

La physique des particules belles et charmantes

ou : la physique des particules, belle et charmante

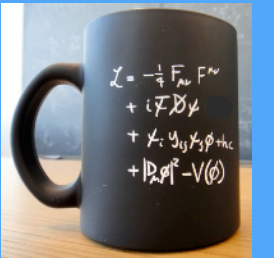
Mat Charles

(Sorbonne Université/LPNHE)

Rappel : Le modèle standard

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

Les particles et leurs propriétés
+
leurs interactions
=
le modèle standard



Modèle effectif ayant **plusieurs lacunes connues**, mais très prédictif, et qui fonctionne un peu trop bien.

- **Asymétrie matière-antimatière de l'univers** ; gravitation ; énergie noire ; matière noire ; masses des neutrinos ; paramètres arbitraires ; hiérarchie d'échelles inexpliquée

Le charme, la beauté

Aujourd'hui : autour de particules contenant de quarks **c** ou **b** :

QUARKS	mass → charge → spin →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 H Higgs boson
		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	0 1 Z Z boson	
LEPTONS		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	GAUGE BOSONS

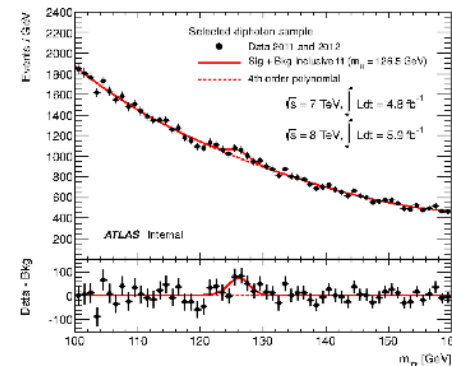
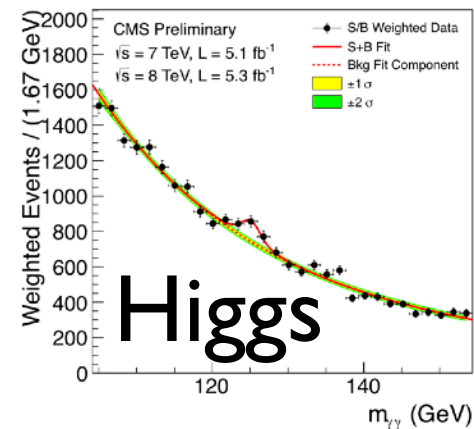
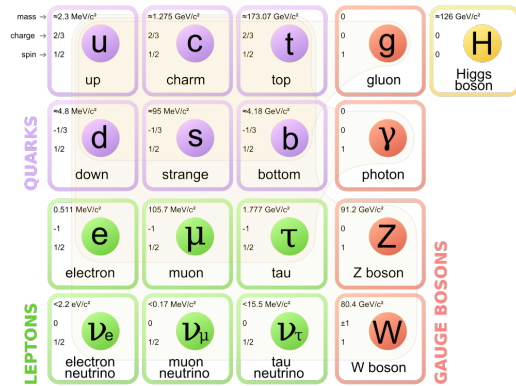
En pratique (confinement), on étudie des hadrons, principalement
baryons (qqq) et antibaryons ($\bar{q}\bar{q}\bar{q}$) -- comme le proton (uud)
mésons ($q\bar{q}$)

Et ça nous convient ! Physique plus riche.

La physique des particules

.....▶ 1970s▶ 2012

et depuis ?



1979

Modèle Standard

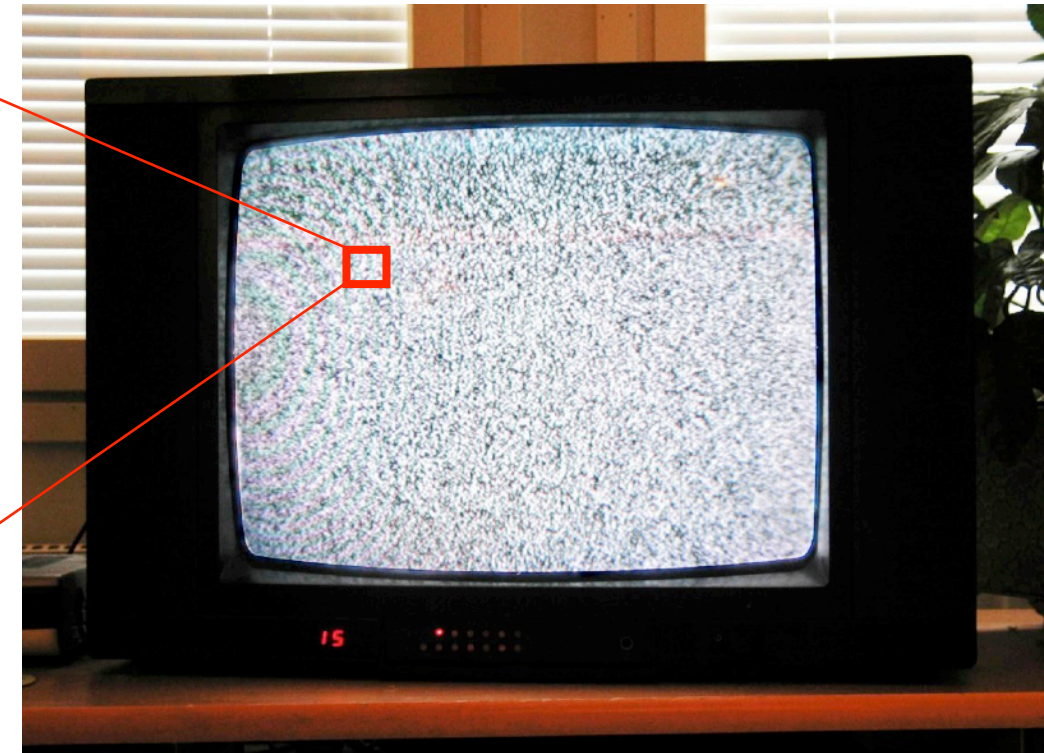
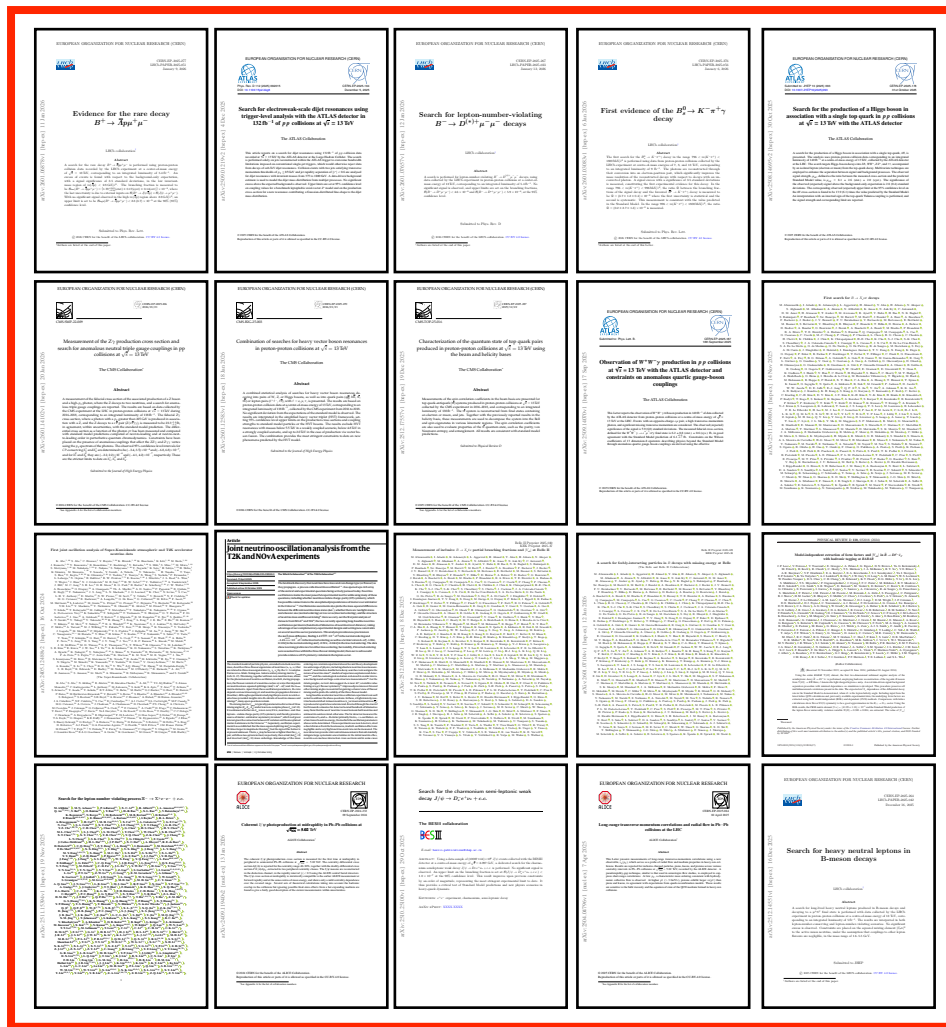


2013



La physique des particules

et depuis ?



- Aucune nouvelle particule élémentaire, mais **une progression continue**.
- Nous développons nos **connaissances** dans le cadre du MS
 - Nous faisons des **tests du MS** de plus en plus précis
 - Plusieurs percées, découvertes, et résultats marquants ($g - 2$, oscillations (et CP?) de neutrinos, tetra+pentaquarks, couplages Hff , ...)

Stratégie

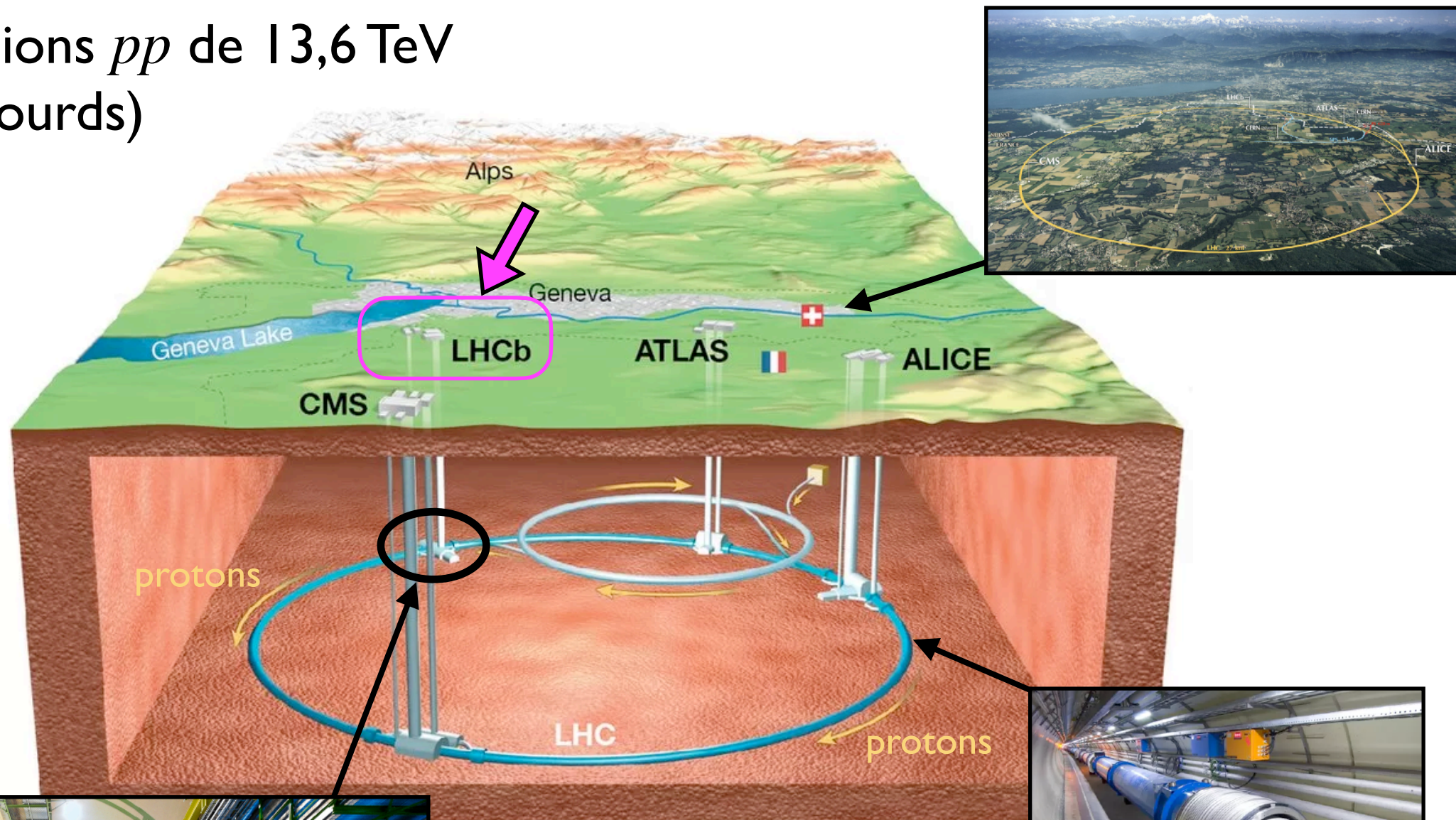
Trois approches complémentaires :

- Mesures et découvertes de **physique** qui rentre dans le cadre **du Modèle Standard**
- **Mesures de précision** de processus permis par le MS, mais **sensibles à de nouveaux phénomènes** (NP) au delà du MS
- Mesures d'observables censées être **strictement nulles** **dans le MS**

Nous verrons **quelques exemples** parmi de nombreux résultats expérimentaux du domaine.

Avec quel appareil ?

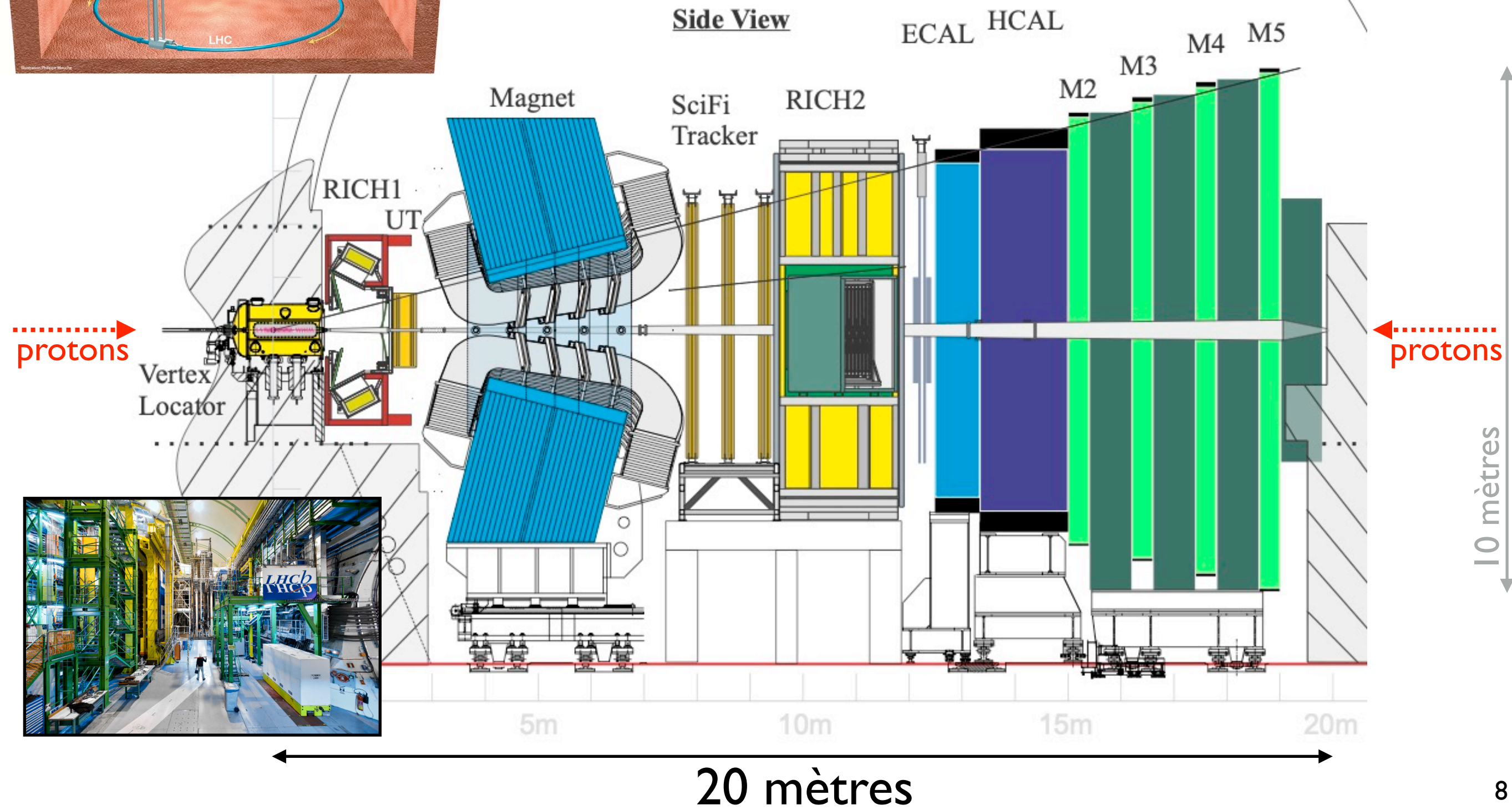
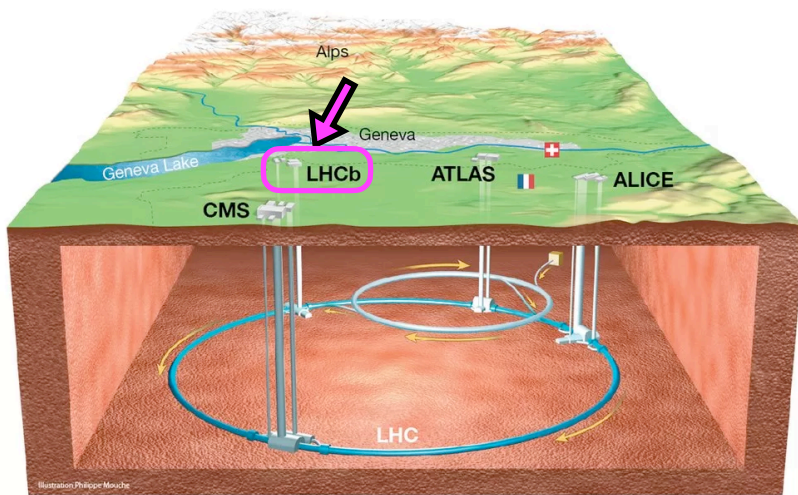
LHC : collisions pp de 13,6 TeV
(ou d'ions lourds)



LHCb : un détecteur et une grande
collaboration internationale...

LHCb : détecteur

Conçu pour les études de hadrons lourds : $b\bar{q}$, bqq , $c\bar{q}$, cqq , ...



LHCb : collaboration



Une fraction des membres de LHCb

⇒ Un **détecteur** et une grande **collaboration** internationale.

LHCb comprend aujourd'hui 1839 membres dont environ 1130 physiciens de 108 instituts de 27 pays. Nous avons publié 795 articles (plus 27 en revue).

Le ou la **Physics Coordinator** est responsable de la production scientifique de la collaboration. J'étais élu PC en 2018 (mandat de deux ans).

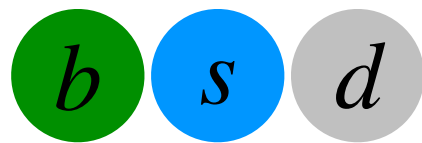
Stratégie

Trois approches complémentaires :

- Mesures et découvertes de physique qui rentre dans le cadre du Modèle Standard
- Mesures de précision de processus permis par le MS, mais sensibles à de nouveaux phénomènes (NP) au delà du MS
- Mesures d'observables censées être strictement nulles dans le MS

Études de hadrons

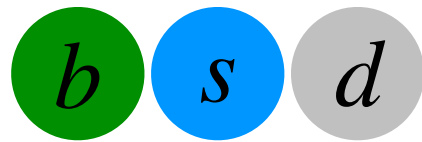
- Comment étudier des quarks, si on ne peut pas les produire en isolation ? Les propriétés de hadrons !
- Dont : spectroscopie hadronique.
- Connexion profonde à la nature des quarks, à la théorie des groupes, et à la MQ. Par exemple :



Combien de particules $\Xi_b^- (bsd)$ distinctes sans excitation orbitale ni radiale existent ?

Astuce : les quarks sont de spin $1/2$

Les baryons Ξ_b^- (bsd)



Combien de particules Ξ_b^- (bsd) distinctes sans excitation orbitale ni radiale existent ?

- Quarks = fermions $\Rightarrow$ Fonction d'onde antisymétrique sous échange
 $|\psi\rangle = |\psi_{\text{spatiale}}\rangle |\psi_{\text{spin}}\rangle |\psi_{\text{savoir}}\rangle |\psi_{\text{couleur}}\rangle$
- Spatiale symétrique ($L=0$), couleur antisymétrique (QCD)
 $\Rightarrow$ (spin x saveur) forcément symétrique. On peut décomposer en $b+(sd)$:

sd diquark: $(\uparrow\downarrow)$

Ξ_b^-

bsd : $\uparrow(\uparrow\downarrow)$

diquark spin 0
total : $1/2 + 0 = 1/2$

État fondamental,
découvert en 2007.

What do we expect for masses of ground-state b-baryons?
 Assume the following mass formula (see Rosner & Gershtein 1981):

$$M = \sum m_i + a^2 \sum_{i < j} \frac{S_{ij}}{m_i m_j}$$
 where the indices i, j run over the three valence quarks in the baryon and m_i, S_{ij} are the mass and spin of the i quarks, a^2 is a constant (quark mass, not baryon mass).
 The masses of the three Ξ_b ground states are given by:

$$m(\Xi_b) = (m_b + m_s + m_d) + \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_b m_s} + \frac{1}{m_b m_d} + \frac{1}{m_s m_d} \right]$$

$$m(\Xi_b^*) = (m_b + m_s + m_d) + \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_b m_s} + \frac{2}{m_b m_d} + \frac{2}{m_s m_d} \right]$$

$$m(\Xi_b^{**}) = (m_b + m_s + m_d) + \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_b m_s} + \frac{1}{m_b m_d} + \frac{1}{m_s m_d} \right]$$
 So the splittings are:

$$m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_b m_s} + \frac{2}{m_b m_d} + \frac{2}{m_s m_d} - \frac{1}{m_b m_s} - \frac{1}{m_b m_d} - \frac{1}{m_s m_d} \right]$$

$$m(\Xi_b^{**}) - m(\Xi_b) = \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_b m_s} + \frac{1}{m_b m_d} + \frac{1}{m_s m_d} - \frac{1}{m_b m_s} - \frac{1}{m_b m_d} - \frac{1}{m_s m_d} \right]$$
 We can relate these to similar splittings in the charm & strange sectors:

$$m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c) = \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_c m_s} + \frac{2}{m_c m_b} + \frac{2}{m_s m_b} - \frac{1}{m_c m_s} - \frac{1}{m_c m_b} - \frac{1}{m_s m_b} \right] \leftarrow \text{experiment: } 69.5 \text{ MeV}$$

$$m(\Xi_c^{**}) - m(\Xi_c) = \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_c m_s} + \frac{1}{m_c m_b} + \frac{1}{m_s m_b} - \frac{1}{m_c m_s} - \frac{1}{m_c m_b} - \frac{1}{m_s m_b} \right] \leftarrow \text{experiment: } 215.1 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{2}{3} [m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c)] - \frac{2}{3} \frac{m_b}{m_c} [m(\Xi_c^{**}) - m(\Xi_c^*)] \\ m(\Xi_b^{**}) - m(\Xi_b) = \frac{2}{3} [m(\Xi_c^{**}) - m(\Xi_c)] + \frac{2}{3} \frac{m_b}{m_c} [m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c)] \end{cases}$$
 To get m_c/m_b , look at the $\Sigma^+ - \Sigma$ splitting:

$$m(\Sigma_c^*) - m(\Sigma_c) = \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_c m_u} + \frac{2}{m_c m_d} + \frac{2}{m_u m_d} - \frac{1}{m_c m_u} - \frac{1}{m_c m_d} - \frac{1}{m_u m_d} \right] \leftarrow \text{experiment: } 64.3 \text{ MeV}$$

$$m(\Sigma_c^{**}) - m(\Sigma_c) = \frac{a^2}{4} \left[\frac{1}{m_c m_u} + \frac{1}{m_c m_d} + \frac{1}{m_u m_d} - \frac{1}{m_c m_u} - \frac{1}{m_c m_d} - \frac{1}{m_u m_d} \right] \leftarrow \text{experiment: } 21.2 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{2}{3} [21.2 \text{ MeV}] - \frac{2}{3} [0.33] [64.3 \text{ MeV}] = 12.8 \text{ MeV} \\ m(\Xi_b^{**}) - m(\Xi_b) = \frac{2}{3} [21.2 \text{ MeV}] + \frac{2}{3} [0.33] [64.3 \text{ MeV}] = 15.1 \text{ MeV} \end{cases}$$
 cf. CMS observation at $(m_{\Xi_b^{**}} - m_{\Xi_b}) = 15.4 \pm 4 \text{ MeV}$ above $m(\Xi_b)$
 - consistent with expectation for $3^+ \rightarrow 3/2^+ \Xi_b^{**}$.

Calcul de septembre 2013
(constituent quark model)

sd diquark: $(\uparrow\uparrow)$

$\Xi_b'^-$

bsd : $\downarrow(\uparrow\uparrow)$

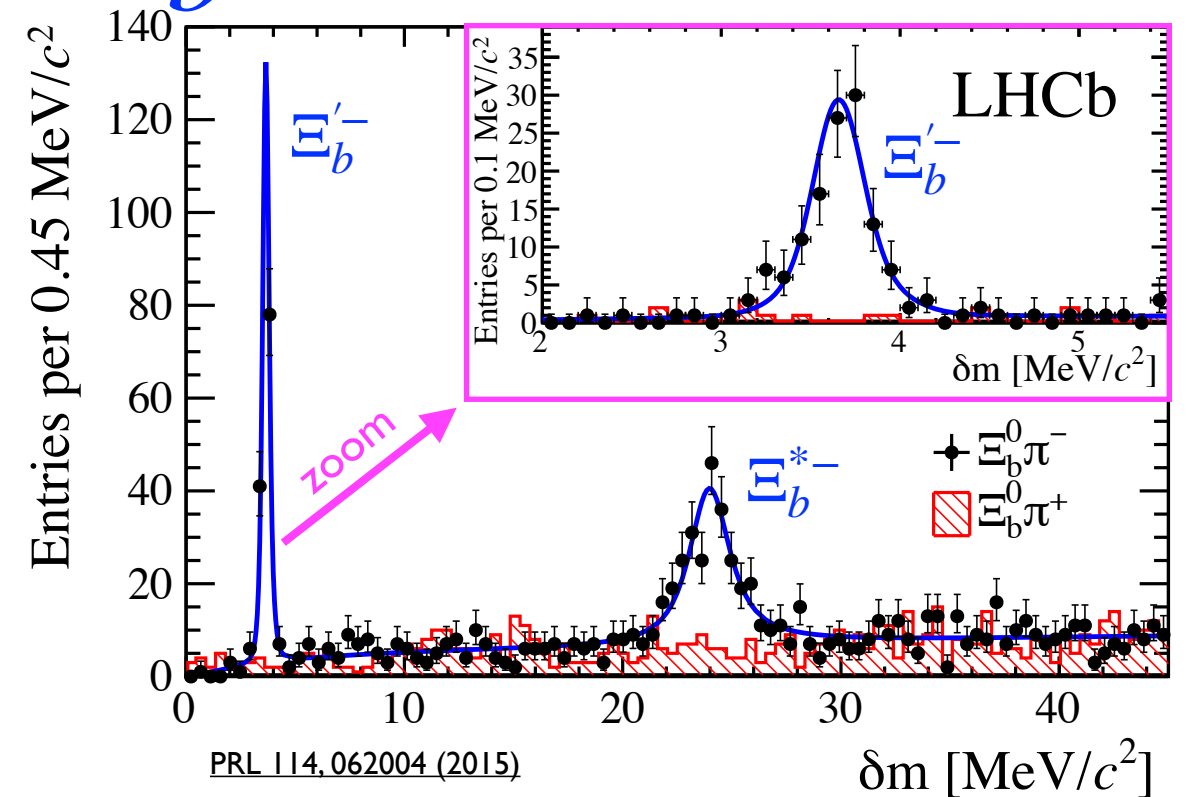
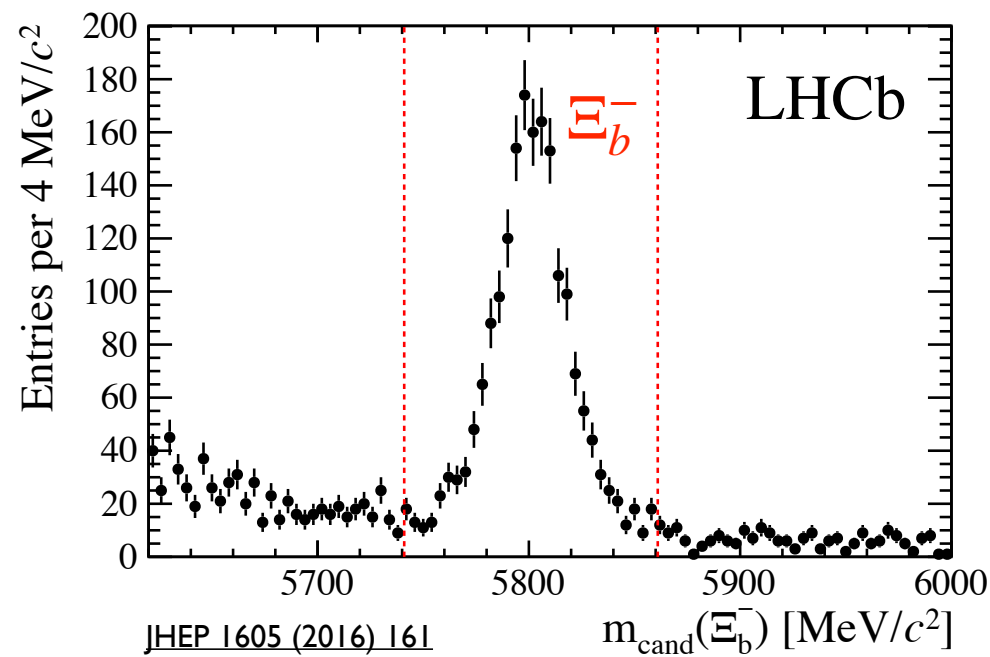
Ξ_b^{*-}

bsd : $\uparrow(\uparrow\uparrow)$

diquark spin 1
total : spin : $1/2 + 1 = \{1/2, 3/2\}$

Deux états nouveaux,
pas encore connus à l'expérience

Les baryons Ξ_b^- (bsd)



sd diquark: ($\uparrow\downarrow$)

Ξ_b^-

bsd : $\uparrow(\uparrow\downarrow)$

diquark spin 0
total : $1/2 + 0 = 1/2$

sd diquark: ($\uparrow\uparrow$)

$\Xi_b'^-$

bsd : $\downarrow(\uparrow\uparrow)$

diquark spin 1
total : spin : $1/2 + 1 = \{1/2, 3/2\}$

Ξ_b^{*-}

bsd : $\uparrow(\uparrow\uparrow)$

What do we expect for masses of ground-state b-baryons?
Assume the following mass formula (see Renshaw & Gershtein 1981):
$$M = \sum_i m_i + a' \sum_{i,j} \frac{\vec{s}_i \cdot \vec{s}_j}{m_i m_j}$$
where the indices i, j run over the three valence quarks in the baryon and $m_i, \vec{s}_i$ are the mass and spin of the i quark. (a.b. constituent quark mass, not bare mass)
The masses of the three Ξ_b ground states are given by:
$$m(\Xi_b) = (m_b + m_s + m_u) + \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{-3}{m_u m_s} \right]$$
$$m(\Xi_b') = (m_b + m_s + m_u) + \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{1}{m_u m_s} - \frac{2}{m_u m_b} - \frac{2}{m_s m_b} \right]$$
$$m(\Xi_b^*) = (m_b + m_s + m_u) + \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{1}{m_u m_s} + \frac{1}{m_u m_b} + \frac{1}{m_s m_b} \right]$$
So the splittings are:
$$m(\Xi_b') - m(\Xi_b) = \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{1}{m_u m_s} - \frac{2}{m_u m_b} - \frac{2}{m_s m_b} \right]$$
$$m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{1}{m_u m_s} + \frac{1}{m_u m_b} + \frac{1}{m_s m_b} \right]$$
We can relate these to similar splittings in the charm & strange sectors:
$$m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c) = \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{3}{m_u m_s} + \frac{3}{m_s m_c} \right] \leftarrow \text{experiment: } 69.5 \text{ MeV}$$
$$m(\Xi_c') - m(\Xi_c) = \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{1}{m_u m_s} - \frac{2}{m_u m_c} - \frac{2}{m_s m_c} \right] \leftarrow \text{experiment: } 215.1 \text{ MeV}$$
$$\Rightarrow \begin{cases} m(\Xi_b') - m(\Xi_b) = \frac{3}{5} [m(\Xi_c') - m(\Xi_c)] - \frac{3}{5} \frac{m_b}{m_c} [m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c)] \\ m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{3}{5} [m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c)] + \frac{3}{5} \frac{m_b}{m_c} [m(\Xi_c') - m(\Xi_c)] \end{cases}$$
To get m_c/m_b , look at the $\Sigma^+ - \Sigma$ splitting:
$$m(\Sigma_c^*) - m(\Sigma_c) = \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{6}{m_u m_s} \right] \leftarrow \text{experiment: } 64.3 \text{ MeV}$$
$$m(\Sigma_c') - m(\Sigma_c) = \frac{a' b^2}{4} \left[\frac{1}{m_u m_s} - \frac{2}{m_u m_c} - \frac{2}{m_s m_c} \right] \leftarrow \text{experiment: } 21.2 \text{ MeV}$$
$$\Rightarrow \begin{cases} m(\Xi_b') - m(\Xi_b) = \frac{3}{5} [215.1 \text{ MeV}] - \frac{3}{5} [0.33] [69.5 \text{ MeV}] = 128.1 \text{ MeV} \\ m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{3}{5} [215.1 \text{ MeV}] + \frac{3}{5} [0.33] [69.5 \text{ MeV}] = 151.0 \text{ MeV} \end{cases}$$
(cf. CMS observation at $(m_b + m_s + m_u) = 1540 \pm 4 \text{ MeV}$ above $M(\Xi_b)$)
→ consistent with expectation for $3^+ \rightarrow 3/2^+ \Xi_b^*$

Calcul de septembre 2013
(constituent quark model)

État fondamental,
découvert en 2007.

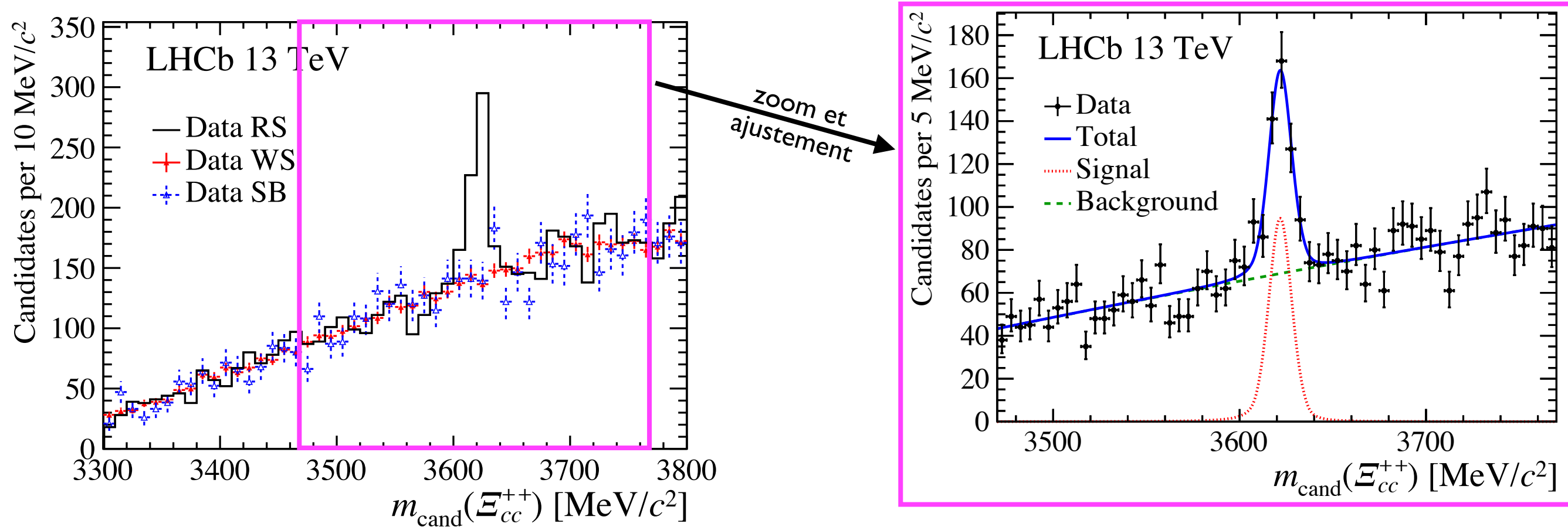
Deux états nouveaux,
découverts par nous en 2014.

Le baryon Ξ_{cc}^{++} (ccu)

- Plusieurs baryons connus à l'expérience
 - ... dont, entre autres, les baryons Ξ (ssu/ssd) et Ω (sss)
- Selon le modèle des quarks, toutes combinaisons des quarks $\{u, d, s, c, b\}$ doivent exister.
- Cependant, **aucun baryon qqq contenant deux quarks lourds (b ou c) n'était connu jusqu'en 2017*** !
 - Faux positif de Ξ_{cc}^+ par la collaboration SELEX in 2002 avec de propriétés peu plausibles, non-confirmé par nous en 2013, mais difficile à exclure formellement sans observer un Ξ_{cc} JHEP 1312 (2013) 090
- Observation très souhaitable :
 - Reconfirmation du modèle des quarks, pour de raisons scientifiques
 - Input aux modèles et calculs de QCD...
... notamment de hadrons exotiques : structure de $cc(q) \sim cc(\bar{q}\bar{q})$

* Mais un cousin : la résonance pentaquark exotique P_c^+ ($c\bar{c}uud$) découvert par LHCb en 2015

Le baryon Ξ_{cc}^{++} (ccu)



JHEP 1312 (2013) 090

- Et voilà ! $N_{\text{sig}} = 313 \pm 33$; signification $> 12\sigma$
- Découvert par nous en 2017, exploitant les données LHCb de 2016, profitant de plusieurs améliorations du système de déclenchement, lecture, et analyse prompte (RTA).
- Durée de vie $\gg 0$ (désintégration faible). Masse enfin mesurée :

$$m(\Xi_{cc}^{++}) = 3621.40 \pm 0.72 \pm 0.27 \pm 0.14 (\Lambda_c) \text{ MeV}/c^2$$

Stratégie

Trois approches complémentaires :

- Mesures et découvertes de physique qui rentre dans le cadre du Modèle Standard
- Mesures de précision de processus permis par le MS, mais sensibles à de nouveaux phénomènes (NP) au delà du MS
- Mesures d'observables censées être strictement nulles dans le MS

Mesures de précision, sensibles aux NP

- Jargon : transformée de CP (charge, parité). $CP(i) = \bar{i}$
- Asymétrie de CP = les lois de physique traitent différemment particule et antiparticule.
- Le MS permet des asymétries de CP, mais dans un cadre précis et avec un taux global faible.
$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$
- LHCb étudie de nombreuses asymétries de CP, cherchant des incohérences avec le MS.

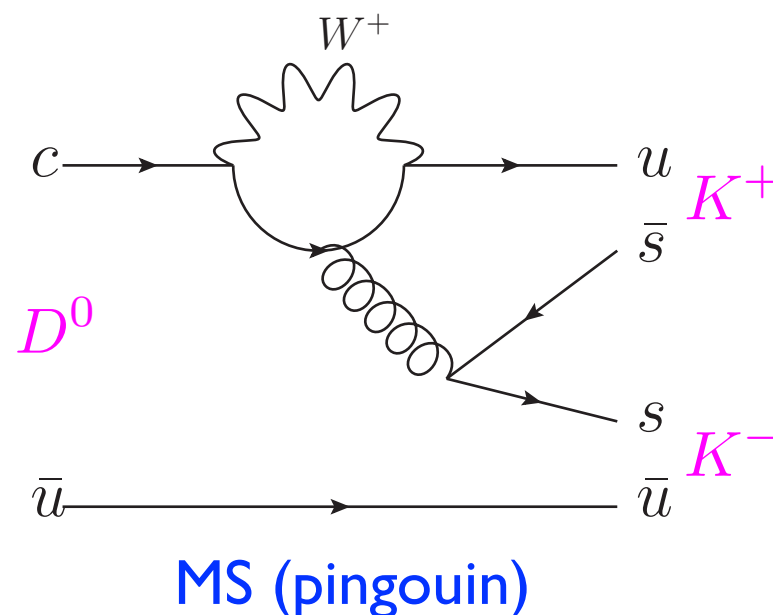
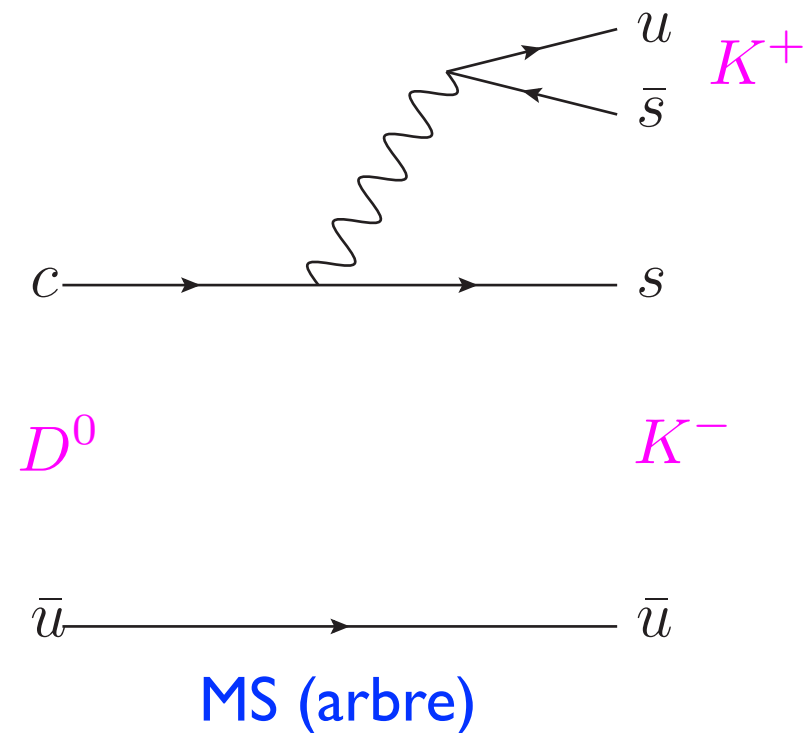
$$\begin{array}{c|c} \text{Processus : } i \rightarrow f & \text{Processus : } \bar{i} \rightarrow \bar{f} \\ \hline \text{MQ : } \langle f | \hat{O} | i \rangle = A & \text{MQ : } \langle \bar{f} | \hat{O} | \bar{i} \rangle = \bar{A} \end{array}$$

Si $|A|^2 \neq |\bar{A}|^2$: violation de la symétrie CP !

$$\text{Notation : asymétrie} = \frac{|A|^2 - |\bar{A}|^2}{|A|^2 + |\bar{A}|^2} \text{ (laissant tomber des facteurs)}$$

Asymétrie de CP : particules charmées

Voici deux désintégrations possibles d'un méson $D^0 = c\bar{u}$



$$D^0 = |c\bar{u}\rangle, \bar{D}^0 = |\bar{c}u\rangle$$

$$\pi^+ = |u\bar{d}\rangle, \pi^- = |d\bar{u}\rangle$$

$$K^+ = |u\bar{s}\rangle, K^- = |s\bar{u}\rangle$$

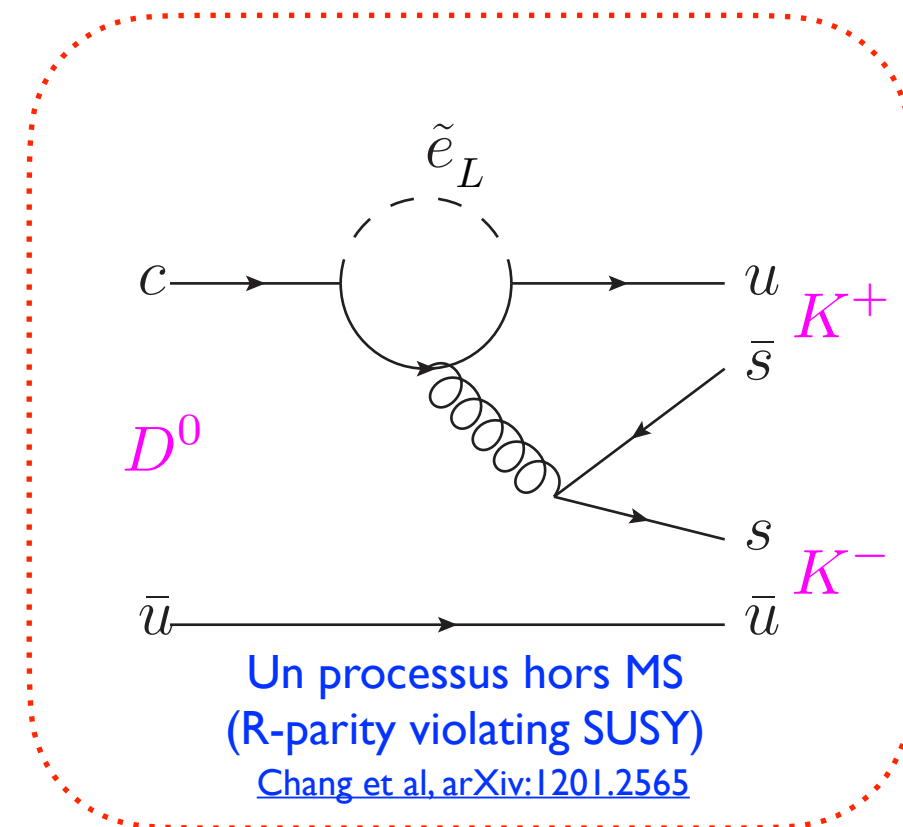
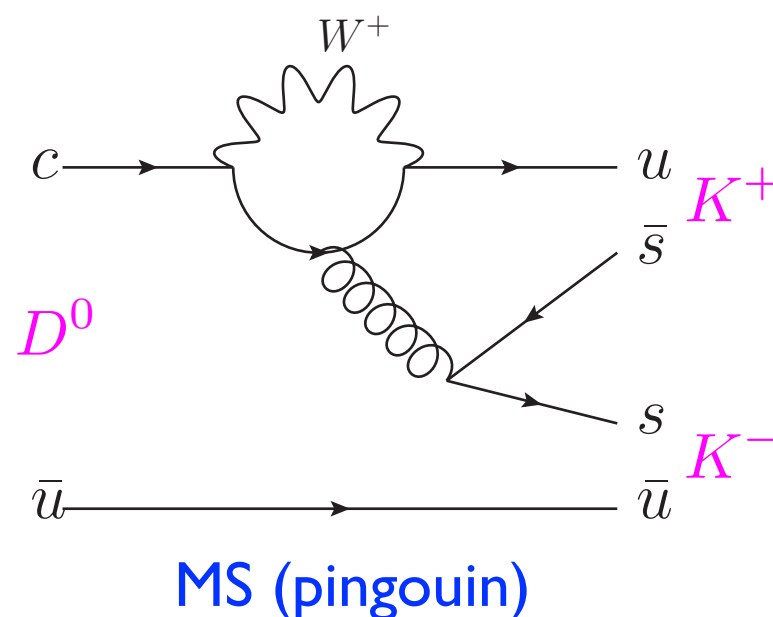
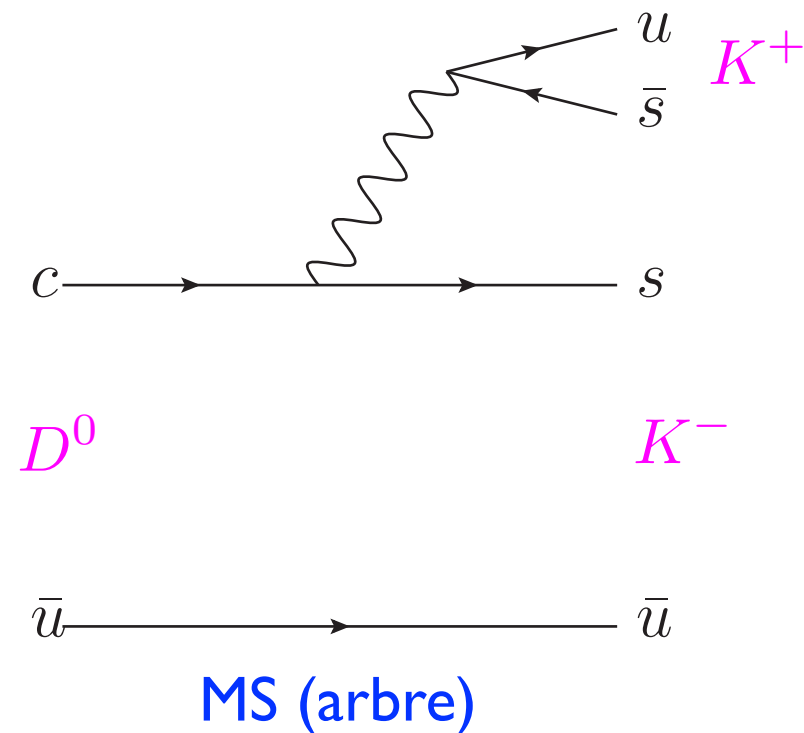
MQ : A est la somme de tous chemins possibles, $A = \sum A_i$

Asymétrie due à une différence de phase. Grosso modo :

$$|A_1 e^{i(\theta + \phi)} + A_2|^2 - |A_1 e^{i(\theta - \phi)} + A_2|^2 \neq 0$$

Asymétrie de CP : particules charmées

Voici **trois** désintégrations possibles d'un méson $D^0 = c\bar{u}$



MQ : A est la somme de tous chemins possibles, $A = \sum A_i$

La présence de **NP** peut modifier l'asymétrie (effet d'interférence).

Questions clés :

- La précision expérimentale, permet-elle à l'observer ?
- La précision théorique, suffise-t-elle à l'identifier ?

Mesures de ΔA_{CP}

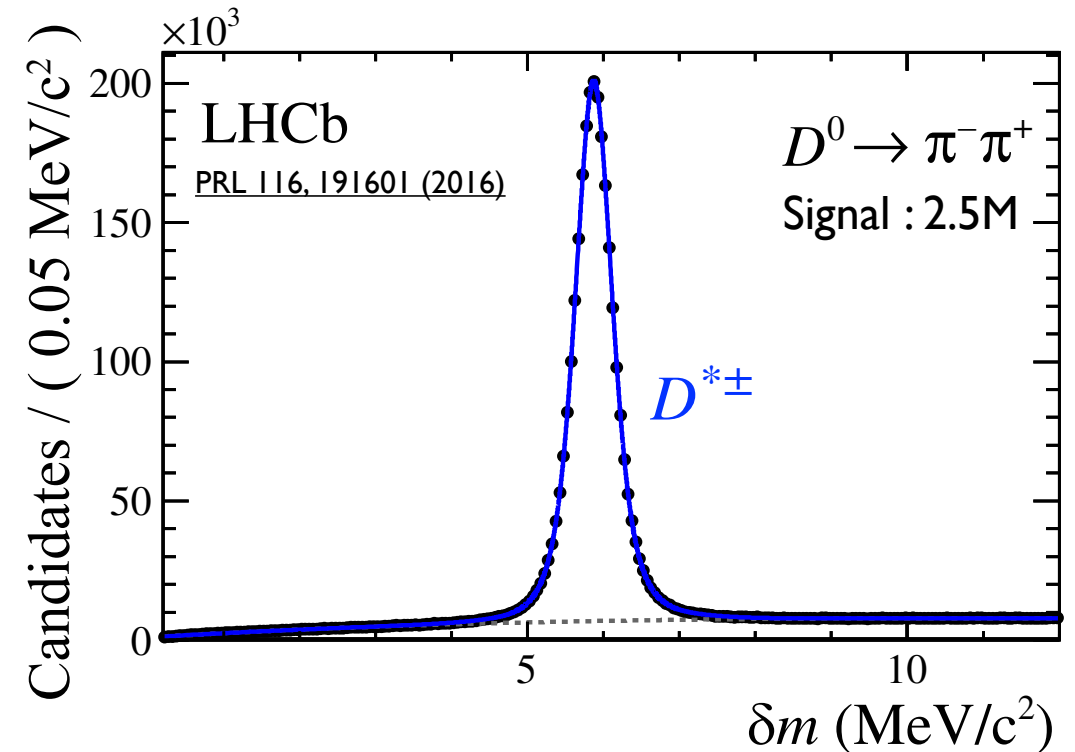
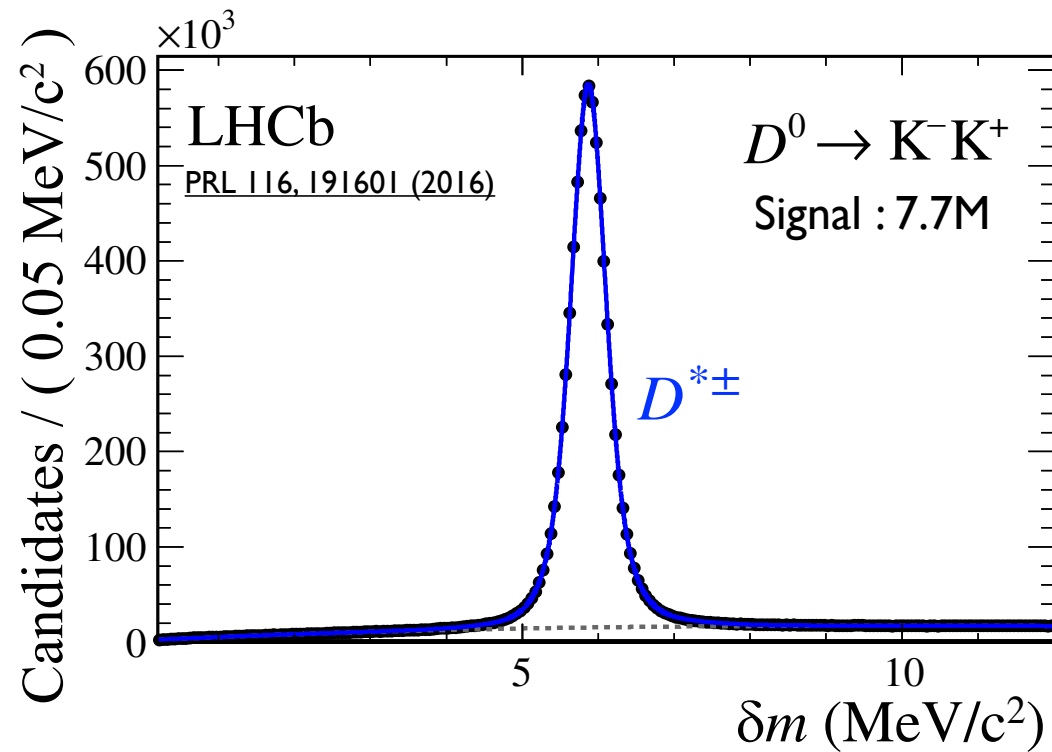
$$A_f = \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow f) - \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(D^0 \rightarrow f) + \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow \bar{f})}$$

- Problème : Comment **distinguer** $D^0 \rightarrow K^- K^+$ de $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ K^-$?
- Solution : Étiquetage via $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$ (ou ...)
- Problème : **Présence d'autres asymétries** de production (D^{*+} vs D^{*-}) et de détection (ε_{π^+} vs ε_{π^-})
- Solution : Mesurer la double différence $\Delta A_{CP} = A_{K^+ K^-} - A_{\pi^+ \pi^-}$

Mesures de ΔA_{CP} de LHCb

- par nous {
- LHCb-CONF-2011-023 : $(-0.28 \pm 0.70 \pm 0.25) \%$ -- 0.037/fb, tag D^{*+}
 - PRL 108 111602 (2012) : $(-0.82 \pm 0.21 \pm 0.11) \%$ -- 0.6/fb, tag D^{*+}
 - LHCb-CONF-2013-003 : $(-0.34 \pm 0.15 \pm 0.10) \%$ -- 1.0/fb, tag D^{*+}
 - PRL 116, 191601 (2016) : $(-0.10 \pm 0.08 \pm 0.03) \%$ -- 3/fb, tag D^{*+}

mandat PC • PRL 122, 211803 (2019) : $(-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$ -- (3+6)/fb, tags D^{*+} , μ : **découverte ! 5.3σ**



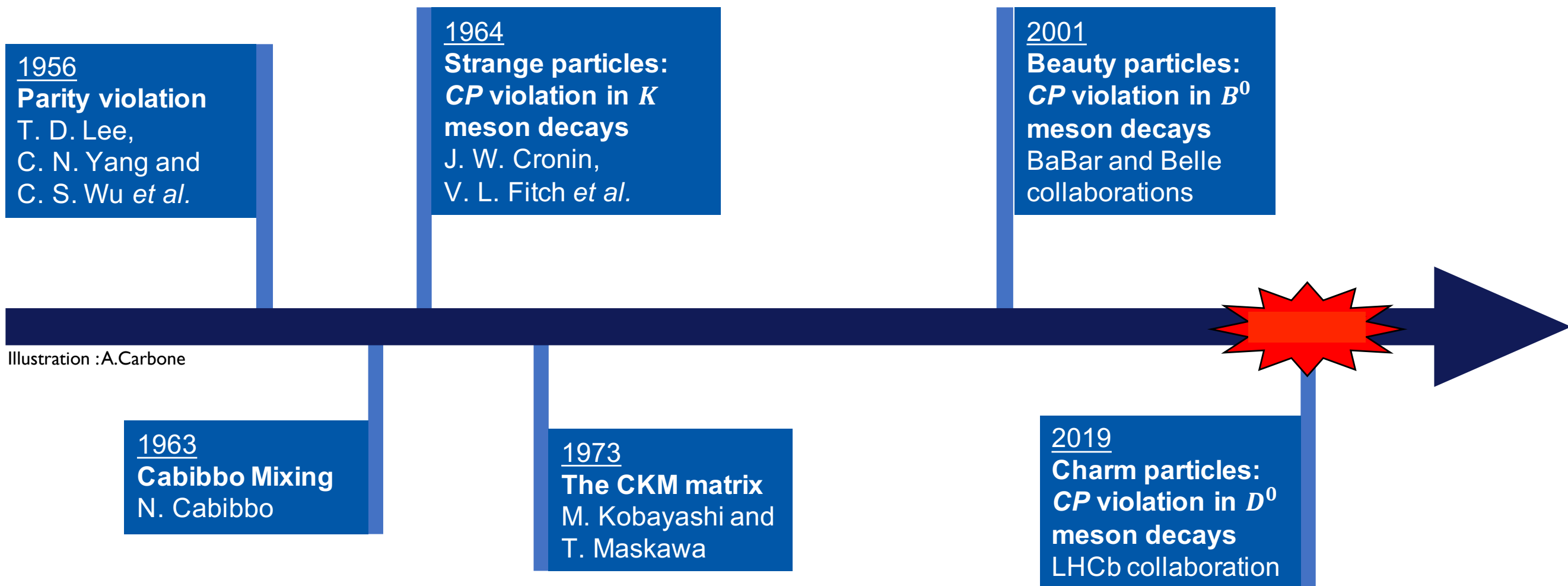
D'autres mesures liées de LHCb, par des collègues :

- PLB 723 (2013), 33 : $(+0.49 \pm 0.30 \pm 0.14) \%$ -- 1/fb, tag muon
- JHEP 07 (2014) 041 : $(+0.14 \pm 0.16 \pm 0.08) \%$ -- 3/fb, tag muon
- PLB 767 (2017), 177 -- 3/fb, tag D^{*+} , A_{K-K^+} isolée
- PRL 131 (2023) 091802 -- 6/fb, tag D^{*+} , A_{K-K^+} isolée

Mesures de ΔA_{CP} de LHCb

- par nous {
- LHCb-CONF-2011-023 : $(-0.28 \pm 0.70 \pm 0.25) \%$ -- 0.037/fb, tag D^{*+}
 - PRL 108 111602 (2012) : $(-0.82 \pm 0.21 \pm 0.11) \%$ -- 0.6/fb, tag D^{*+}
 - LHCb-CONF-2013-003 : $(-0.34 \pm 0.15 \pm 0.10) \%$ -- 1.0/fb, tag D^{*+}
 - PRL 116, 191601 (2016) : $(-0.10 \pm 0.08 \pm 0.03) \%$ -- 3/fb, tag D^{*+}

mandat PC • PRL 122, 211803 (2019) : $(-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4}$ -- (3+6)/fb, tags D^{*+} , μ : découverte ! 5.3σ



Valeur élevée : à voir s'il cache de NP, ou si le MS peut l'expliquer. 22

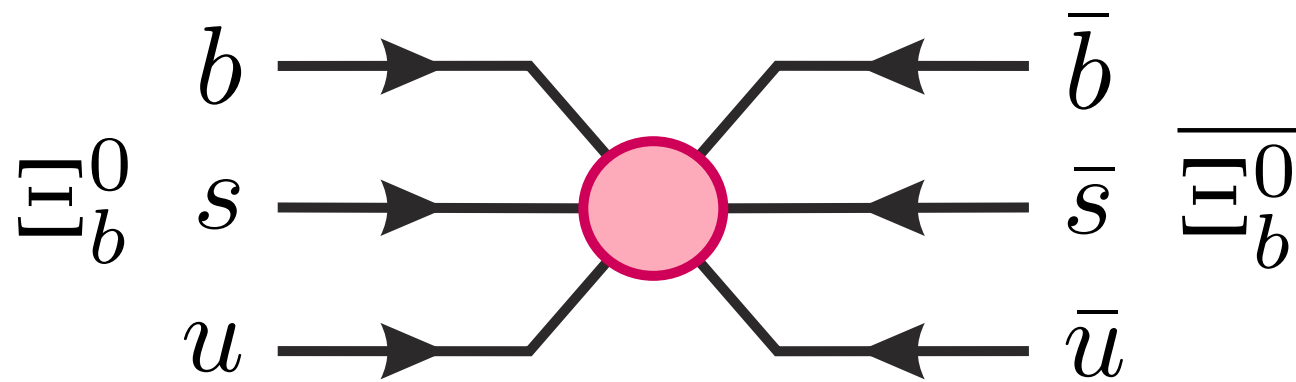
Stratégie

Trois approches complémentaires :

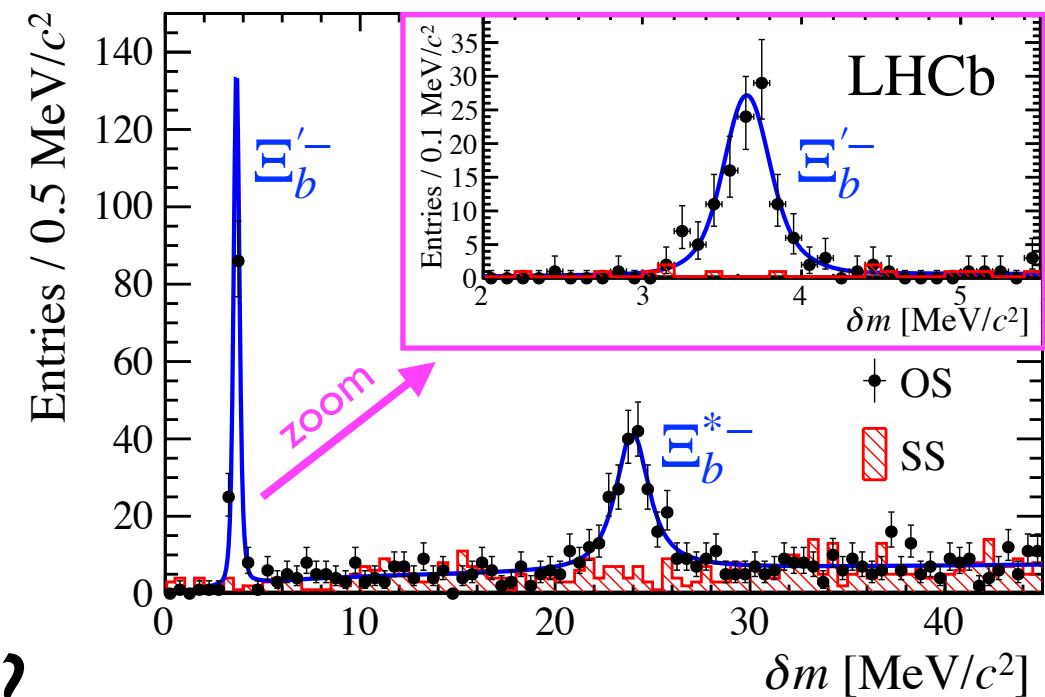
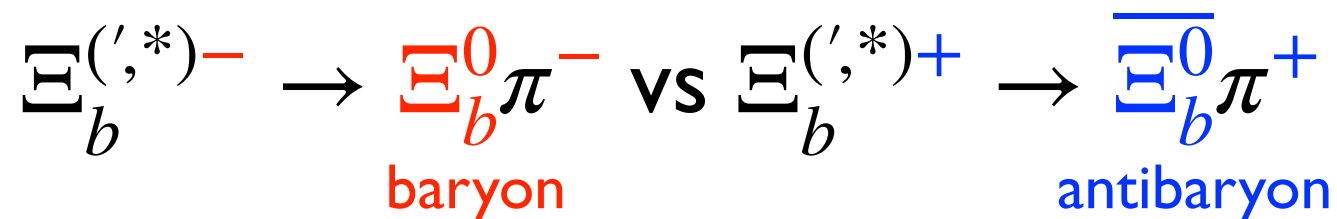
- Mesures et découvertes de physique qui rentre dans le cadre du Modèle Standard
- Mesures de précision de processus permis par le MS, mais sensibles à de nouveaux phénomènes (NP) au delà du MS
- Mesures d'observables censées être strictement nulles dans le MS

Oscillations baryon-antibaryon

- **Non-conservation du nombre net de baryons :** nécessaire (Sakharov) mais jamais observée.
- Mécanisme non testé jusqu'en 2017 : **oscillations de baryons lourds**

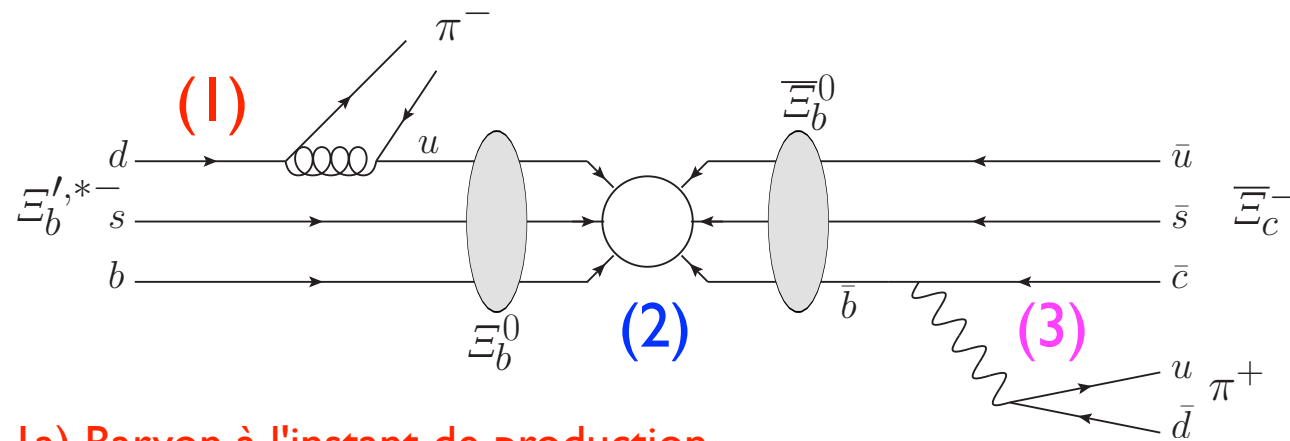


- Il faut distinguer baryon et antibaryon à l'instant de production. Comment faire ?
- Vous vous souvenez des barons $\Xi_b^{(',*)-}$?
- Ils permettent de distinguer Ξ_b^0 de Ξ_b^0 à l'instant de production :

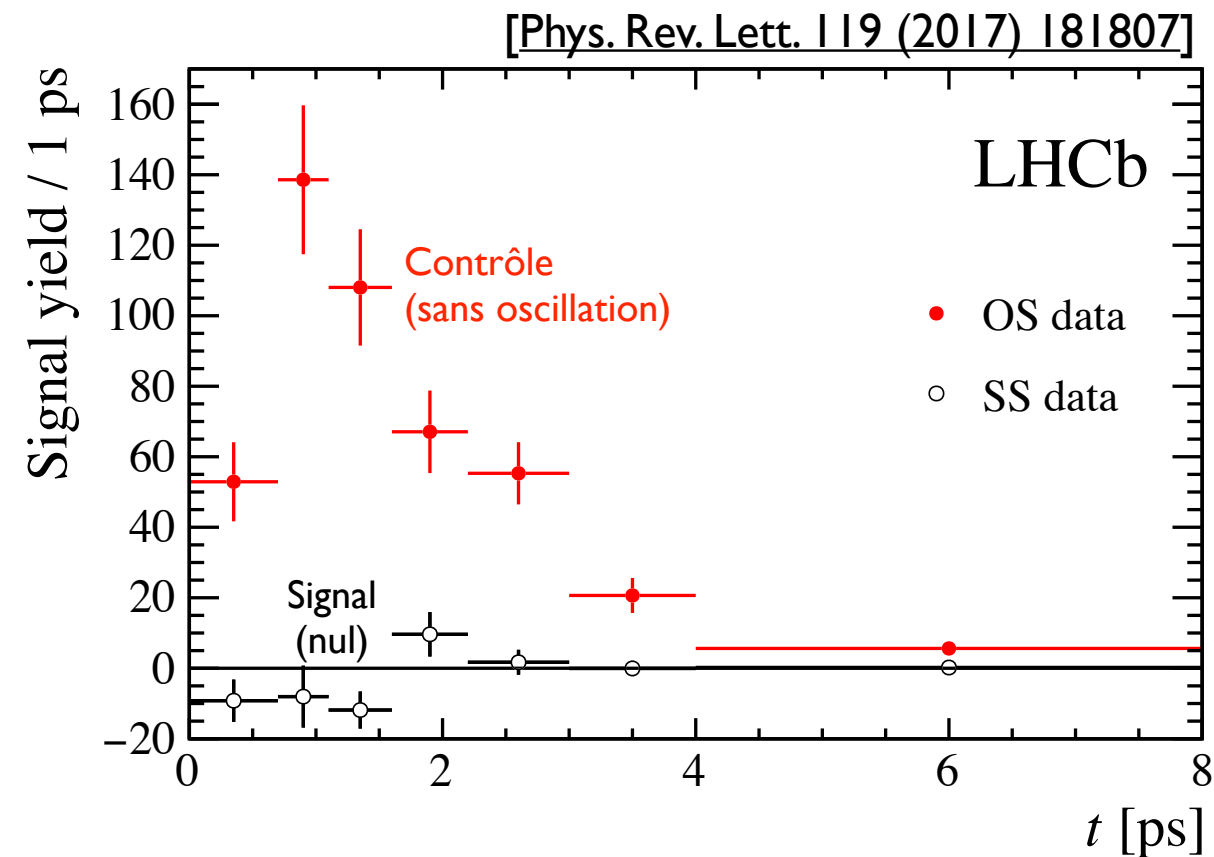


Oscillations baryon-antibaryon

- **Non-conservation du nombre net de baryons :** nécessaire (Sakharov) mais jamais observée.
- Mécanisme non testé jusqu'en 2017 : **oscillations de baryons lourds**

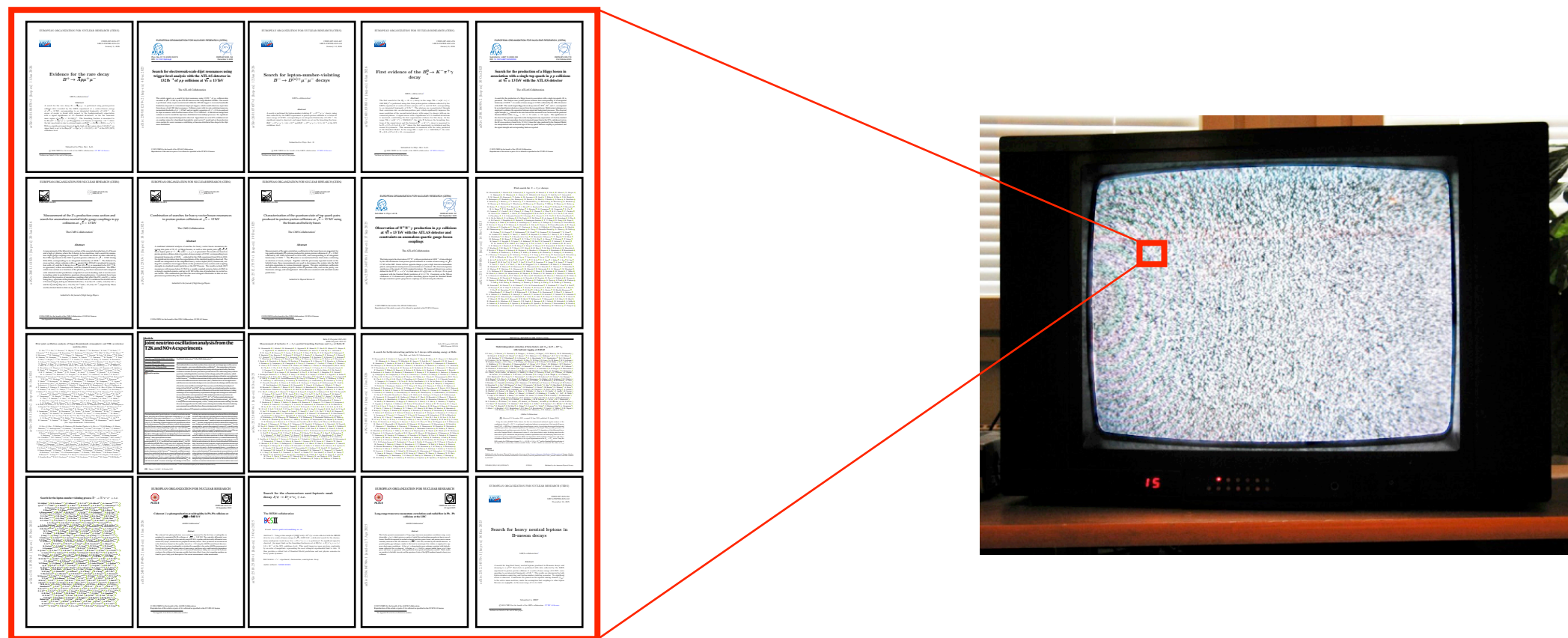


- 1a) Baryon à l'instant de production
 1b) ... identifié via le pion produite en même temps
 2) Oscillation baryon $\rightarrow$ antibaryon
 3a) Antibaryon à l'instant de désintégration
 3b) ... identifié via les charges des produits

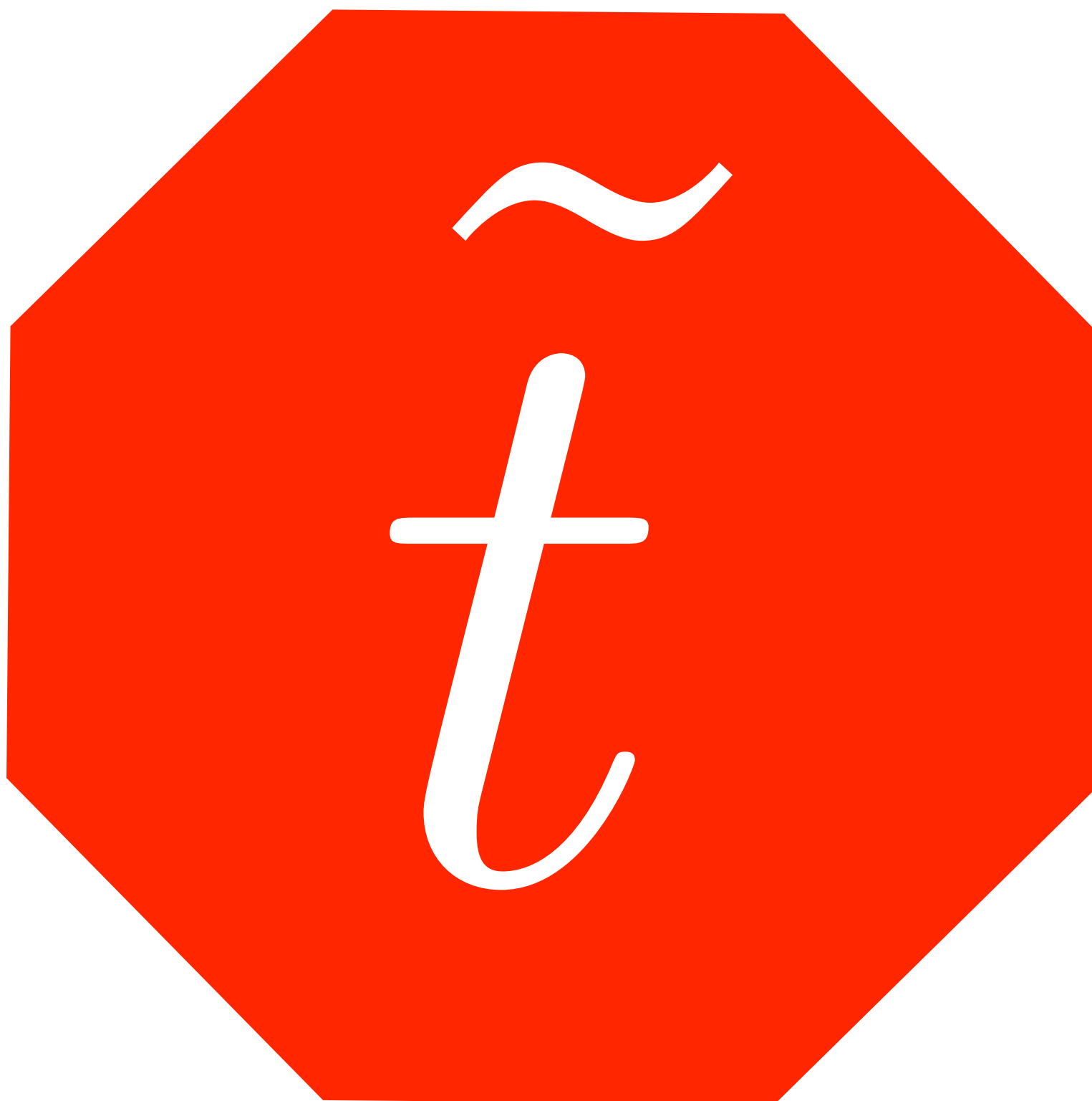


Limite supérieure sur la vitesse angulaire d'oscillations :
 $\omega < 0.08 \text{ ps}^{-1} @ 95\% \text{ CL}$

... et non seulement !



- Je n'ai pas pu parler
 - d'autres études d'**asymétries des CP**, et d'oscillations de mésons
 - de mesures de précision de **désintégrations rares**
 - d'études d'**ions lourds**
 - des découvertes de **pentaquarks**, et de plusieurs **tetraquarks** dont $cc\bar{c}\bar{c}$, ...
- ... et ça c'est seulement **LHCb**, sans parler du reste du domaine !
- Nous vivons une **ère de mesures de précision** de la physique des particules. J'attends avec hâte les prochaines découvertes.



Succès à l'UFR ?

- 1999-2003 : PhD (Oxford)
- 2003 : Postdoc, puis Assistant Research Scientist (Iowa)
- 2008 : STFC Advanced Fellow (Oxford)
- 2013 : MdC (UPMC/SU)
- 2016 : HDR
- 2018-2020 : Physics Coordinateur LHCb ; Attaché Scientifique au CERN
- 2020 : MdC
- 2022 : MdC
- 2023 : MdC
- 2023 : Prix SFP Joliot-Curie
- 2024 : MdC
- 2025 : MdC

What do we expect for masses of ground-state b-baryons?

Assume the following mass formula (see Rosner + Gasiorowicz 1981):

$$M = \sum_i m_i + a' \sum_{i < j} \frac{\vec{S}_i \cdot \vec{S}_j}{m_i m_j}$$

where the indices i, j run over the three valence quarks in the baryon and m_i , $\vec{S}_i$ are the mass and spin of the i th quark. (n.b. constituent quark mass, not bare mass)

The masses of the three Ξ_b ground states are given by:

(assume isospin invariance, $m_u = m_d$)

$$m(\Xi_b) = (m_b + m_s + m_u) + \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{-3}{m_u m_s} \right]$$

$$m(\Xi_b') = (m_b + m_s + m_u) + \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{1}{m_u m_s} - \frac{2}{m_u m_b} - \frac{2}{m_s m_b} \right]$$

$$m(\Xi_b^*) = (m_b + m_s + m_u) + \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{1}{m_u m_s} + \frac{1}{m_u m_b} + \frac{1}{m_s m_b} \right]$$

So the splittings are:

$$m(\Xi_b') - m(\Xi_b) = \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{4}{m_u m_s} - \frac{2}{m_u m_b} - \frac{2}{m_s m_b} \right]$$

$$m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{4}{m_u m_s} + \frac{1}{m_u m_b} + \frac{1}{m_s m_b} \right]$$

We can relate these to similar splittings in the charm & strange sectors:

$$m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c') = \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{3}{m_u m_c} + \frac{3}{m_s m_c} \right] \leftarrow \text{experiment: } 69.5 \text{ MeV}$$

$$m(\Xi^*) - m(\Xi) = \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{6}{m_u m_s} \right] \leftarrow \text{experiment: } 215.1 \text{ MeV}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} m(\Xi_b') - m(\Xi_b) = \frac{2}{3} [m(\Xi^*) - m(\Xi)] - \frac{2}{3} \frac{m_c}{m_b} [m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c')] \\ m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{2}{3} [m(\Xi^*) - m(\Xi)] + \frac{1}{3} \frac{m_c}{m_b} [m(\Xi_c^*) - m(\Xi_c')] \end{cases}$$

To get m_c/m_b , look at the $\Sigma^* - \Sigma$ splitting:

$$\left. \begin{aligned} m(\Sigma_c^*) - m(\Sigma_c) &= \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{6}{m_u m_c} \right] \leftarrow \text{experiment: } 64.3 \text{ MeV} \\ m(\Sigma_b^*) - m(\Sigma_b) &= \frac{a' \hbar^2}{4} \left[\frac{6}{m_u m_b} \right] \leftarrow \text{experiment: } 21.2 \text{ MeV} \end{aligned} \right\} \frac{m_c}{m_b} = 0.33$$

$$\Rightarrow m(\Xi_b') - m(\Xi_b) = \frac{2}{3} [215.1 \text{ MeV}] - \frac{2}{3} [0.33] [69.5 \text{ MeV}] = 128.1 \text{ MeV}$$

$$m(\Xi_b^*) - m(\Xi_b) = \frac{2}{3} [215.1 \text{ MeV}] + \frac{1}{3} [0.33] [69.5 \text{ MeV}] = 151.0 \text{ MeV}$$

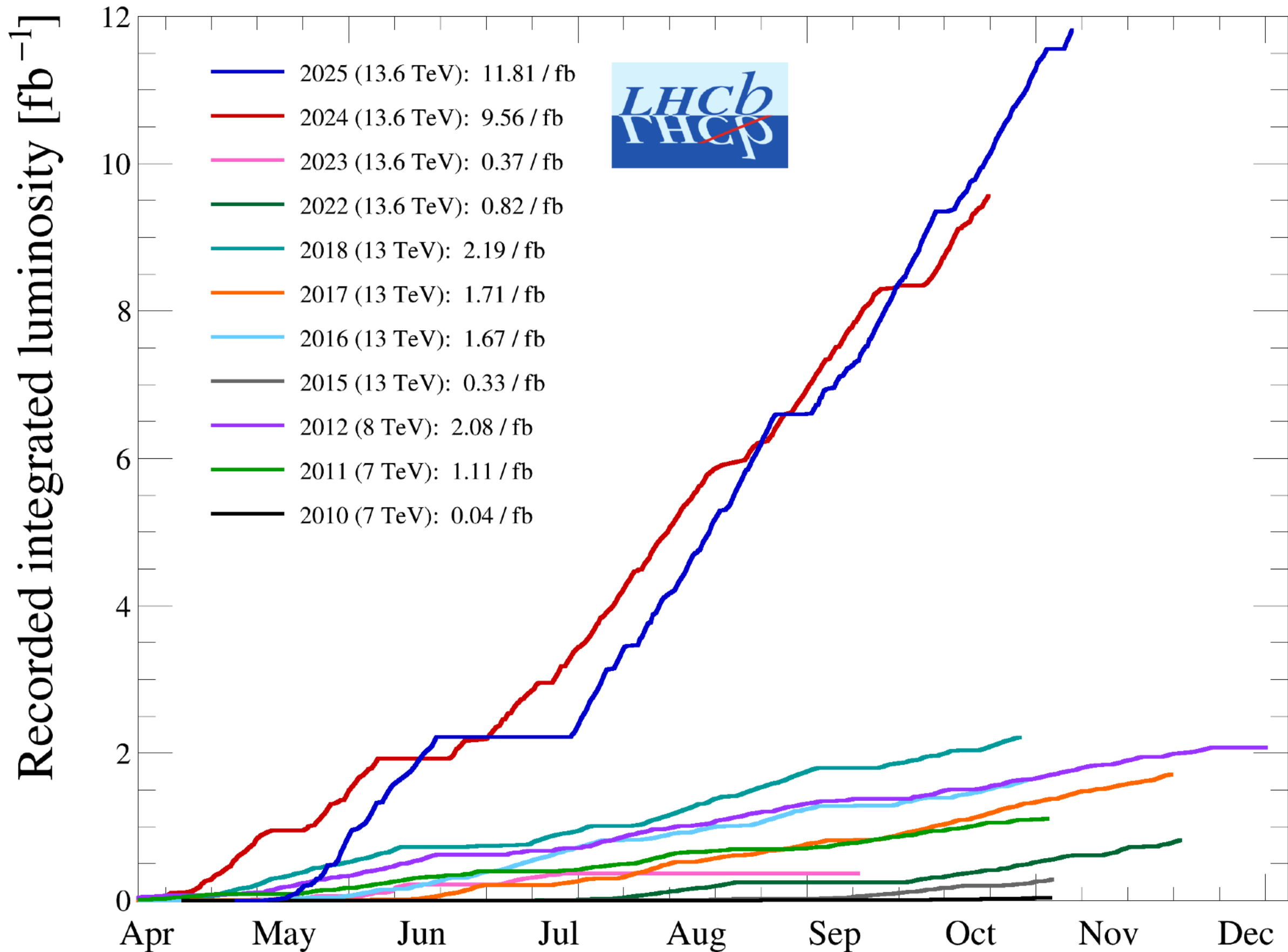
(cf. CMS observation at $(M_\pi + 14.84) \text{ MeV} = 154.4 \text{ MeV}$ above $m(\Xi_b)$
 - consistent with expectation for $J^P = 3/2^+ \Xi_b^*$.)



J'avais raté un point pertinent.
 Pouvez-vous l'identifier ?

- Nature 643 (2025) 1223 : Observation of charge-parity symmetry breaking in baryon decays
 - $\Lambda_b^0 \rightarrow p K^- \pi^+ \pi^- : A_{CP} = (2.45 \pm 0.46 \pm 0.01) \%$
- PRL 131 (2023) 091802 : Measurement of the time-integrated CP asymmetry in $D^0 \rightarrow K^- K^+$ decays
 - $a_{K^- K^+}^d = (7.7 \pm 5.7) \times 10^{-4}$
 - $a_{\pi^- \pi^+}^d = (23.2 \pm 6.1) \times 10^{-4} [\rho = 0.88]$
- Anomalies ($b \rightarrow q \tau \bar{\nu}$) : nouvelles de BABAR ? (Hitlin, FNAL 2025)
- Anomalies ($b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$) :
 - Progrès théorique (PRD 107, 014511, JHEP 09 (2022) 133)
 - arXiv:2512.18053 : $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$ (5D angular+BR)
 - Ajustements globaux : tension importante et significative ?
- PRL 132 (2024) 051802 : $\phi_s = -0.031 \pm 0.018$ rad [LHCb avg]
- PRL 134, 101801 (2025) : CPV en $B^+ \rightarrow J/\psi \pi^+$? (3.2σ)
- Énorme progrès en γ (LHCb-CONF-2025-003)

Total recorded luminosity by year – pp



Total recorded luminosity – pp – 31.7 fb^{-1}

