



Large Hadron Collider beauty experiment

European Organization for Nuclear Research



Visite au CERN pour
étudiants en physique EPFL
13 décembre 2017

Le CERN, le LHC et l'expérience LHCb

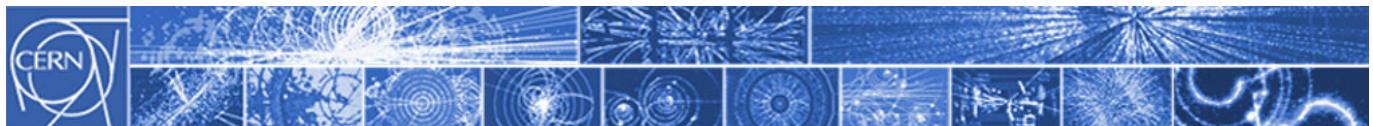
<http://lhcb-public.cern.ch/>

Olivier Schneider



Laboratoire de Physique
des Hautes Energies (LPHE)

<http://lphe.epfl.ch/>



CERN – Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
Laboratoire européen pour la physique des particules

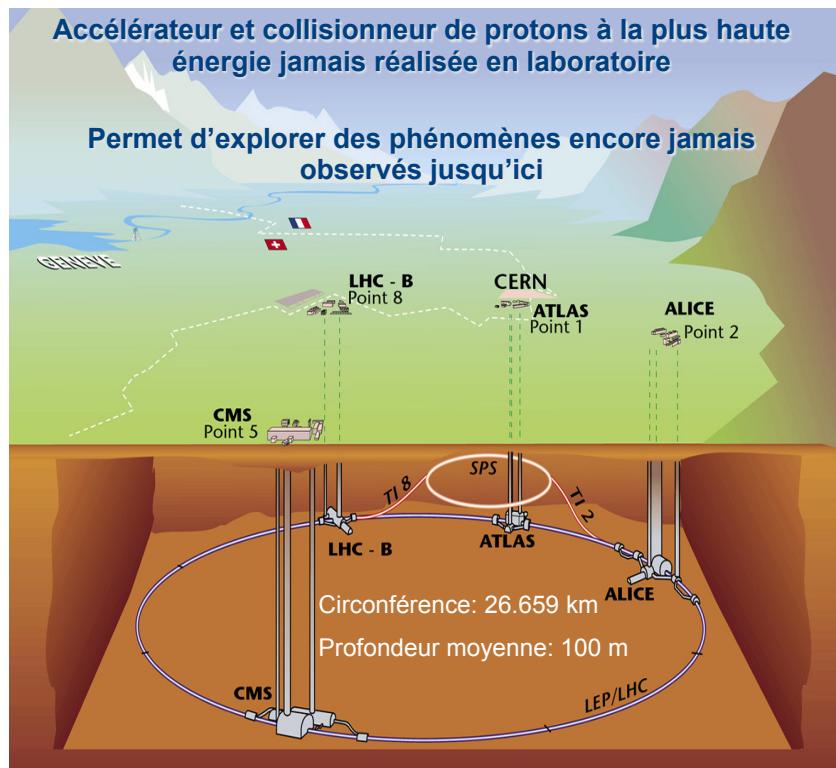
22 états membres + 7 états membres associés + collaboration avec 57 autres pays

12'000 scientifiques (la moitié des physiciens des hautes énergies du monde !)
de 600 instituts et universités utilisent le CERN pour leurs recherches



Recherche fondamentale – Formation et collaboration – Technologie et innovation

LHC – Large Hadron Collider



Un projet scientifique de longue haleine

Conception dans les années 80
(ré-utilisation du tunnel du LEP
= Large Electron Positron Collider)

Construction approuvée en 1994

Construction des quatre grands détecteurs ATLAS, CMS, ALICE et LHCb approuvée de 1996 à 1998

Arrêt du LEP en 2000

Premier faisceau LHC en 2008

Démarrage des expériences à fin 2009

Périodes de prise de données:

- Run 1: 2010–2012 7–8 TeV
- Run 2: 2015–2018 13 TeV
- Run 3: 2021–2023 14 TeV
- HL-LHC: 2027–2035

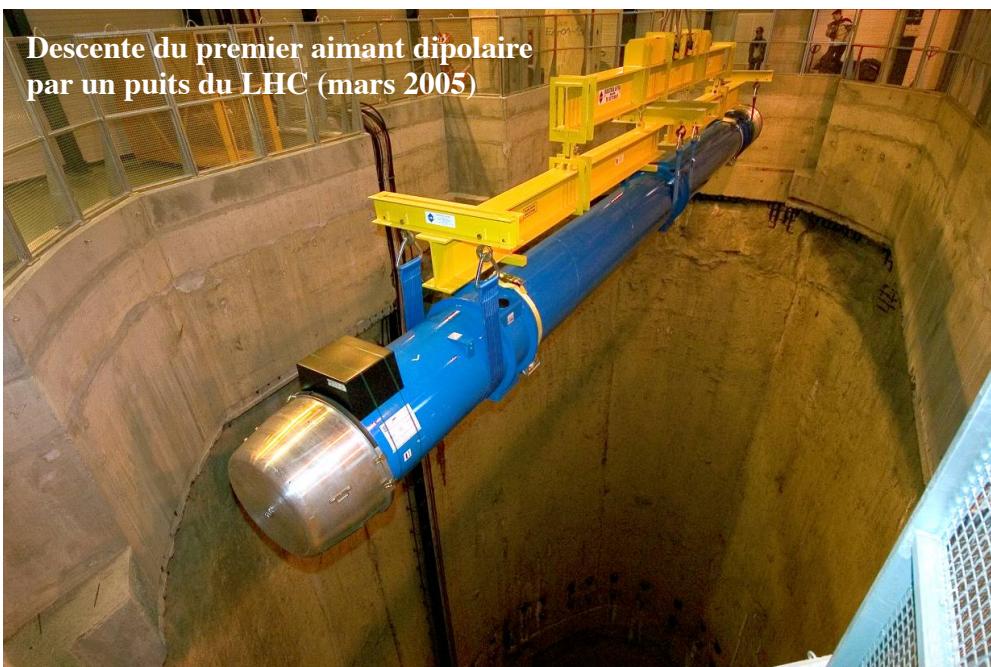
TeV = 10^{12} eV

O. Schneider

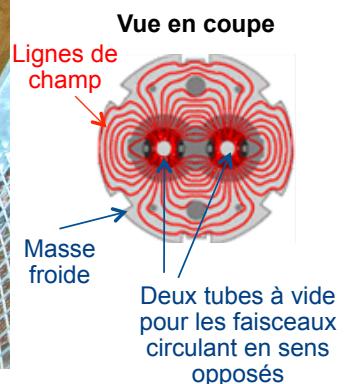
13 décembre 2017

3

Aimants du LHC



9593 électro-aimants dont
1232 aimants dipolaires cryogéniques puissants ($B = 8.3$ T) pour garder les protons sur leur trajectoire circulaire



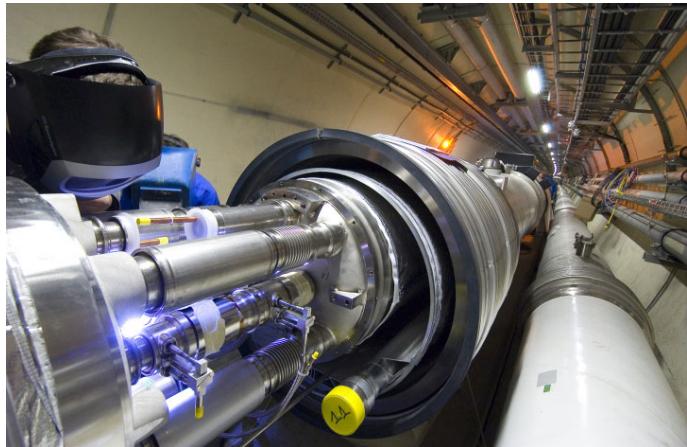
Les aimants dipolaires, de 15 m chacun, occupent ensemble 70% de la circonference du LHC

O. Schneider

13 décembre 2017

4

Le vide le plus poussé du système solaire



Ultra-vide dans les tubes des faisceaux:
pression aussi faible que sur la Lune

O. Schneider

13 décembre 2017

5

Un des endroits les plus froids de l'Univers



Aimants du LHC refroidis à l'hélium superfluide,
plus froid que l'espace interstellaire



Liquide réfrigérant	Quantité nécessaire au LHC	Température	
		degrés Celsius	degrés Kelvin
azote	10'000 t	-195.8 °C	77.4 K
hélium	120 t	-271.3 °C	1.9 K

O. Schneider

13 décembre 2017

6

La course poursuite la plus folle

jamais organisée sur terre



2808 pelotons de protons par faisceau, à 7m les uns des autres ...

100 milliards de protons par peloton ...

plus de 11000 fois le tour du LHC par seconde ...

à 99.999999% de la vitesse de la lumière (1 milliard km/h)

...

Equivalents énergétiques

1 proton du LHC	7 TeV	moustique en vol
faisceau du LHC	350 MJ	TGV de 400 t à 150 km/h

O. Schneider

13 décembre 2017

7

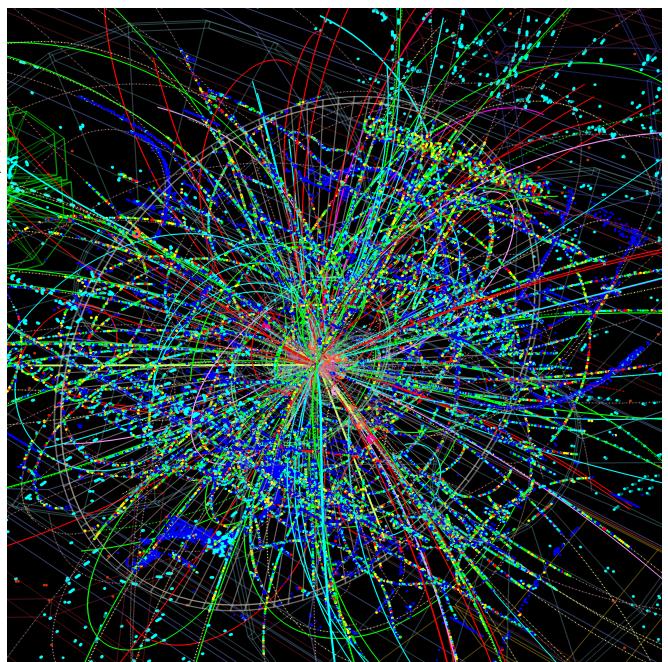
Les points les plus bouillants de notre galaxie

Aux points de collision des faisceaux

- 1 milliard de fois la température au centre du Soleil
- grande densité d'énergie dans un tout petit volume
- création (= matérialisation) de particules, détectées par les expériences

$$E = mc^2$$

énergie = masse



Collision entre un proton et un noyau de plomb enregistrée par ALICE le 13.9.2012

O. Schneider

13 décembre 2017

8

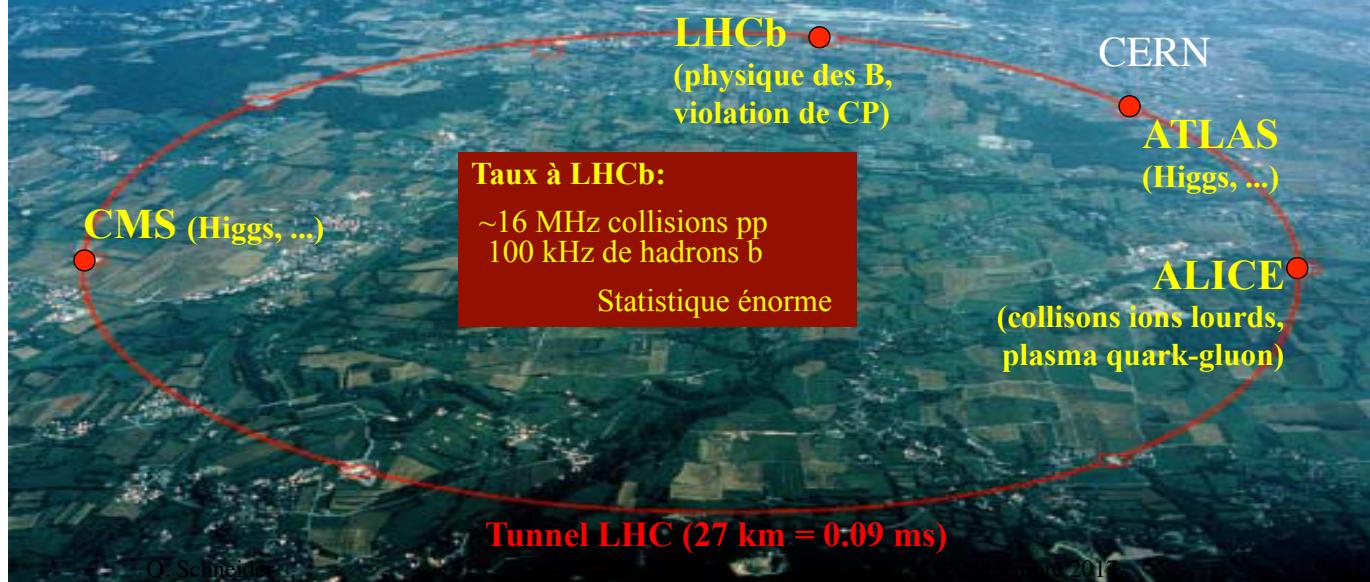
LHC = Large Hadron Collider

Construit pour trouver:

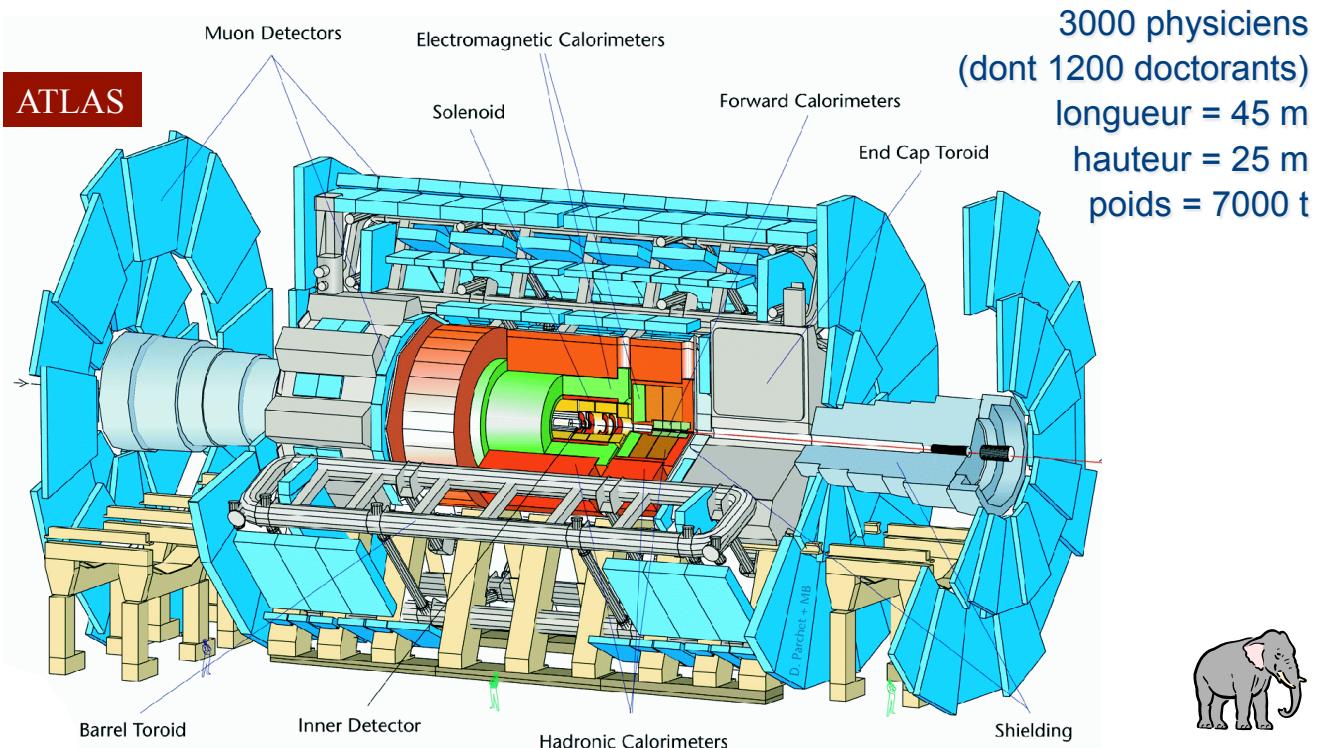
- boson de Higgs (pièce manquante du MS)
- “Nouvelle Physique” au-delà du MS

Collisions les plus énergétiques au monde,
source de hadrons b la plus intense

Geneva

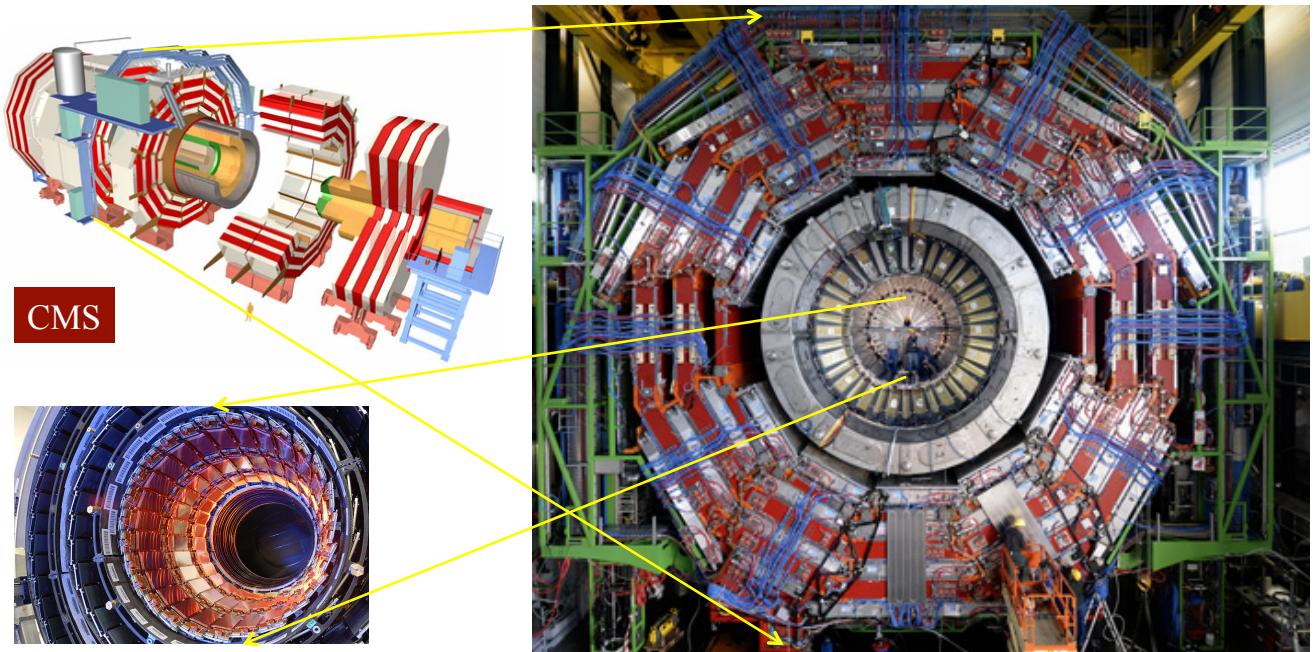


Des détecteurs géants, complexes ...



... rapides, résistants aux radiations ...

pour détecter 600 millions de collisions par seconde

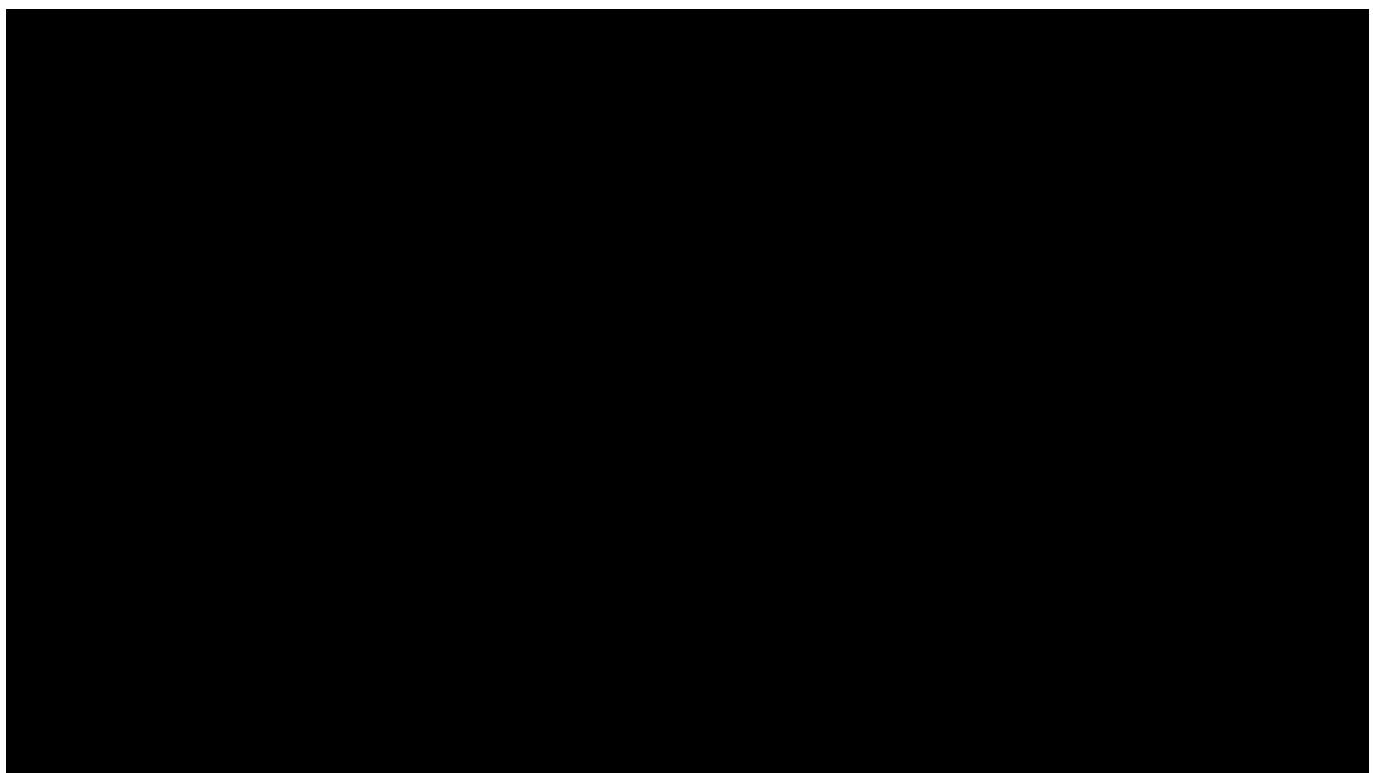


O. Schneider

13 décembre 2017

11

Une collision au LHC



O. Schneider

13 décembre 2017

12

Modèle Standard des particules élémentaires

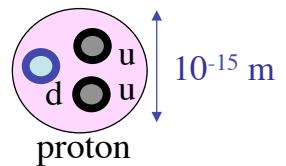
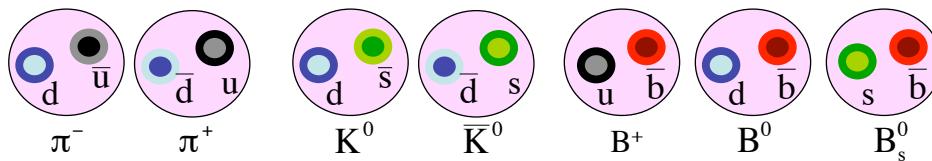
□ La matière est formée de 3 familles de fermions

	1	2	3	Electric charge [e]	Colour charge
Leptons	electron e	muon μ	tau τ	-1	no
	neutrino ν_e	neutrino ν_μ	neutrino ν_τ	0	
Quarks	up u	charm c	top t	+2/3	yes
	down d	strange s	bottom b	-1/3	

— Chaque fermion a un partenaire d'anti-matière (anti-fermion)

□ Les quarks forment des combinaisons incolores (= hadrons) liées par l'interaction forte:

- baryon = 3 quarks, anti-baryon = 3 anti-quarks
- meson = 1 quark + 1 anti-quark



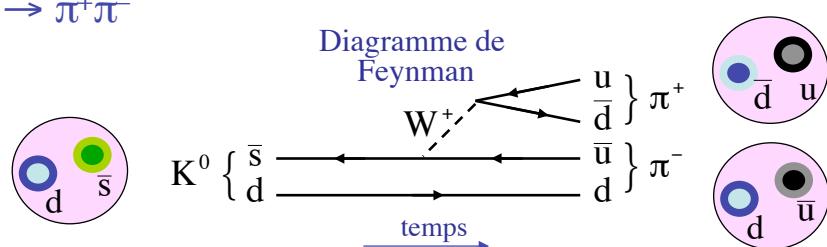
Modèle Standard des particules élémentaires

□ Les forces entre fermions sont décrites par l'échange de bosons:

Interaction	Bosons d'échange	Particules sensibles
Force forte	8 gluons	seulement quarks & gluons
Electro-magnétisme	photon γ	particules chargées électriquement
Force faible	W^+, W^-, Z^0	toutes
Gravitation	(graviton ?)	toutes

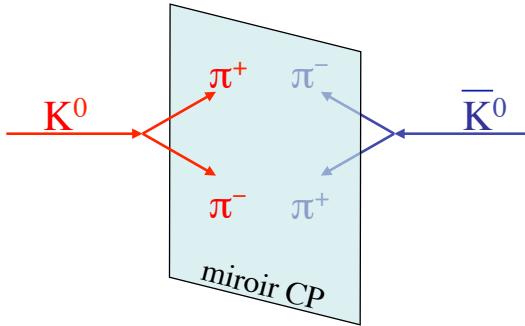
□ Exemple de processus d'interaction faible, avec échange d'un boson W :

— désintégration $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

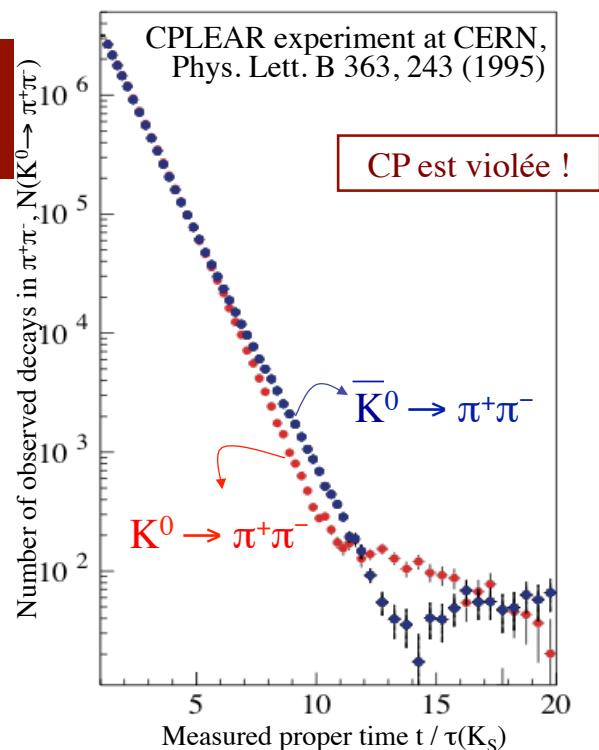


Symétrie CP

Parité P: gauche \leftrightarrow droite
 Conjugation de charge C: $q \leftrightarrow -q$
 CP: matière \leftrightarrow antimatière



Si CP est respectée, la probabilité de désintégration d'un K^0 en $\pi^+\pi^-$ après un temps t est la même que celle d'un anti- K^0 .



O. Schneider

13 décembre 2017

15

Nouvelle physique au-delà du modèle standard (MS) ?

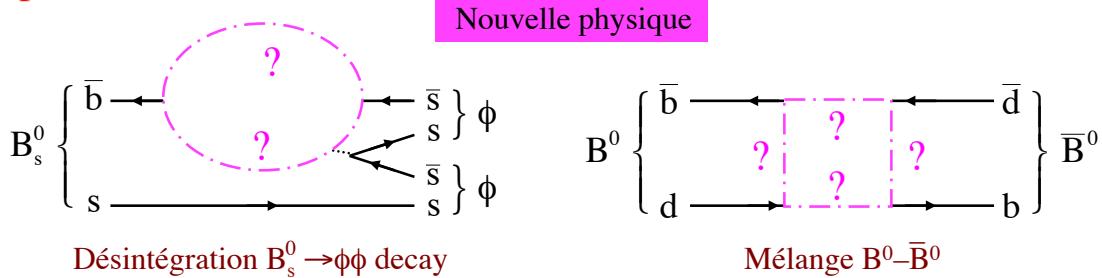
□ Argument cosmologique:

- notre Univers exhibe une flagrante asymétrie matière-antimatière
- son évolution à partir de l'état symétrique du Big Bang requiert CPV (Sakharov)
- CPV du MS est bien trop faible \rightarrow d'autres sources de CPV doivent exister

□ Nouvelles particules ?

- prédites par les théories de grande unification, la supersymétrie, ...
- existence de la matière noire ...
- presque chaque extension du MS implique de nouvelles sources de CPV
- pourraient être vues directement (si produites à hautes énergies), ou indirectement dans les processus en "boucle" (même à plus basses énergies)

□ Exemples de "boucles":

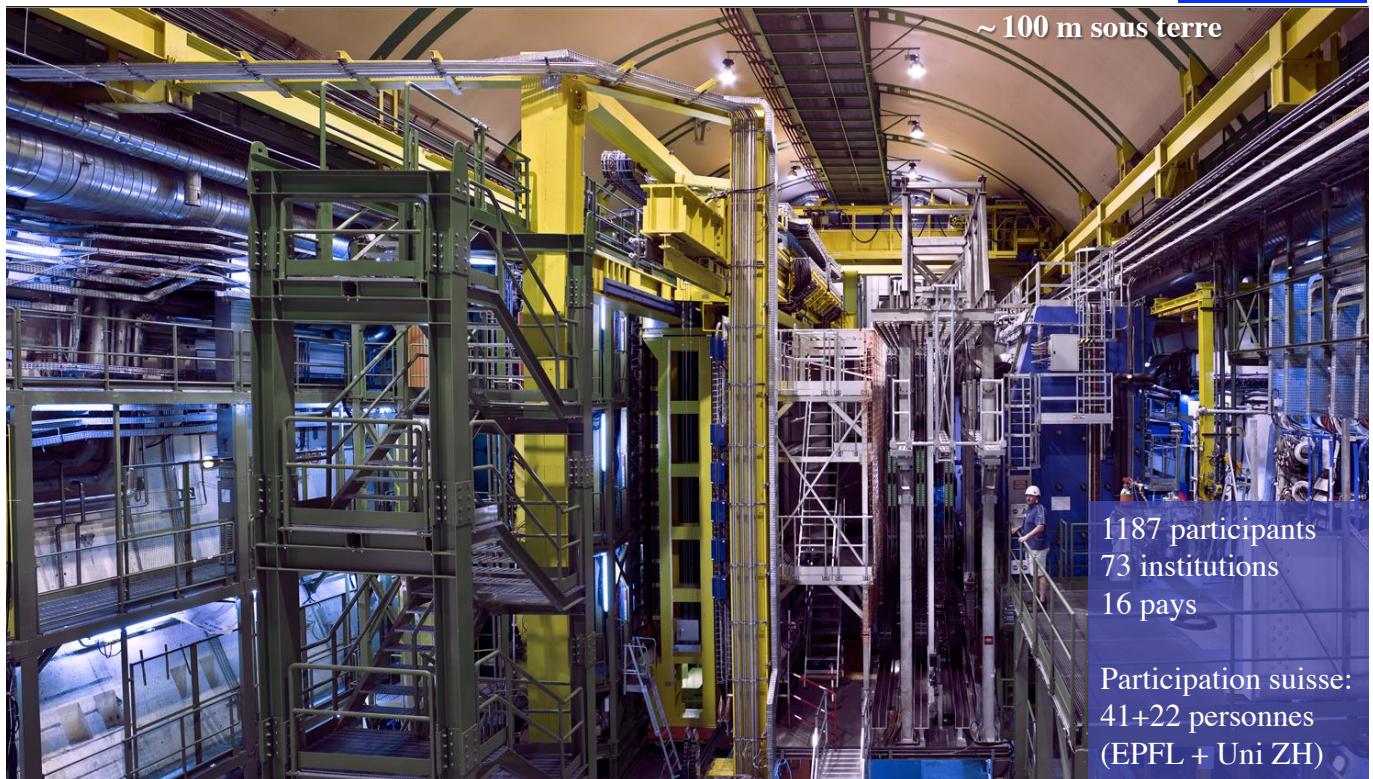


O. Schneider

13 décembre 2017

16

LHCb dans sa “caverne”



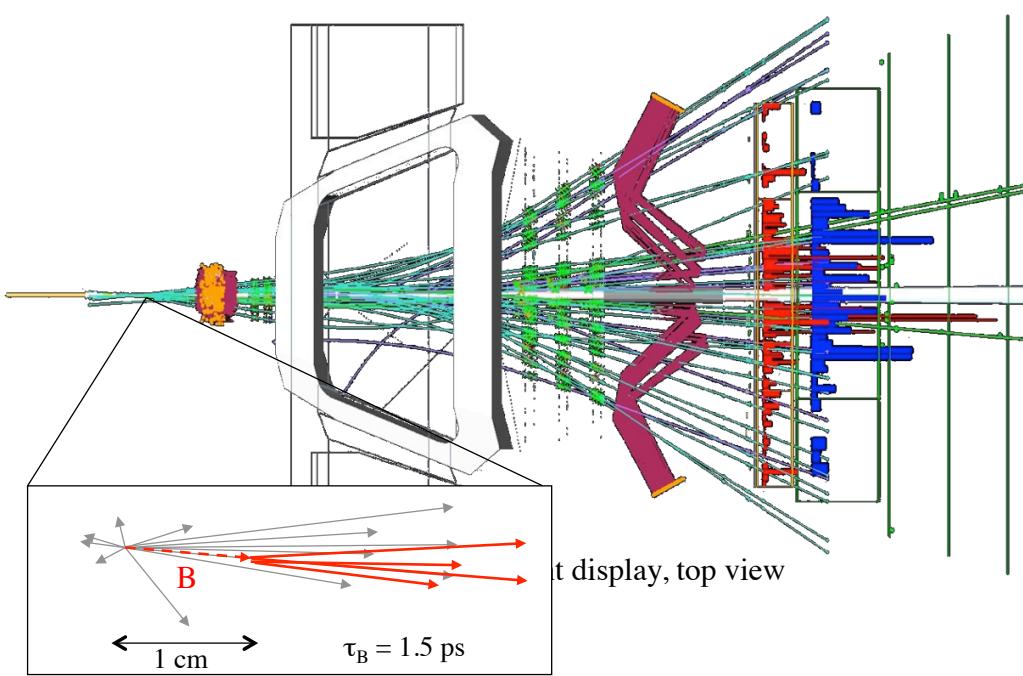
O. Schneider

13 décembre 2017

17

Une collision (“événement”) dans LHCb

collision pp à 3.5+3.5 TeV, March 30, 2010



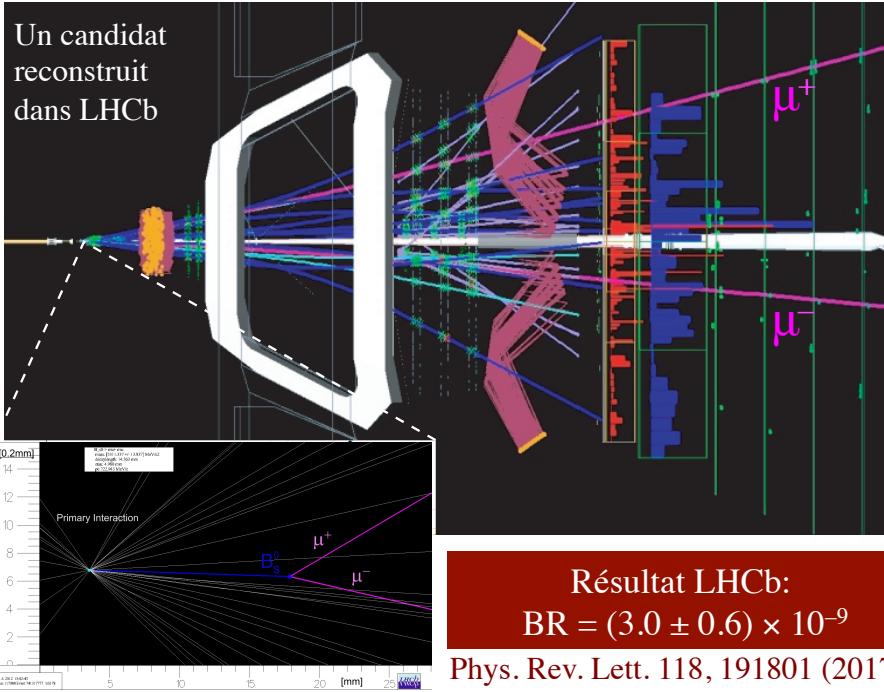
Année	\sqrt{s} (TeV)
2010–2011	7
2012	8
2013–2014	–
2015–2018	13
2019–2020	–
2021–2023	14
2024–2026	–
2026–2028	14
2029	–
2030–	14

O. Schneider

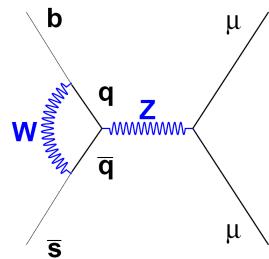
13 décembre 2017

18

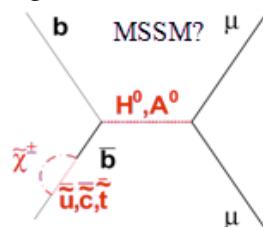
Désintégration rare $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$



Le Modèle Standard prédit
 $BR = (3.54 \pm 0.30) \times 10^{-9}$



La « nouvelle physique » peut augmenter la probabilité d'un grand facteur



O. Schneider

13 décembre 2017

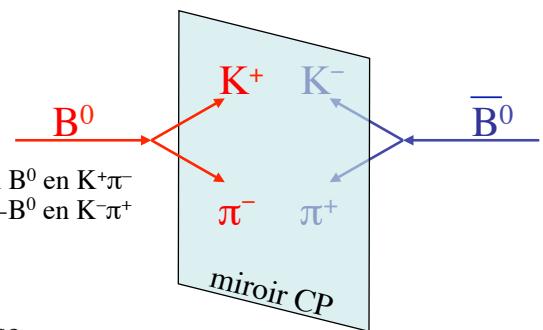
19

Violation de la symétrie CP

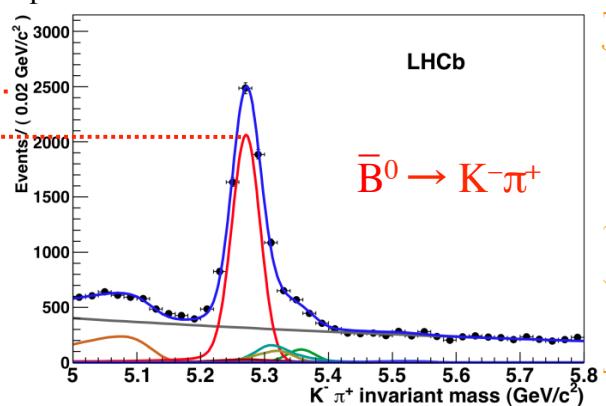
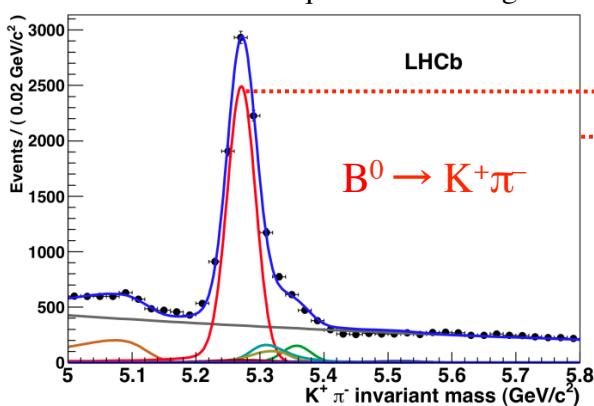


Parité P: gauche \leftrightarrow droite
 Conjugation de charge C: $q \leftrightarrow -q$
 CP: matière \leftrightarrow antimatière

Si CP is respectée, la probabilité de désintégration d'un B^0 en $K^+\pi^-$ doit être la même que celle d'un anti- B^0 en $K^-\pi^+$



LHCb: Première observation de violation de CP dans une machine hadronique à haute énergie + la plus précise



[Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 201601]

O. Schneider

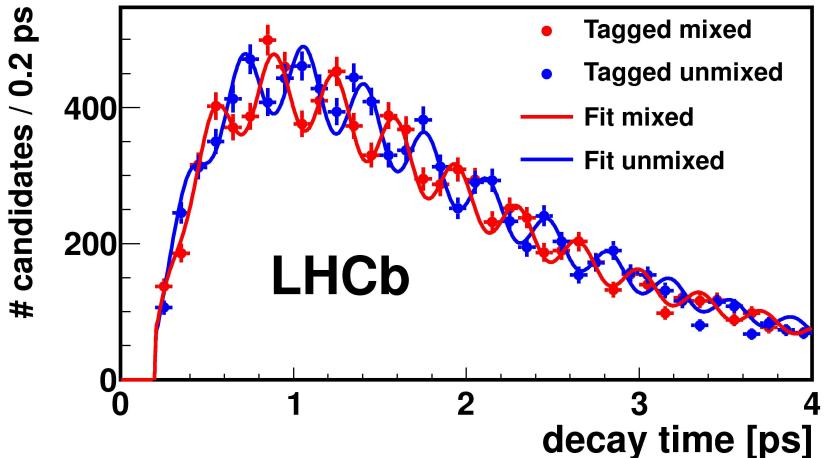
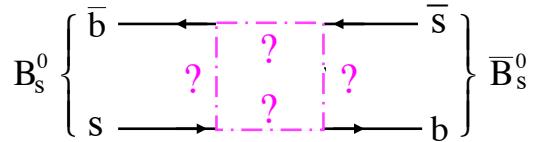
13 décembre 2017

20

Mélange $B_s - \bar{B}_s$



- Phénomènes similaires au mélange $K^0 - \bar{K}^0$,
 - fréquence d'oscillations beaucoup plus rapide



New J. Phys. 15 (2013) 053021

O. Schneider

13 décembre 2017

21

Violation de CP induite par le mélange $B_s - \bar{B}_s$

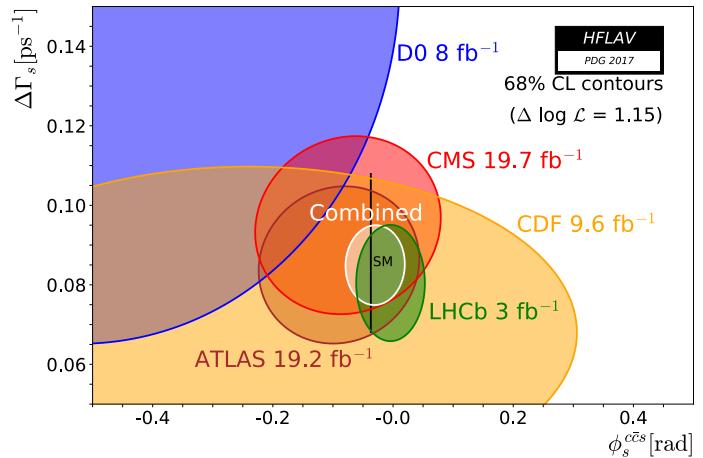
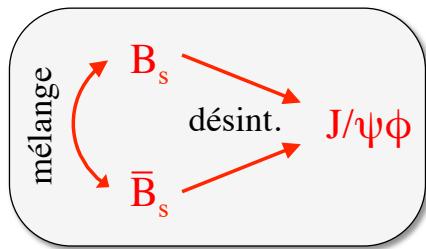


Mélange:

- oscillation entre le meson B_s et son antiparticule

Désintégration:

- le B_s and son antiparticule peuvent tous deux se désintégrer en $J/\psi\phi$



ϕ_s = différence de phase entre les amplitudes de mélange et de désintégration (interférence quantique)

On compare « $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ » et « $\bar{B}_s \rightarrow J/\psi\phi$ »:

- le Modèle Standard (SM) prédit une toute petite violation de CP, mais la nouvelle physique peut avoir un gros effet ...

Résultat LHCb avec données 2011–2012:
meilleure mesure de ϕ_s
(compatible avec le SM)

Phys. Rev. Lett. 114, 041801 (2015)

O. Schneider

13 décembre 2017

22