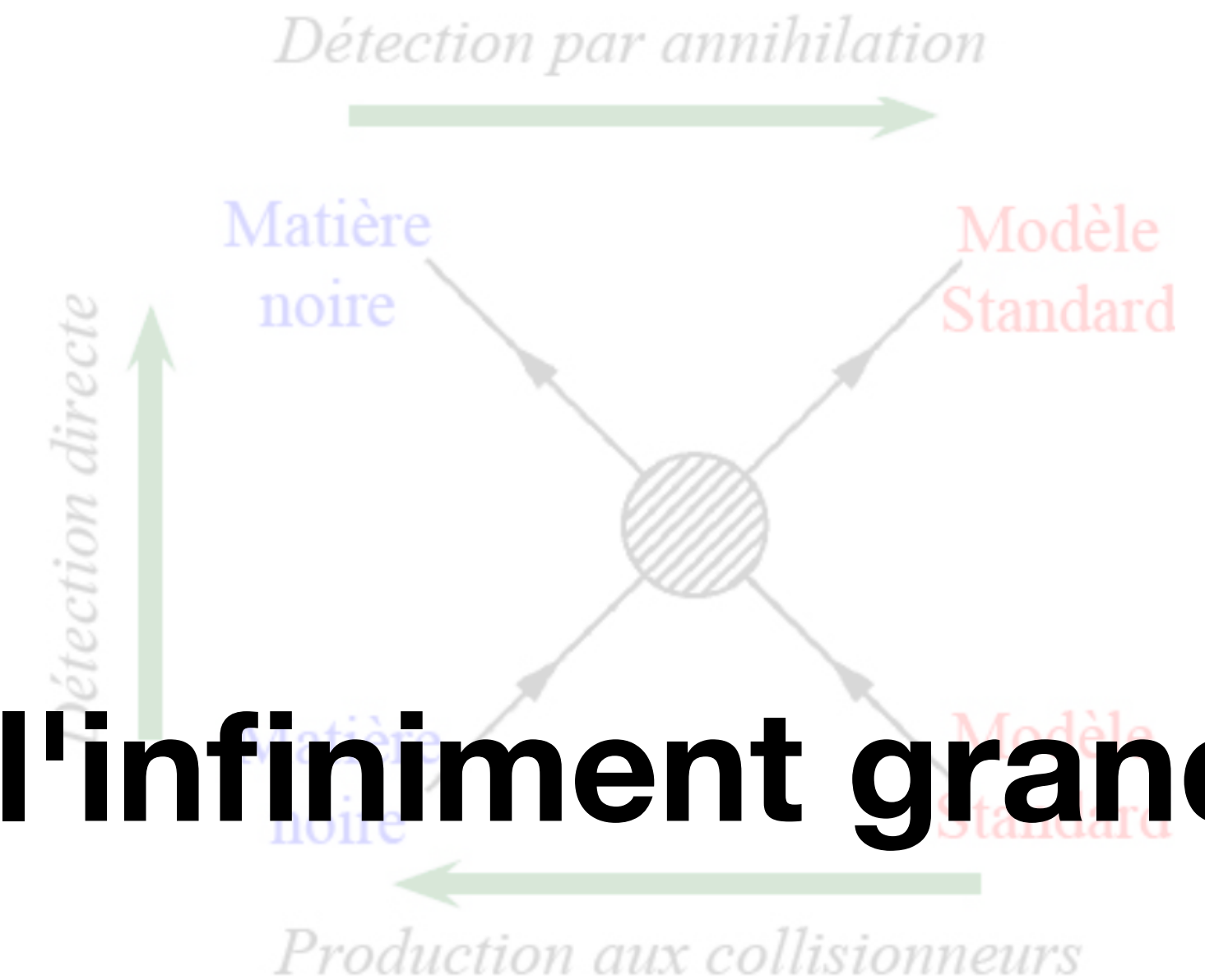


Observer la matière noire

- La produire en accélérateur (si assez légère)
- La détecter lors de son passage sur Terre (interaction avec noyau - recul du noyau)

Des liens entre l'infiniment petit et l'infiniment grand!

- Rayons gamma monochromatiques
- Excès de rayons cosmiques de haute énergie
- Détecter sa présence par observations astronomiques
 - Lentilles gravitationnelles, évolution des grandes structures



Des questions ?