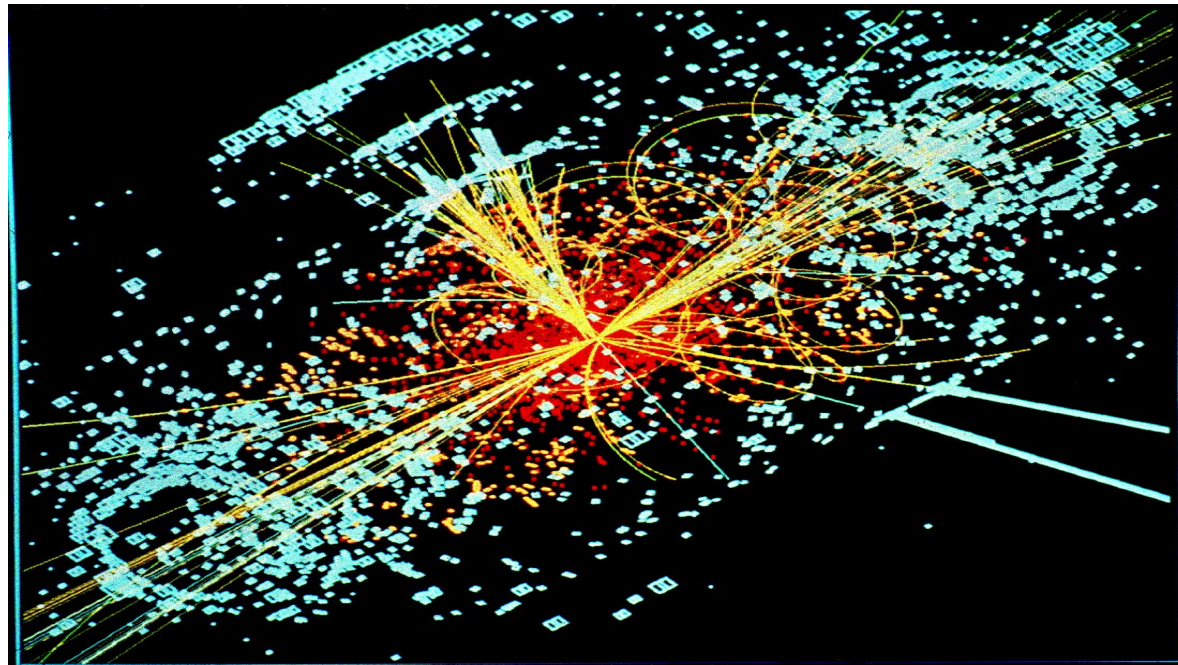


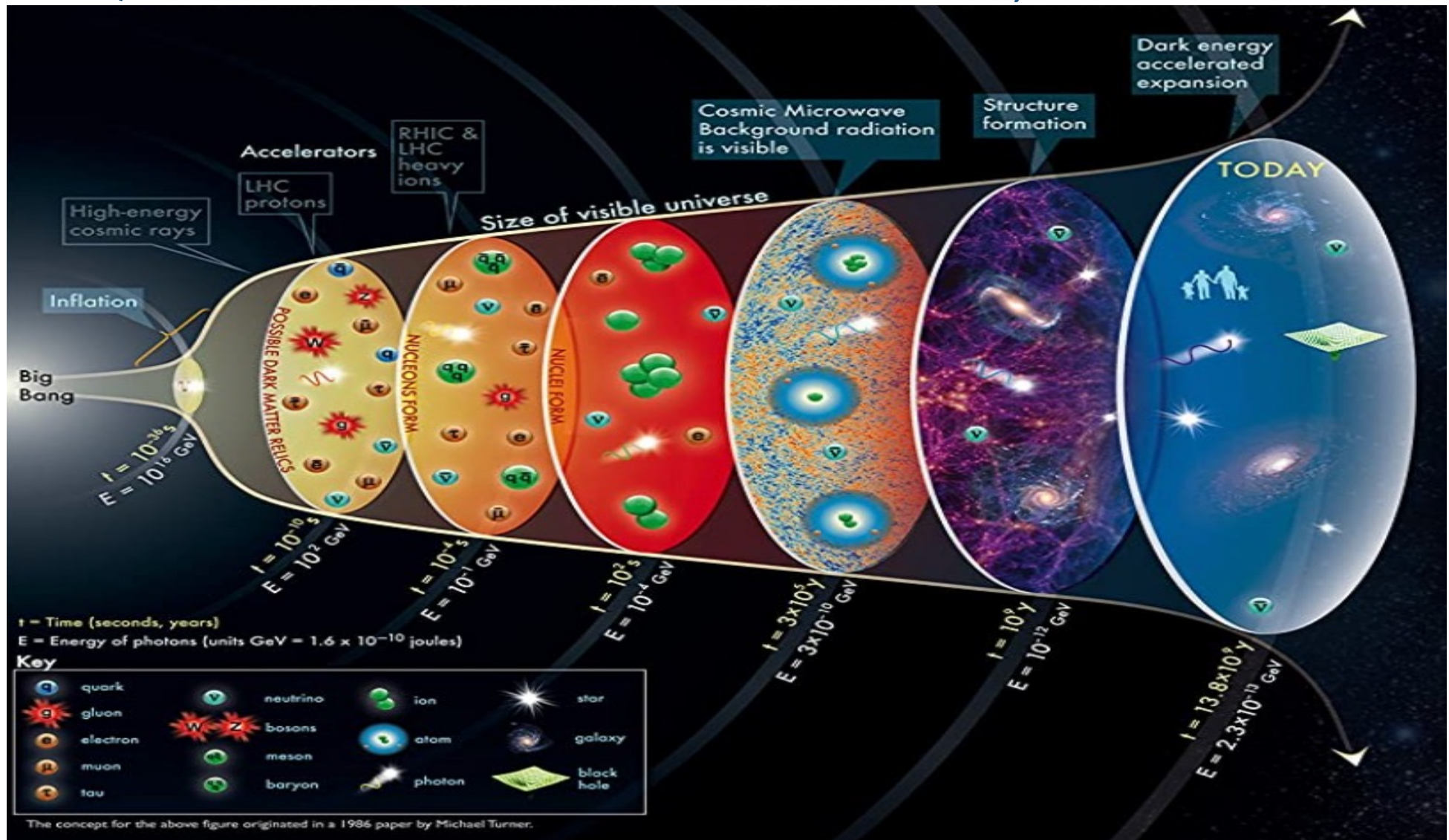
Quelques considérations (non exhaustives) autour de la PHYSIQUE DES PARTICULES AUX ACCELERATEURS

Francesco Polci (LPNHE, CNRS-IN2P3)

WORKSHOP « PHYSIQUE ET DETECTEURS A LA FRONTIER »
22-24 Juin 2021



LA GRAND QUESTION: COMPRENDRE L'UNIVERSE ET SON CHEMIN, DU BIG BANG A NOS JOURS



LE MODEL STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III	
QUARKS	mass $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ u up	mass $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ c charm	mass $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ t top	mass $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 H higgs
	mass $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ d down	mass $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ s strange	mass $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ b bottom	mass 0 charge 0 spin 1 g gluon
	mass $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ e electron	mass $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ μ muon	mass $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ τ tau	mass $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 1 Z Z boson
LEPTONS	mass $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	mass $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	mass $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ charge ± 1 spin 1 W W boson
				mass 0 charge 0 spin 1 γ photon
				mass 0 charge 0 spin 1 γ photon

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & \underbrace{\frac{1}{4} W_{\mu\nu} \cdot W^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a}}_{\text{kinetic energies and self-interactions of the gauge bosons}} \\
 & + \underbrace{\bar{L} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu - \frac{1}{2} g \tau \cdot W_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) L + \bar{R} \gamma^\mu \left(i \partial_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) R}_{\text{kinetic energies and electroweak interactions of fermions}} \\
 & + \underbrace{\frac{1}{2} \left| \left(i \partial_\mu - \frac{1}{2} g \tau \cdot W_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu \right) \phi \right|^2 - V(\phi)}_{W^\pm, Z, \gamma \text{ and Higgs masses and couplings}} \\
 & + \underbrace{g'' (\bar{q} \gamma^\mu T_a q) G_\mu^a}_{\text{interactions between quarks and gluons}} + \underbrace{(G_1 \bar{L} \phi R + G_2 \bar{L} \phi_c R + h.c.)}_{\text{fermion masses and couplings to Higgs}}
 \end{aligned}$$

Le Modèle Standard décrit 3 des 4 forces fondamentales (forte, électromagnétique, faible) via une équation et une liste de particules fondamentales

Très élégant et très prédictif!

Pas tout à fait.....

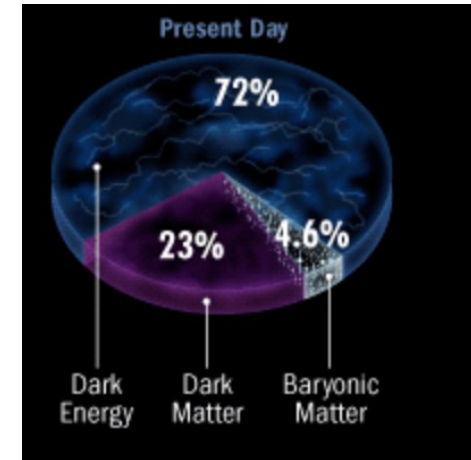
LES LIMITES DU MODELES STANDARD

Il ne décrit pas certaines observations:

- masse des neutrinos et leurs oscillations
- existence de la matière sombre
- asymétrie matière-antimatière dans l'univers

Il présente des problèmes conceptuels:

- hiérarchie de l'échelle de Fermi et de la constante cosmologique
- hiérarchie des masses des fermions
- absence de violation de CP dans l'interaction forte



Il y a un consensus sur le fait que le Modèle Standard serait la manifestation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale, généralement appelé « physique au delà du Modèle Standard » ou « nouvelle physique ».

$$\mathcal{L}_{eff} = \mathcal{L}_{SM} + \frac{C_{NP}}{\Lambda^2}$$

NP coupling

NP scale

Quelle alternatives possibles?

Supersymétrie, modèles composites, dimensions supplémentaires....et plein d'autres possibilités aux quelle peut être nous n'avons pas encore réfléchis mais vers les quelle les expériences peuvent nous conduire!

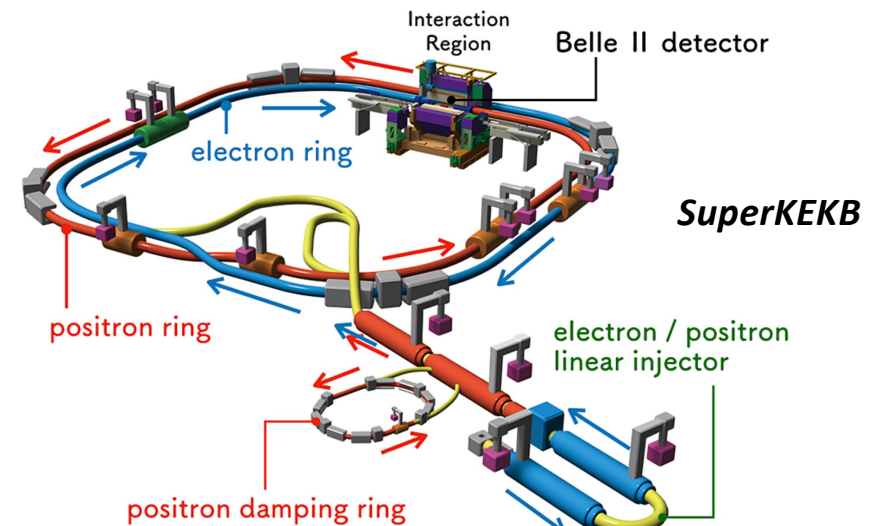
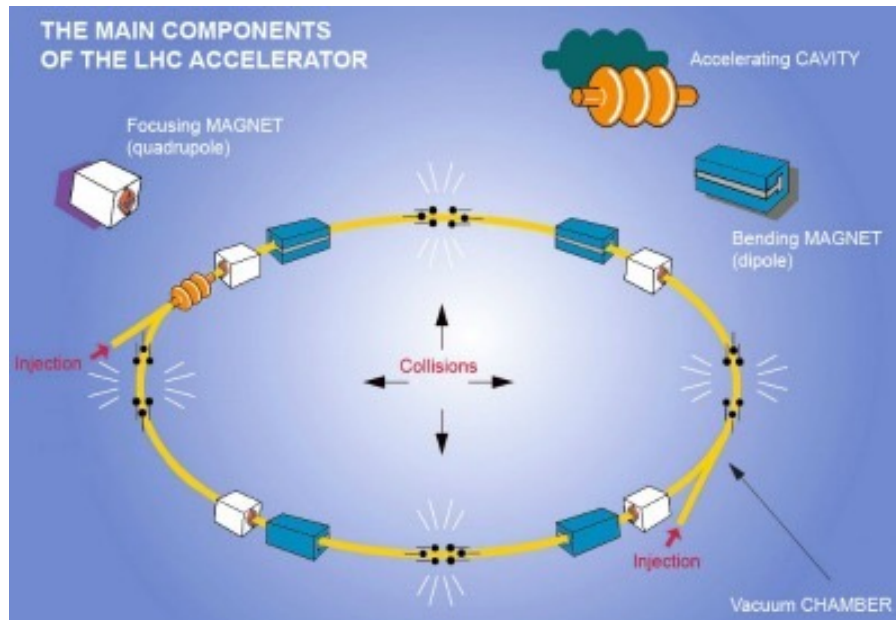
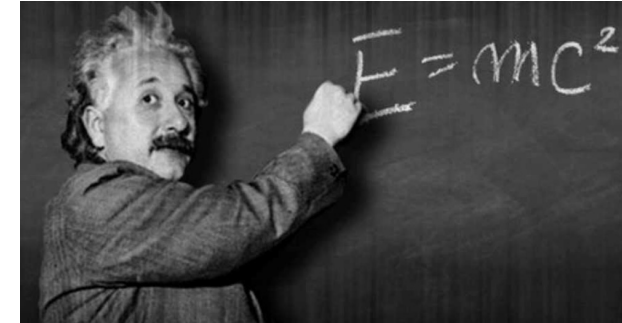
Chercher des nouveaux phénomènes que montreraient la nature de cette théorie au delà du Modèle Standard est l'objectif de la physique de particules.

DES OUTILS EXTRAORDINAIRES: LES ACCELERATEURS DE PARTICULES...

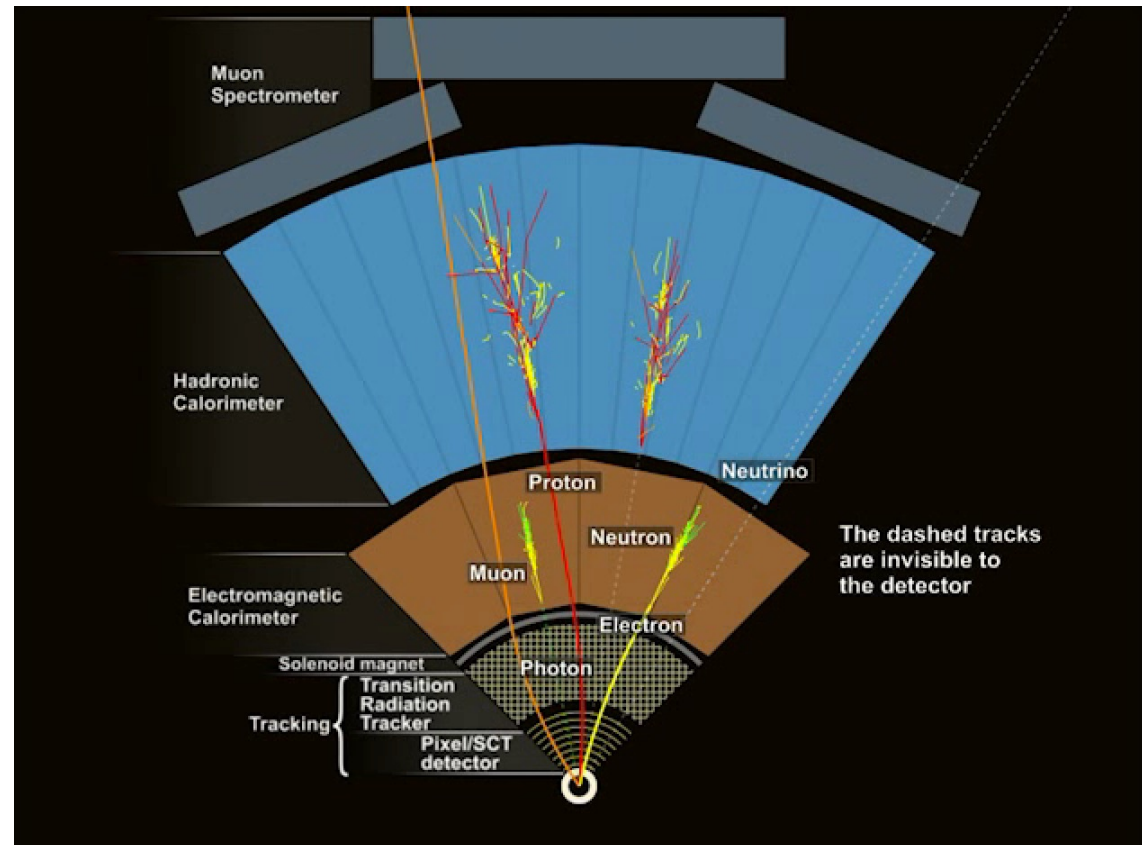
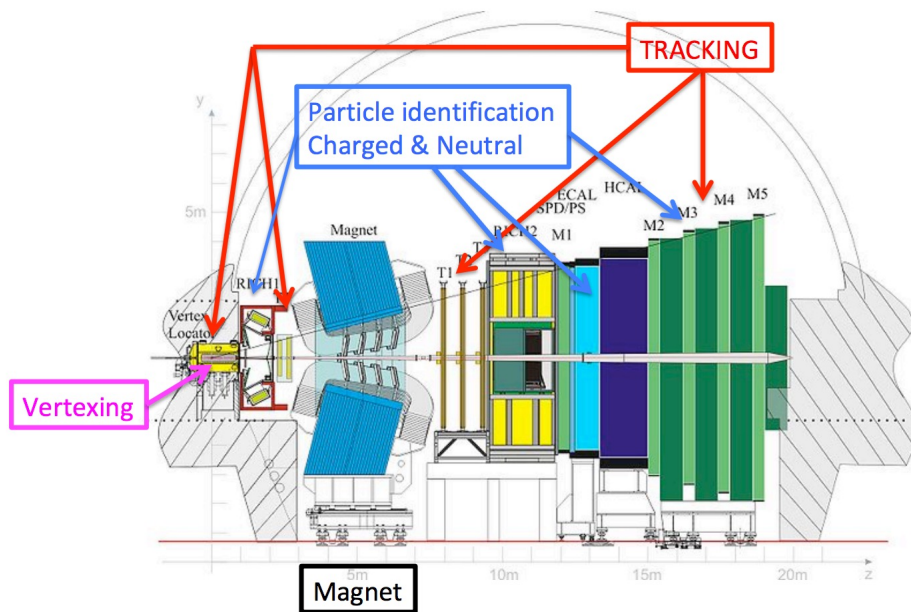
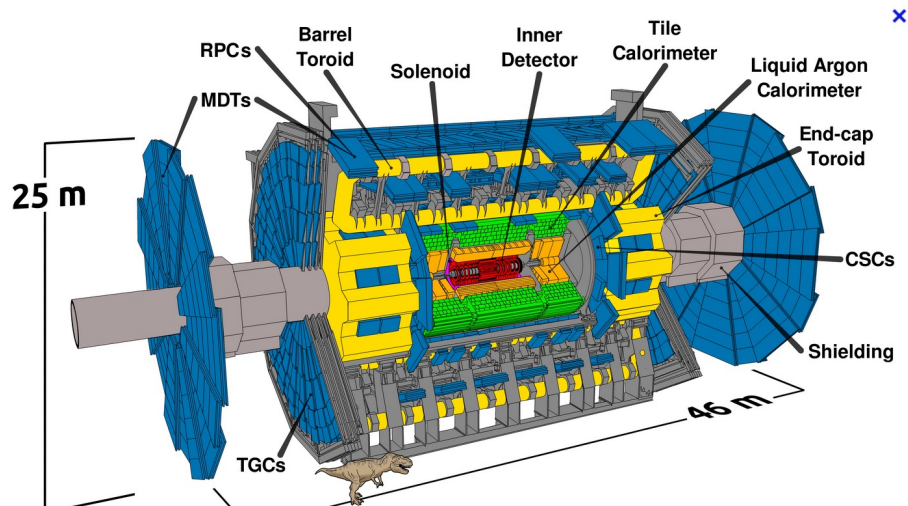
Les accélérateurs des particules nous permettent de créer en laboratoire et en abondance aussi les particules des autres familles, et d'étudier leurs interactions.

Deux stratégies complémentaires sont suivies:

- On accède à des énergies de plus en plus élevées, ou des phénomènes pas encore observé pourraient se produire => **ENERGY FRONTIER**
- On produit en abondance (à haute luminosité) des particules pour que on puisse observer leurs désintégrations les plus rares ou même interdites dans le Modèle Standard => **INTENSITY FRONTIER**

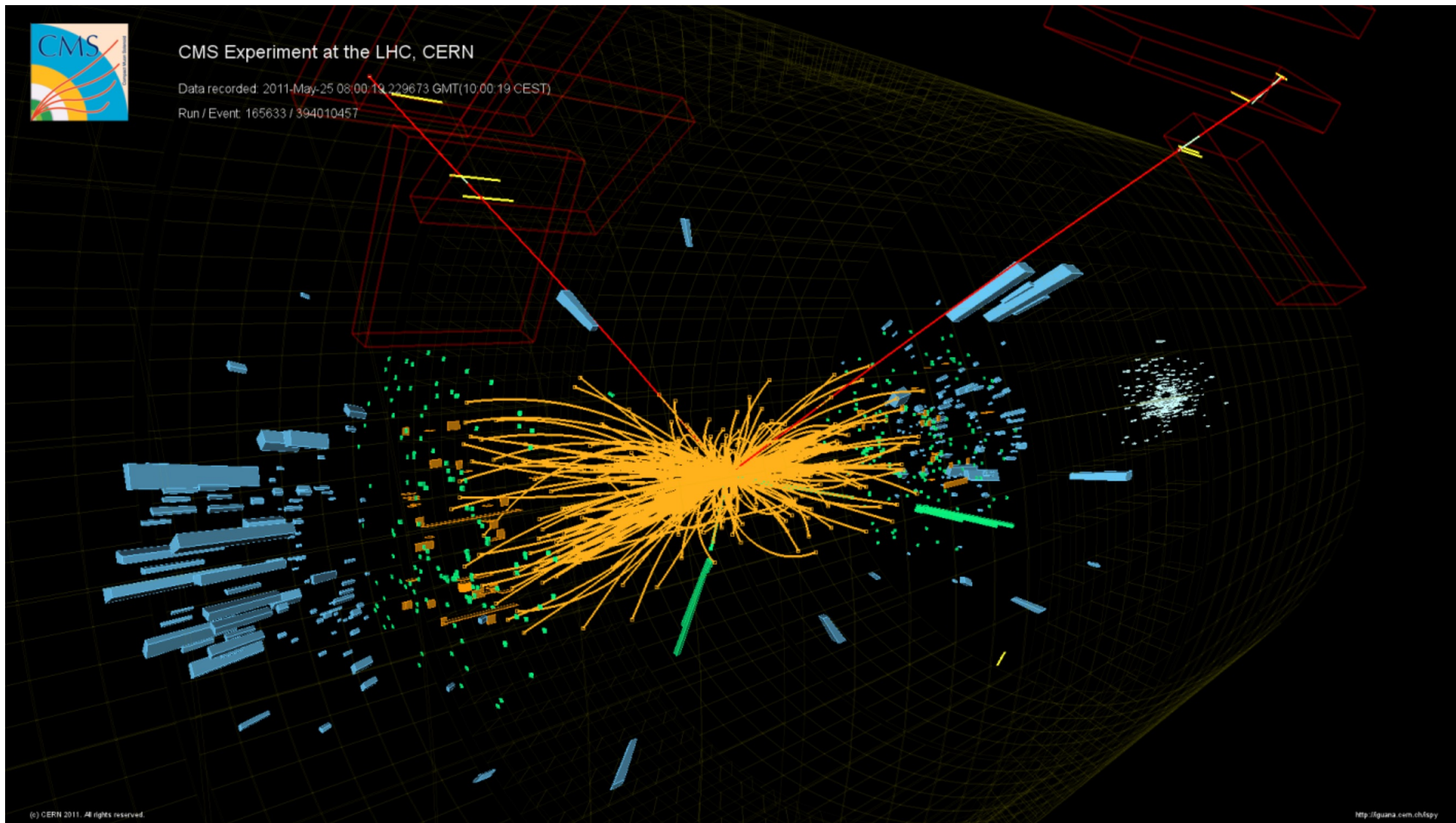


...ET LEURS DETECTEURS



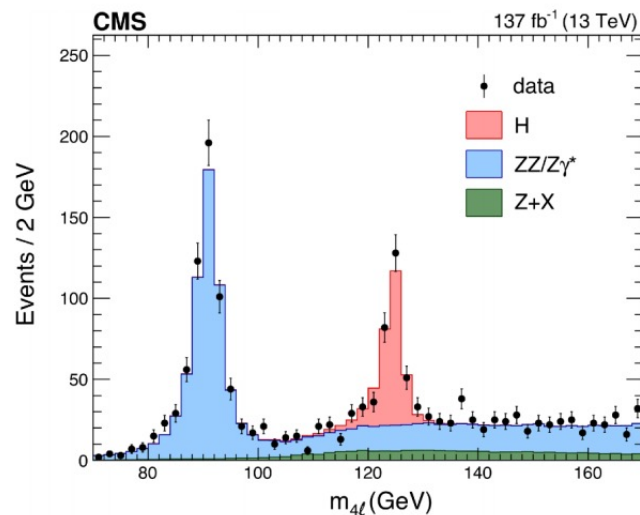
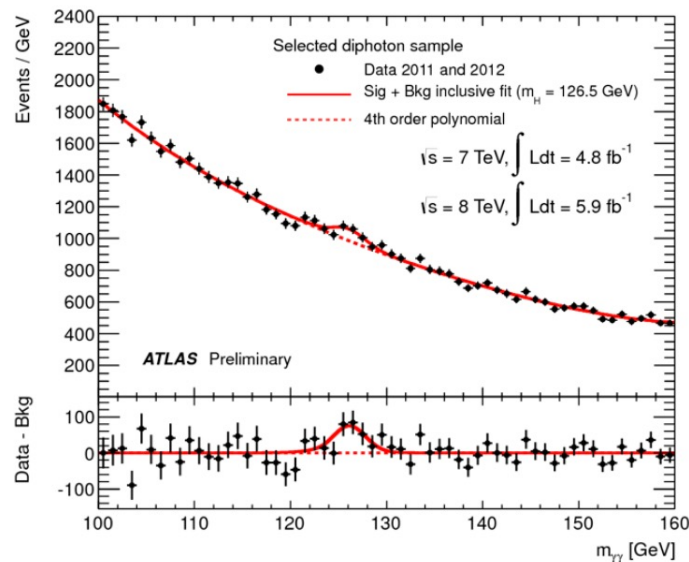
- La reconstruction des particules dans l'état final de la collision nous permet de effectuer nos recherches.
- Différentes technologies sont utilisées pour les différents sous-détecteurs.
- Elles sont choisies sur la base des besoins de physique et en considérant les différentes contraintes.

LA VIE REELLE EST PLUS COMPLIQUE, MAIS MAGNIFIQUE!



LE BOSON DE HIGGS: LE PLUS GRAND SUCCES DU LHC (JUSQU'À MAINTENANT...)

- Le fit électrofaible au LEP indiquait un range possible pour la masse du Higgs.
- Le LHC, permettant l'accès à une énergie jamais atteinte auparavant, a permis sa découverte! Nobel Prize!



The Nobel Prize in Physics 2013



Photo: A. Mahmoud
François Englert
Prize share: 1/2



Photo: A. Mahmoud
Peter W. Higgs
Prize share: 1/2

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"

Figure 2: The invariant mass from pairs of photons selected in the Higgs to $\gamma\gamma$ analysis, as shown at the seminar at CERN on 4 July 2012. The excess of events over the background prediction around 125 GeV is consistent with predictions for the Standard Model Higgs boson. (Image: ATLAS Collaboration/CERN)

MAINTENANT IL EST LE TEMPS DES MESURES DE PRECISIONS DU SECTEUR DE HIGGS

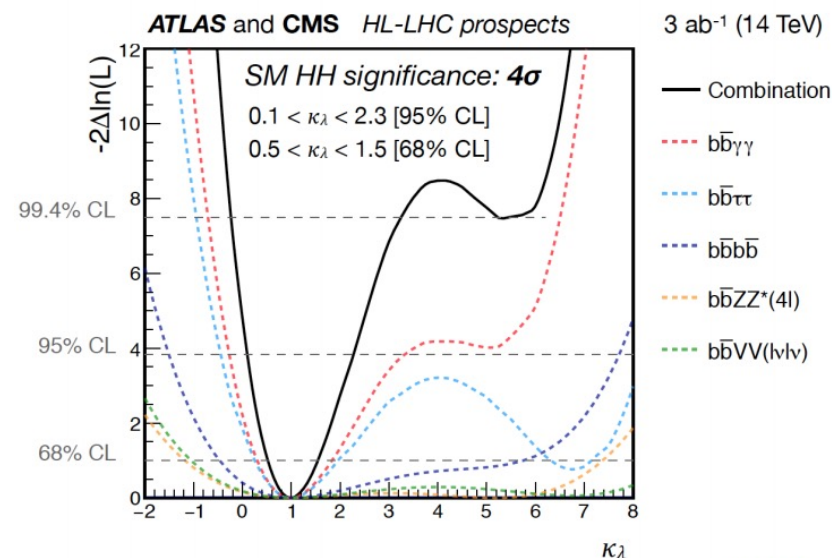
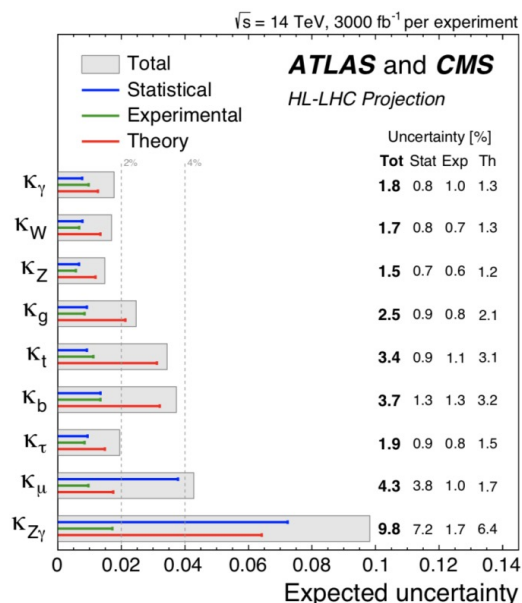
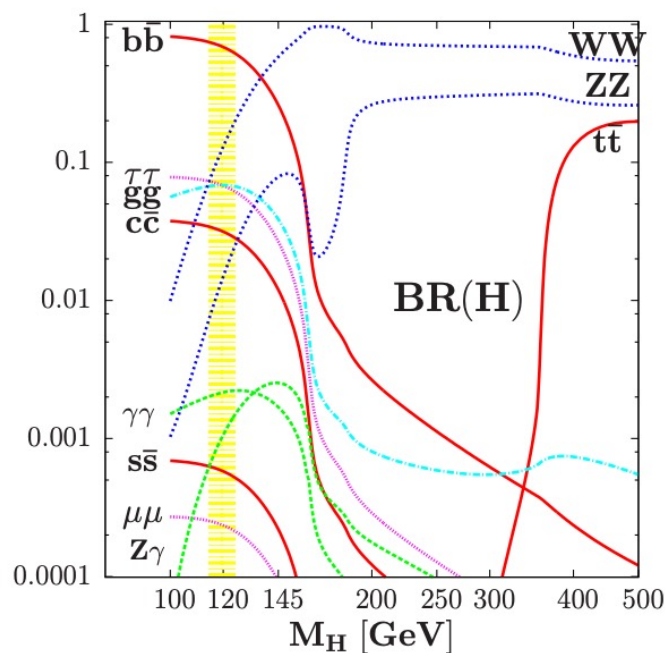
Le boson de Higgs est liée à plusieurs problèmes fondamentaux en physique de particules:

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = V_0 - \mu^2 H^\dagger H + \lambda (H^\dagger H)^2 + (y_{ij} \bar{\psi}_{Li} \psi_{Rj} H + h.c.)$$

$\swarrow$ vacuum energy / cosmological constant $V_0 \approx (2 \times 10^{-3} \text{ eV})^4 \ll M_{\text{Pl}}^4$
 $\downarrow$ hierarchy problem $m_H \approx 100 \text{ GeV} \ll M_{\text{Pl}}$
 $\swarrow$ triviality/stability of EW vacuum
 $\downarrow$ mass and mixing hierarchy
 $\searrow$ flavour & CP

From C. Grojean

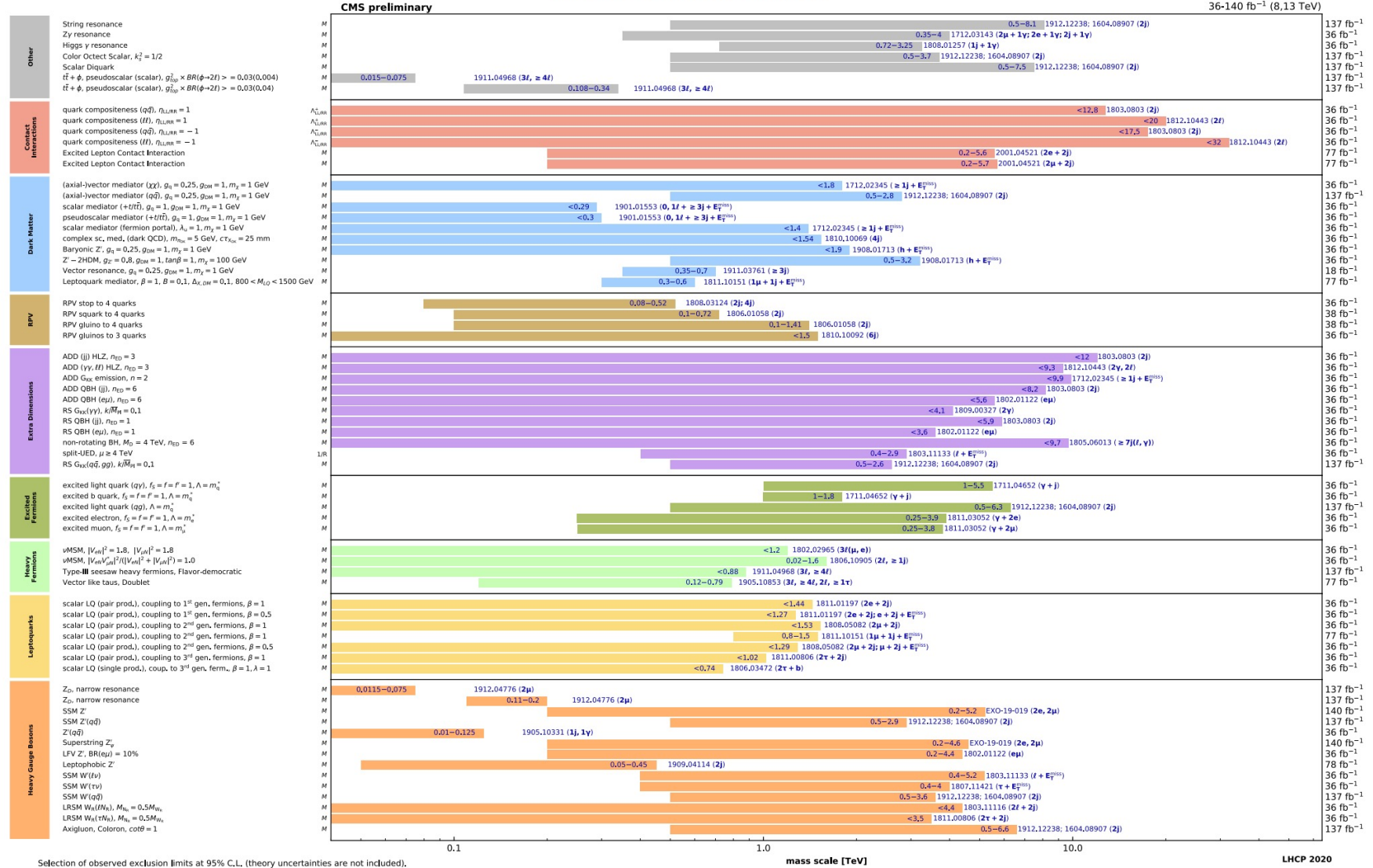
- Is it THE Higgs from SM ?
- Is it fundamental or composite ?
- Does it couple to Dark Matter?
- Are there others Higgs ?



De façon complémentaire, il faut continuer les mesures de précisions du top et du secteur électrofaible

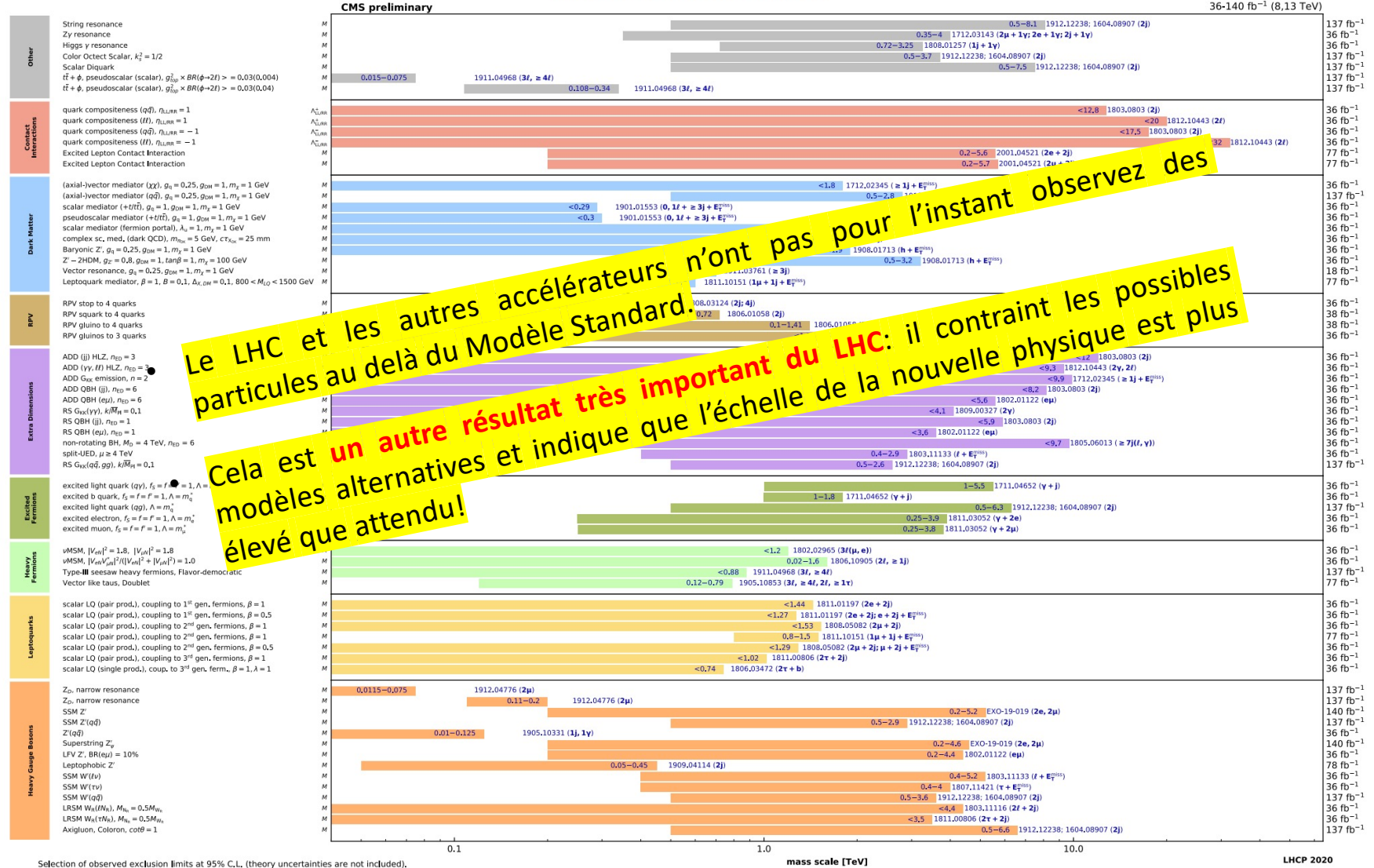
RECHERCHE DE PARTICULES AU DELA DU MODELE STANDARD

Overview of CMS EXO results



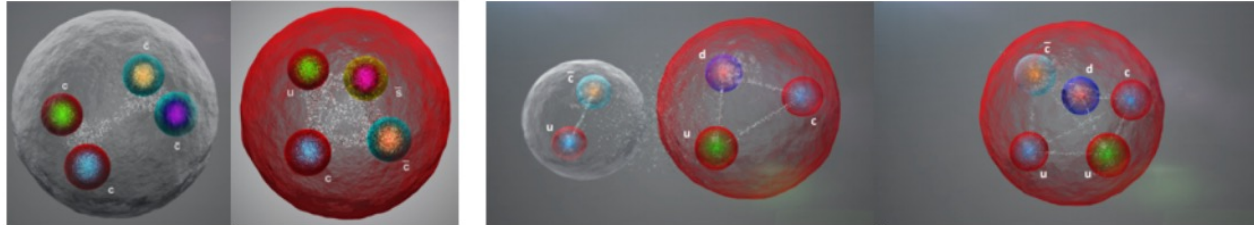
RECHERCHE DE PARTICULES AU DELA DU MODELE STANDARD

Overview of CMS EXO results

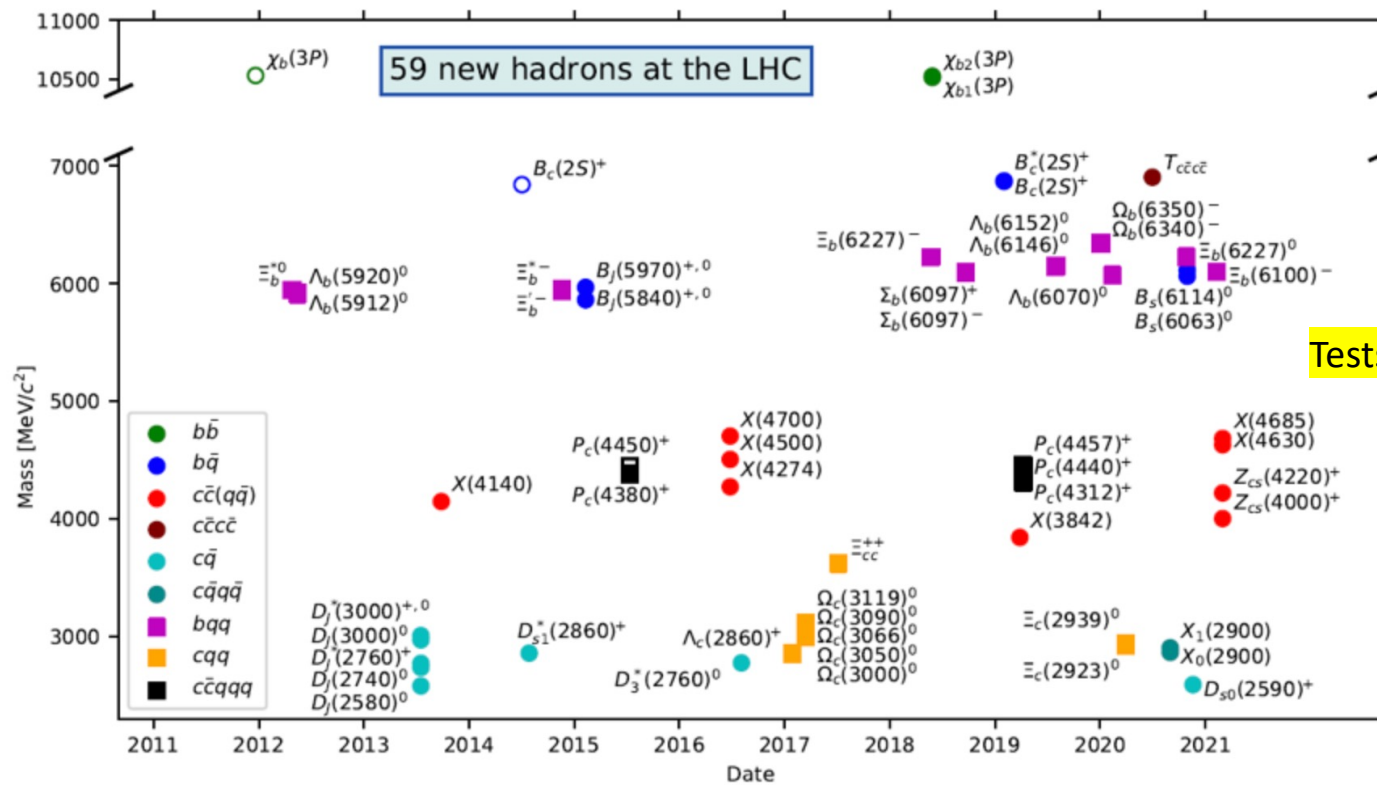


MAIS PLEIN DE NOUVELLES PARTICULES SONT DECOUVERTES!

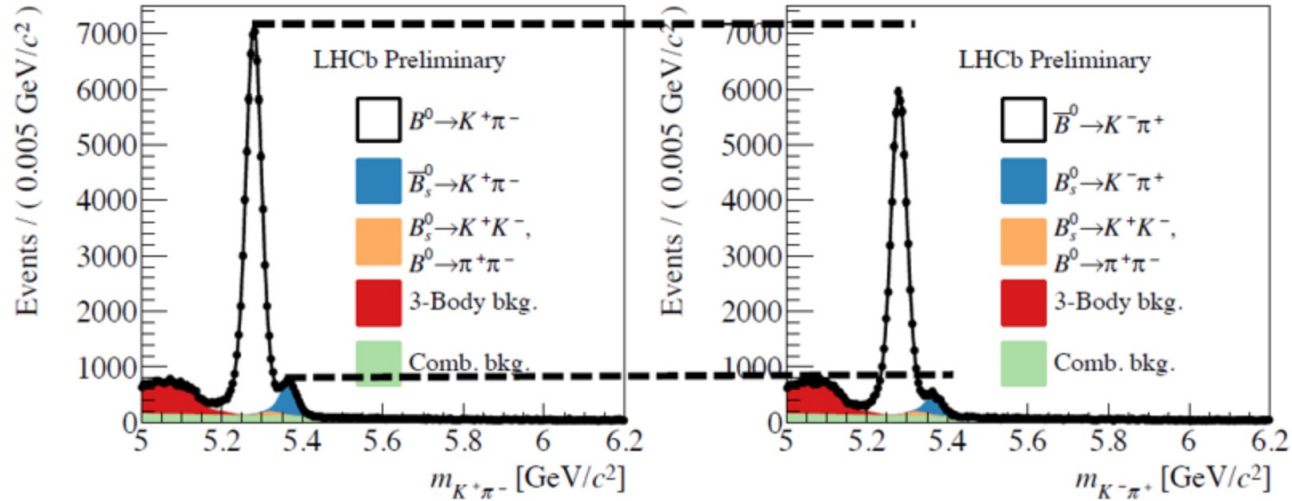
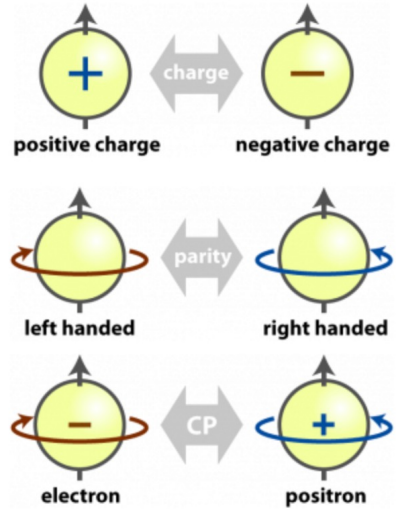
Tetraquarks



Pentaquarks



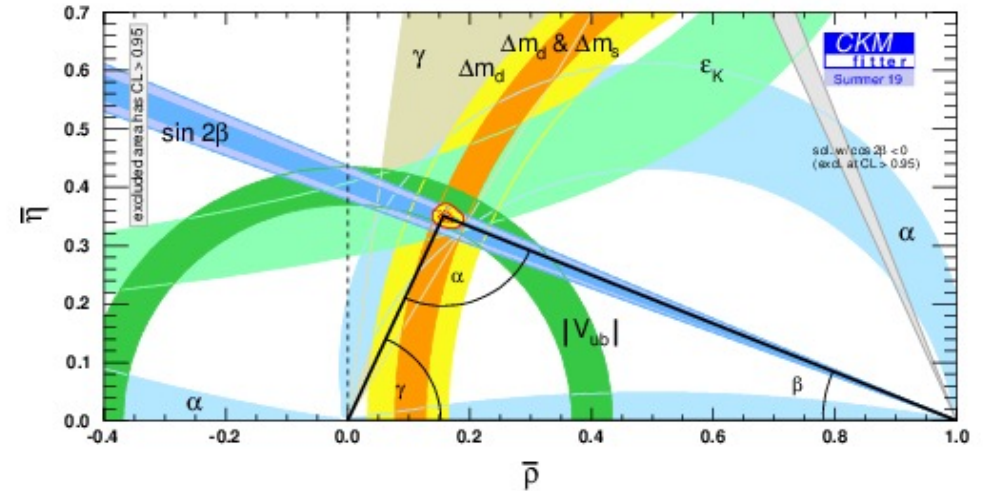
LA VIOLATION DE CP: UN EXEMPLE DE TEST DE PRECISION



Est que le Modèle Standard explique correctement le mécanisme de la violation de la symétrie CP?

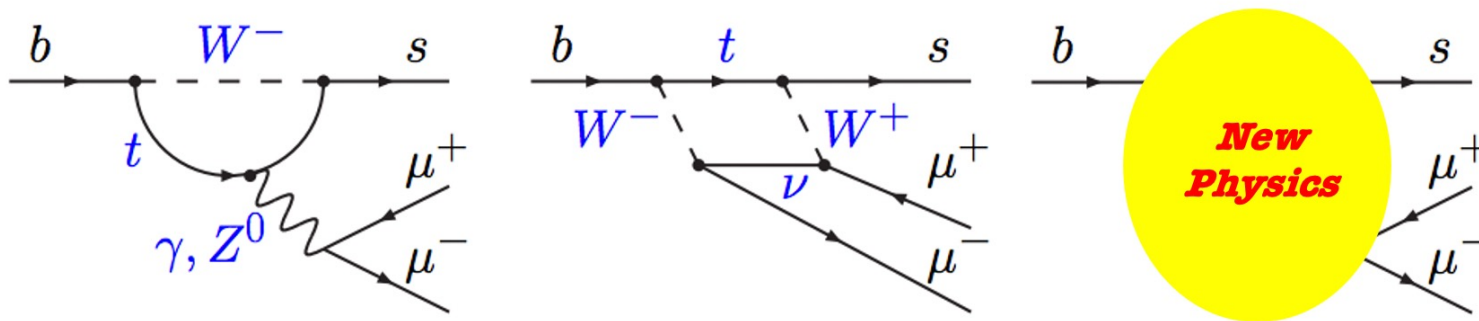
⇒ Test d'unitarité de la matrice CKM!

⇒ Sensible à la nouvelle physique.



LE POUVOIR DES BOUCLES

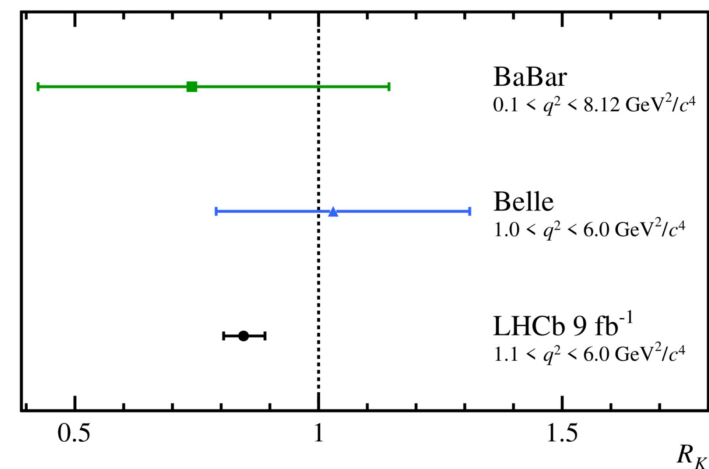
- Les diagrammes à boucles **donnent accès à des énergies encore plus élevées que celles des collisions**, car les particules dans les boucles ont une masse « virtuelle ».



- Par exemple, on peut tester l'universalité léptonique dans les désintégrations $b \rightarrow s \ell \ell$

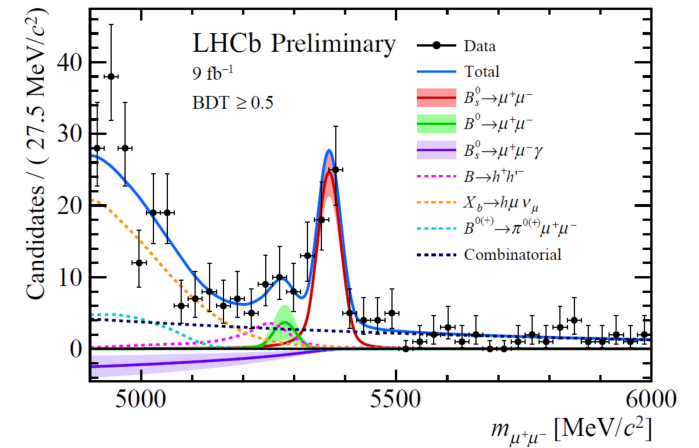
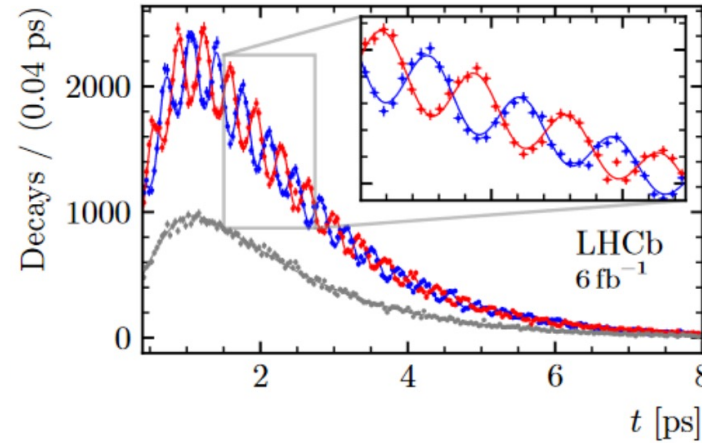
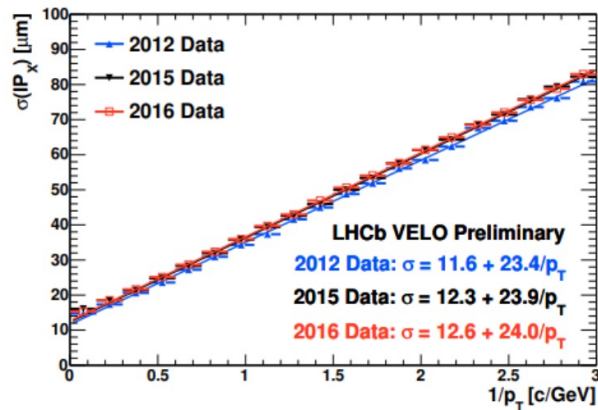
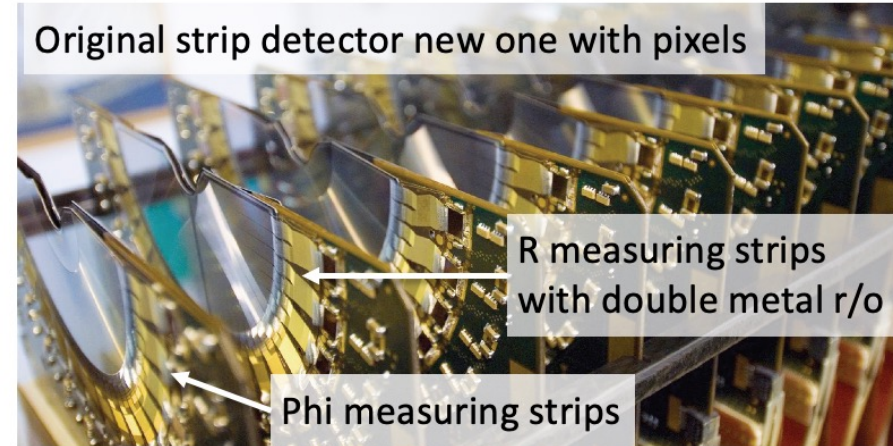
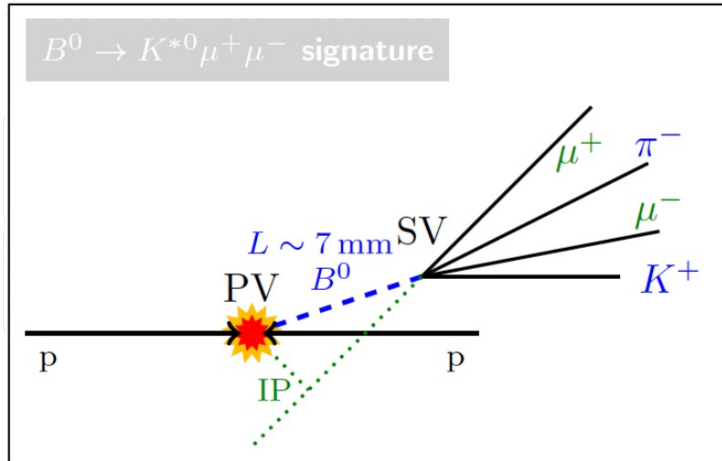
$$R_{H_s} = \frac{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} \frac{d\Gamma(H_b \rightarrow H_s \mu^+ \mu^-)}{dq^2} dq^2}{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} \frac{d\Gamma(H_b \rightarrow H_s e^+ e^-)}{dq^2} dq^2}$$

Exemples: $B^+ \rightarrow K \ell \ell$, $B^0 \rightarrow K^* 0 \ell \ell$, $B_s \rightarrow \phi \ell \ell$,

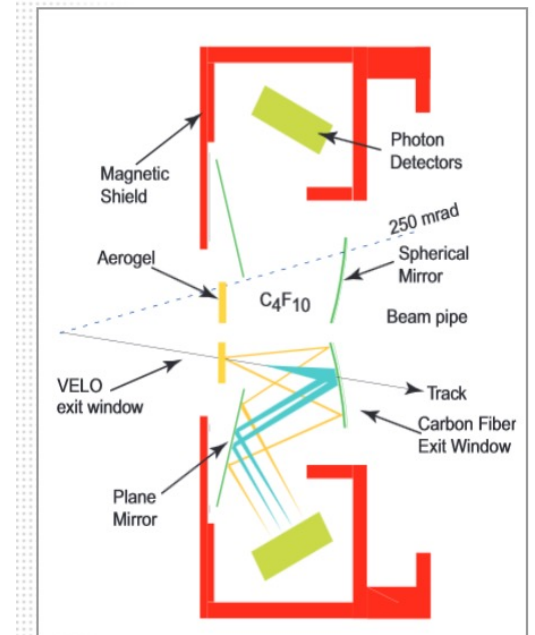
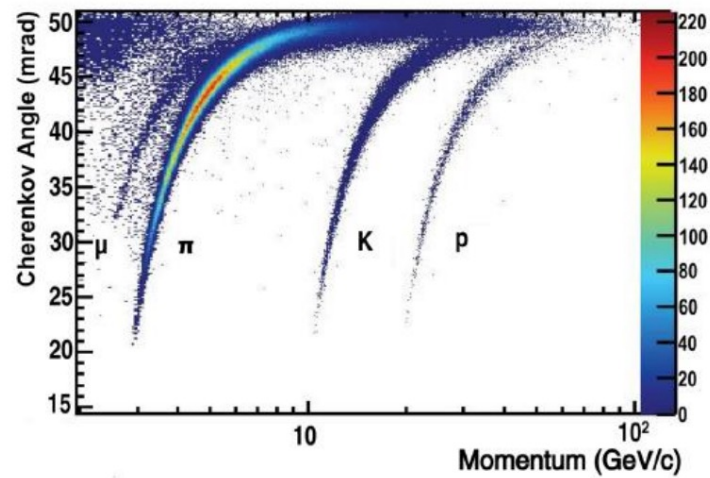
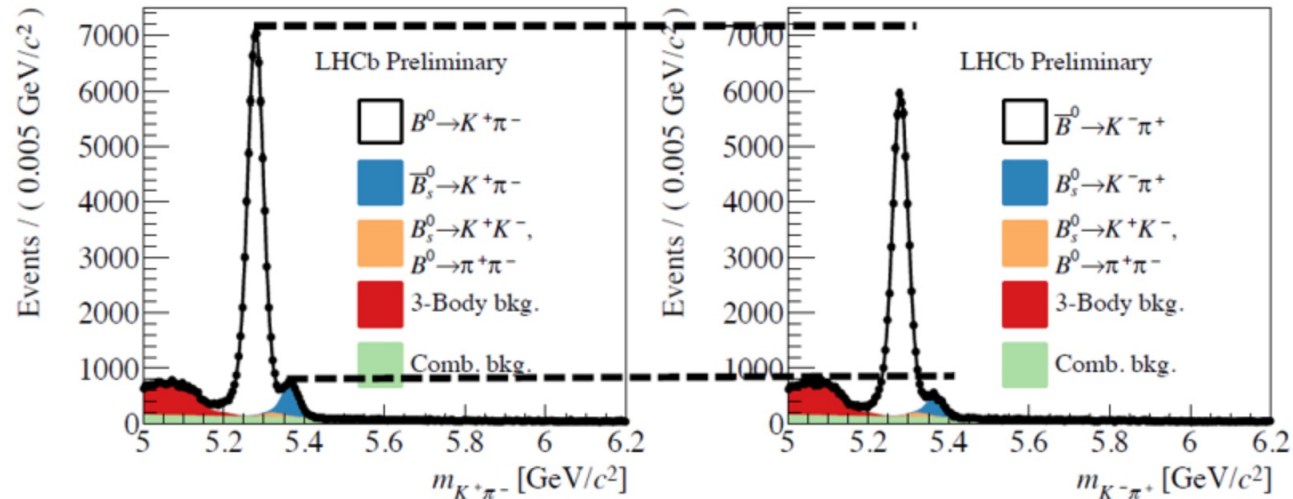


- Des anomalies très intrigantes sont observés....une fenêtre ouverte vers la nouvelle physique?

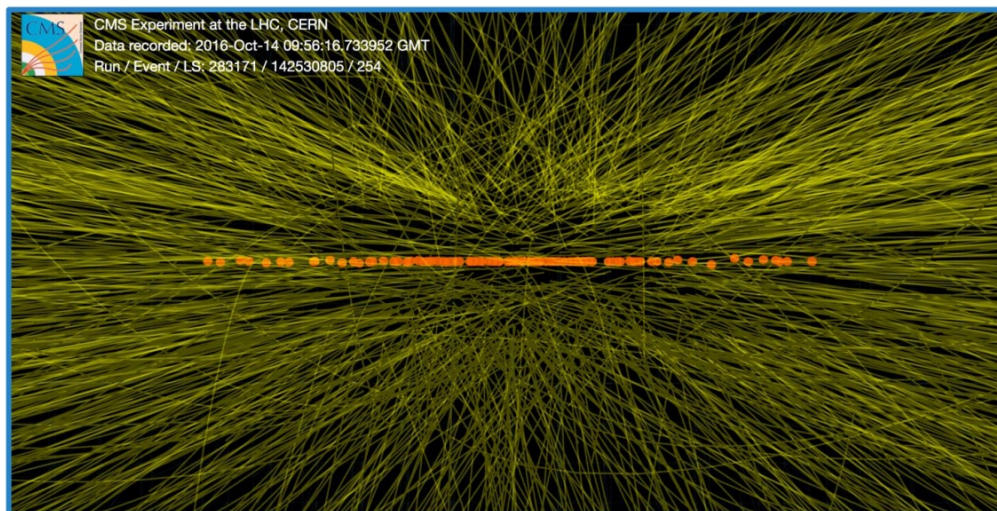
IMPACT DES DETECTEURS DE TRACES : RECONSTRUCTION DES VERTEX, RESOLUTION DE MASSE



IMPACT DES L'IDENTIFICATION DES PARTICULES

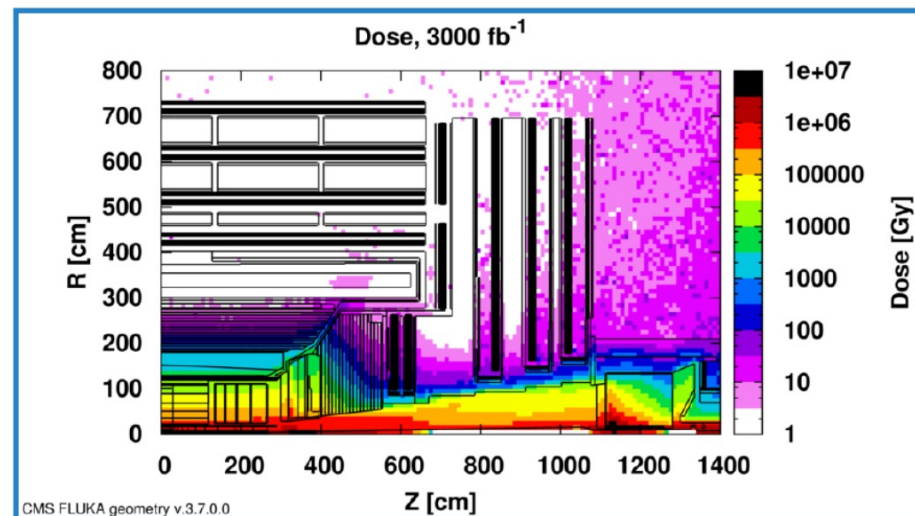


LE CHALLENGE DU HL-LHC: HAUTE TAUX DES COLLISIONS



Pileup attendu: ~140 !!!

- Besoin de haute granularité des sous-détecteurs
- Introduction de Timing Detectors (résolution 30ps)
- Renouvellement des systèmes d'acquisition et de déclenchement

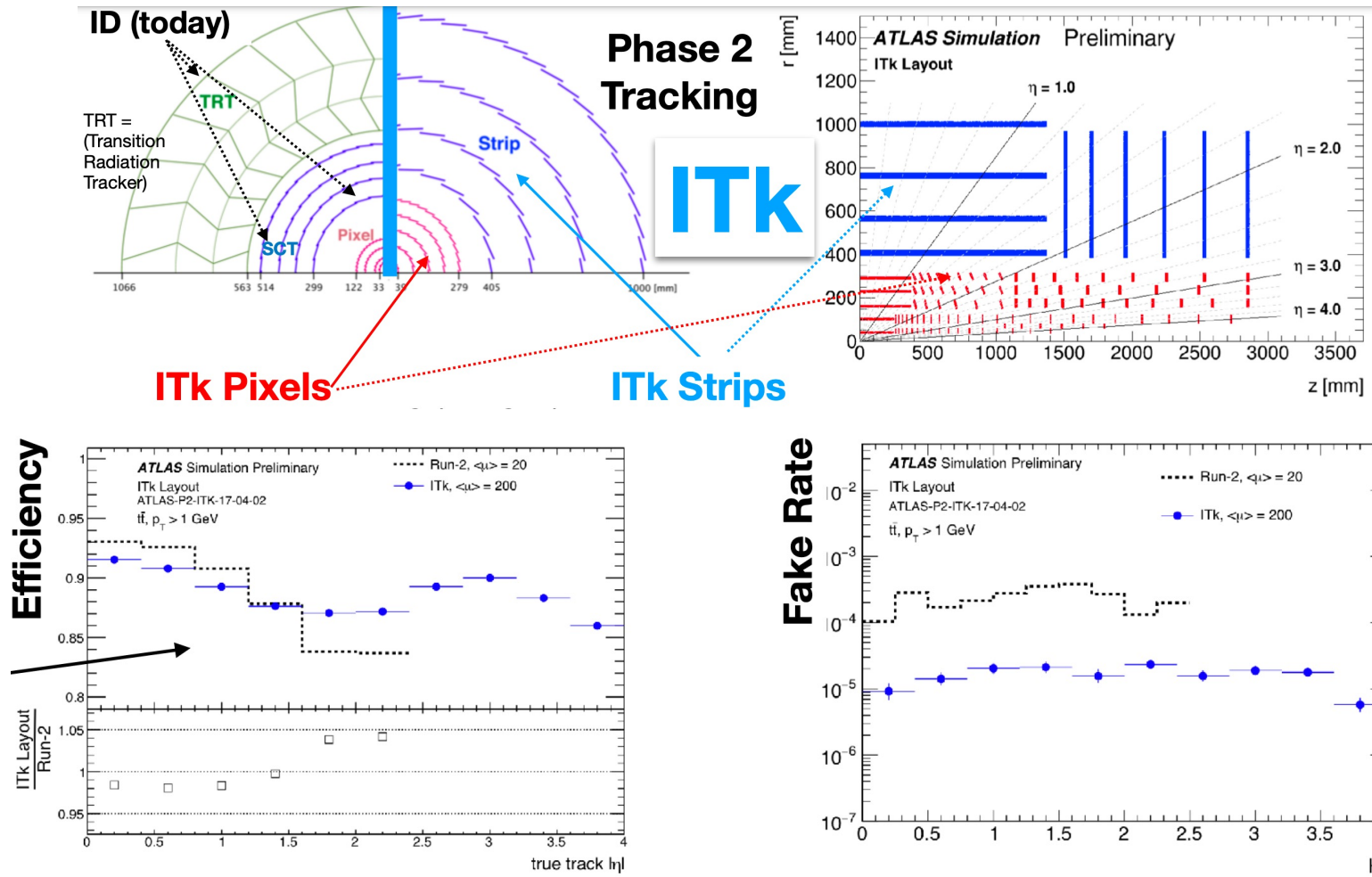


Hautes dose de radiation!

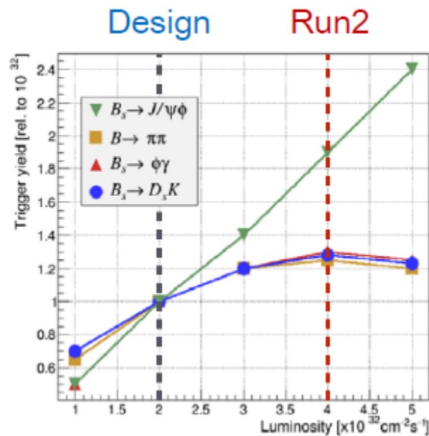
- Remplacement des senseurs
- Remplacement de l'électronique
- Choix des technologies résistantes aux radiations.

AMELIORER LES DETECTEURS DES TRACES: EXEMPLE DE ATLAS ITK

- Moins de matériaux -> moins d'interactions parasites
- Plus d'hits a disposition et meilleur herméticité -> meilleur reconstruction des traces

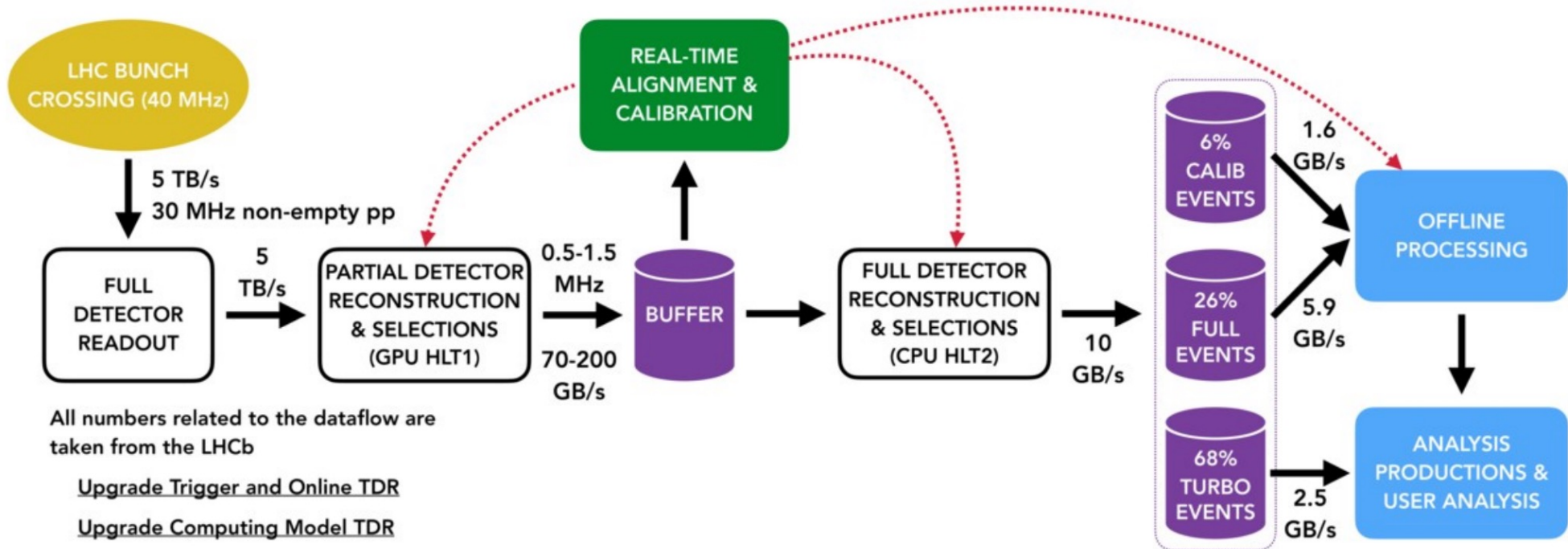


NOUVEAUX PARADIGMES DE TRIGGER ET ACQUISITION: LE CAS DE LHCb



← Dépasser les limites du trigger hardware

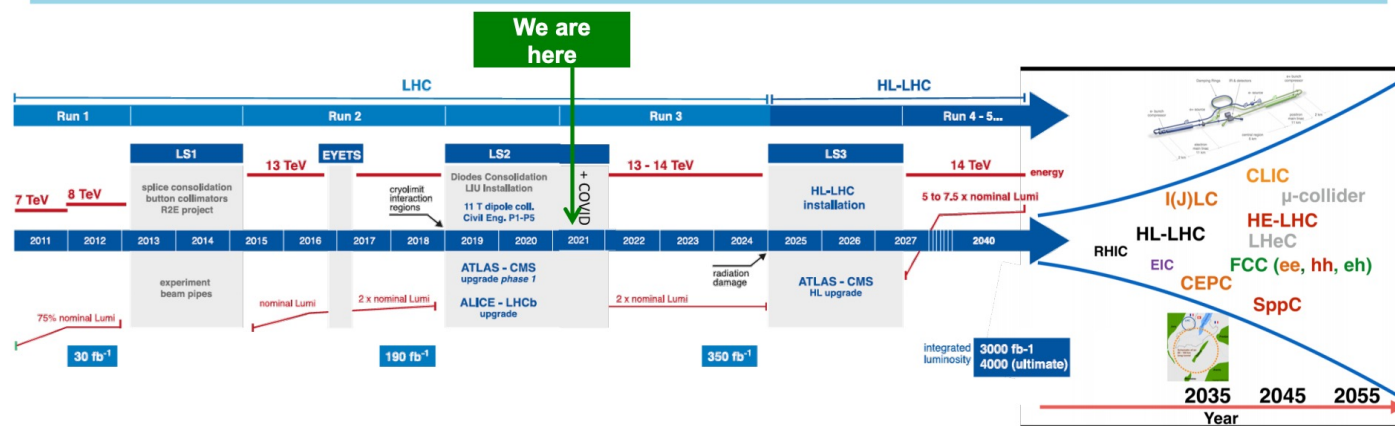
- Triggers complètement software
- Utilisation des GPU
- Calibration et alignement en temps réel
- Sélections des informations à sauvegarder (TURBO).



CONCLUSIONS

- La physique de particules aux accélérateurs est dans une phase très vivantes: programme de physique vaste, stratégies définies, perspective sur le long terme, beaucoup de choix technologiques et de développement à faire, avec impact substantiel sur le potentiel de découverte des expériences.
- Pour une vision détaillée des implications de l'IN2P3 dans les projets: <https://indico.in2p3.fr/event/19802/>
- Les détecteurs HL-LHC sont définis, mais d'autres projets sont prévus pour lesquelles des discussions dans le GDR détecteurs seraient très approprié: LHCb upgrade 2, Belle III, détecteurs pour future collisionneurs....

Collider Landscape



LHC + HL-LHC is the largest **pp** dataset for
the next few decades

+ SuperKEKB

Variety of post-LHC colliders
proposed globally