



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/>

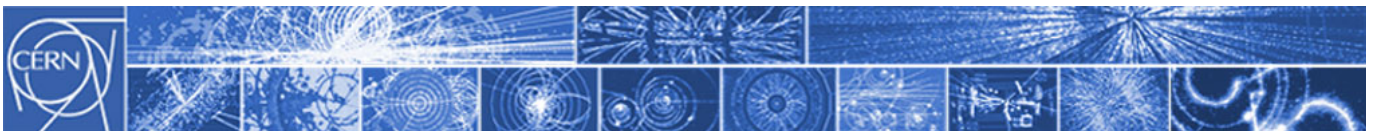
Olivier Schneider



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Laboratoire de Physique
des Hautes Energies (LPHE)

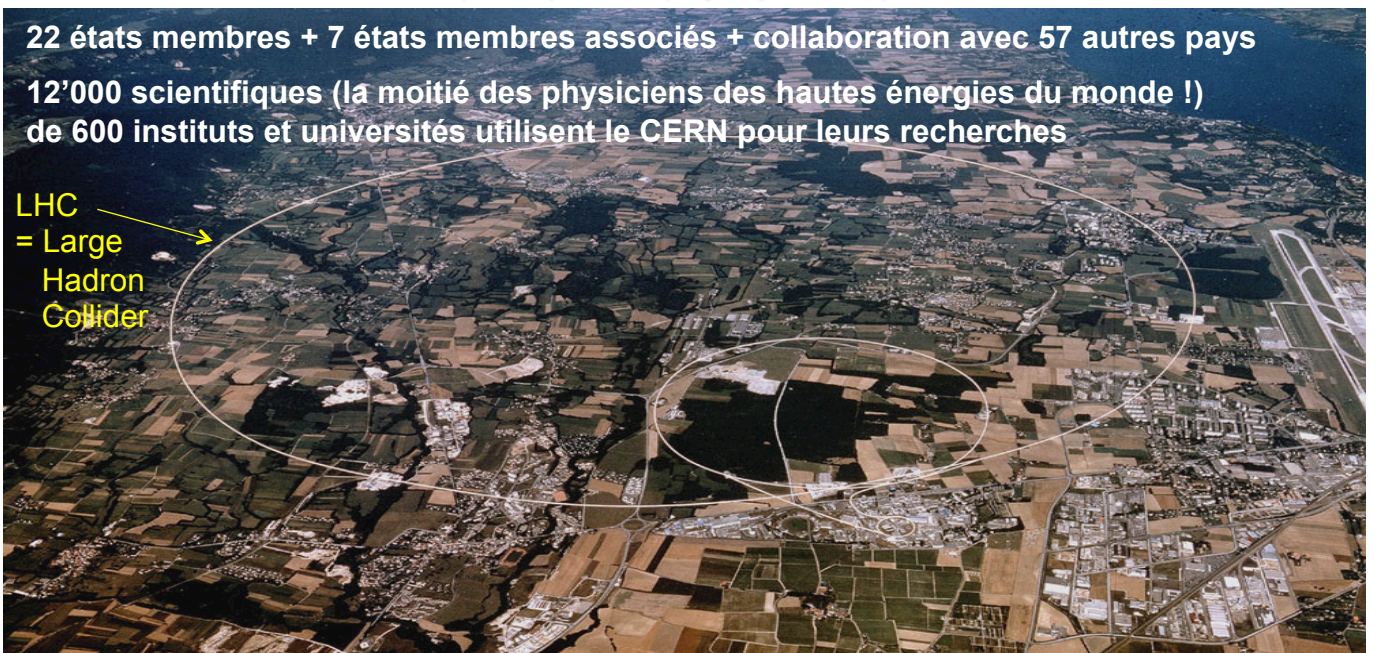
<http://lphe.epfl.ch/>



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

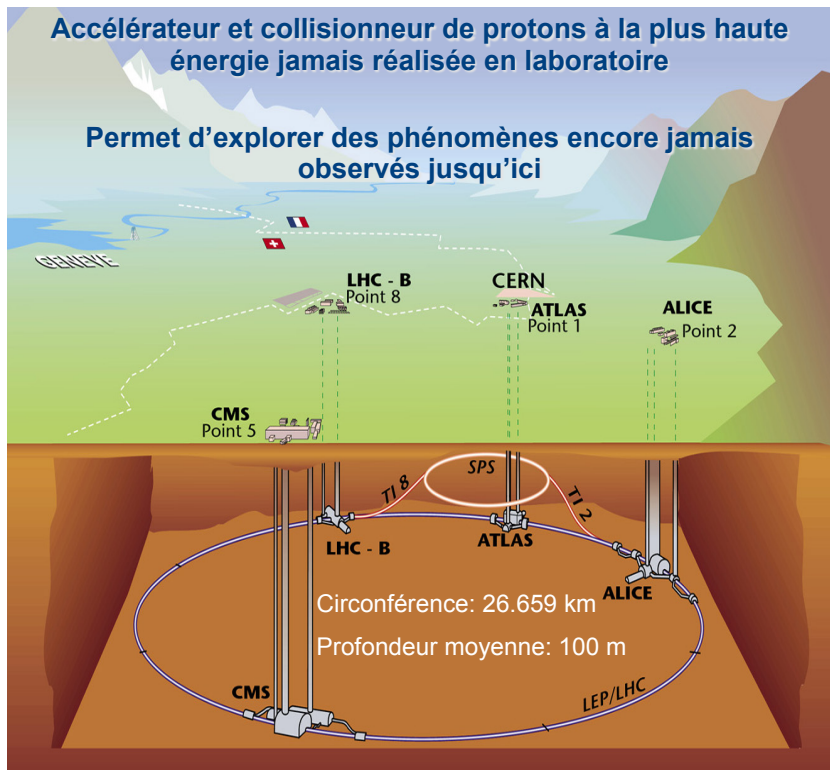
22 états membres + 7 états membres associés + collaboration avec 57 autres pays
12'000 scientifiques (la moitié des physiciens des hautes énergies du monde !)
de 600 instituts et universités utilisent le CERN pour leurs recherches

LHC
= Large
Hadron
Collider



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

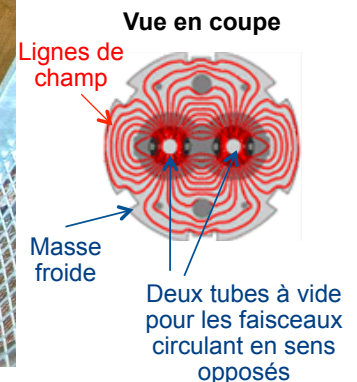
Aimants du LHC



Descente du premier aimant dipolaire
par un puits du LHC (mars 2005)

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 circonférence du LHC

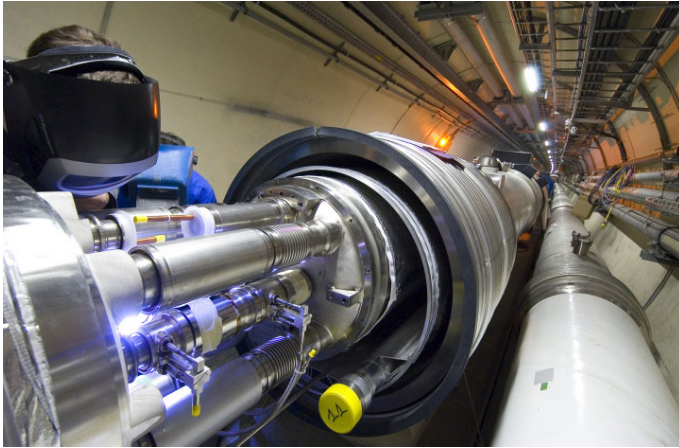
O. Schneider

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

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

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

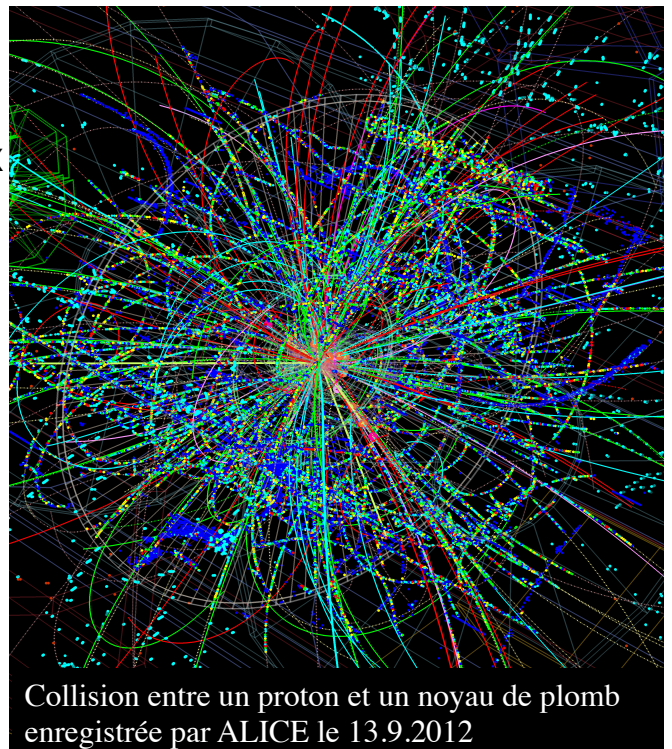
Les points les plus bouillants

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

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

CERN

LHCb
(physique des B,
violation de CP)

ATLAS
(Higgs, ...)

CMS (Higgs, ...)

Taux à LHCb:

~16 MHz collisions pp
100 kHz de hadrons b

Statistique énorme

ALICE

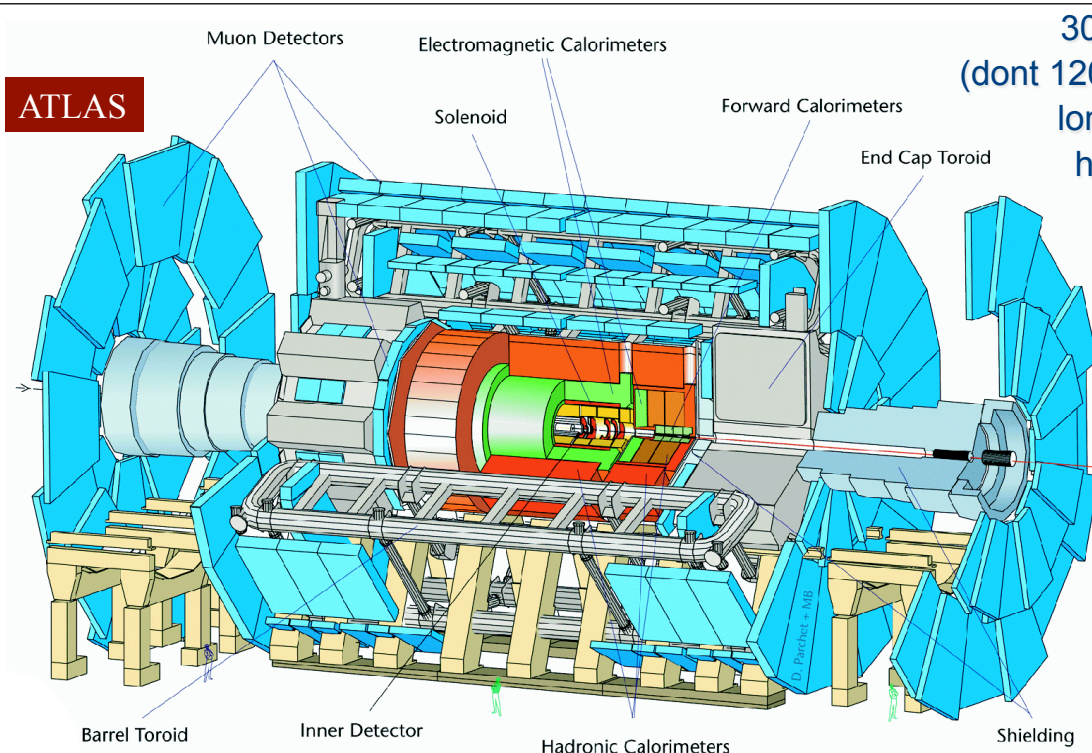
(collisions ions lourds,
plasma quark-gluon)

Tunnel LHC (27 km = 0.09 ms)

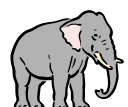
O. Schneider

2012

Des détecteurs géants, complexes ...

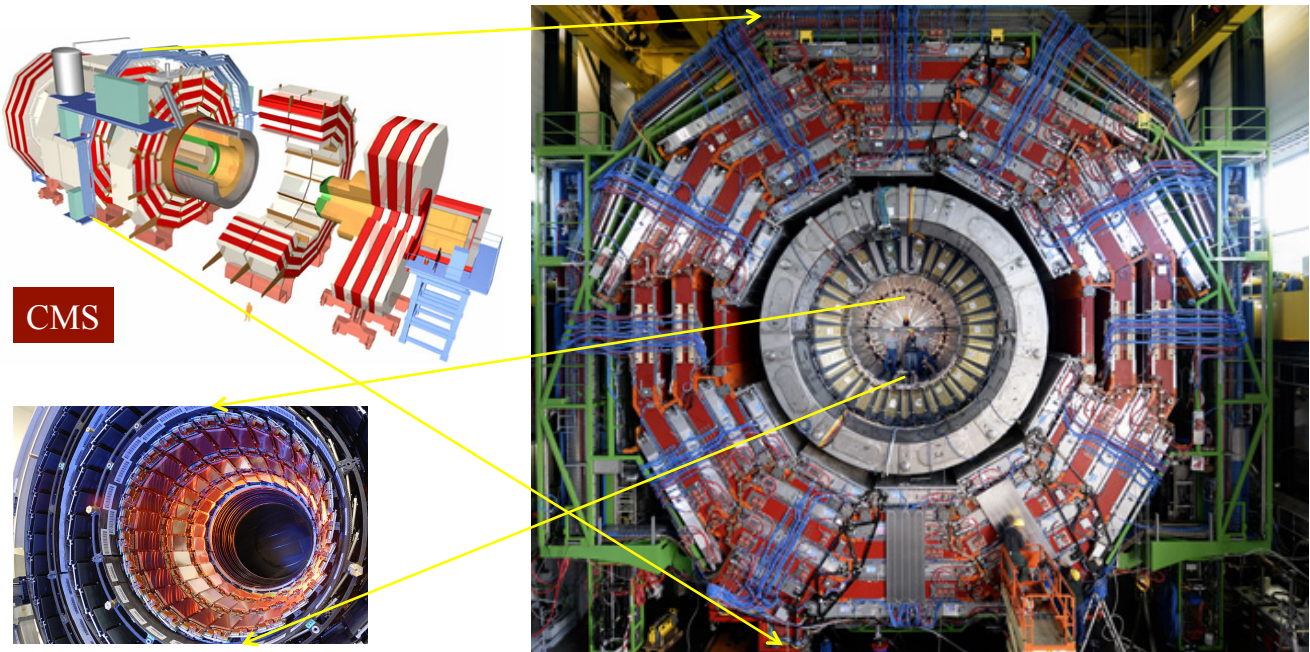


3000 physiciens
(dont 1200 doctorants)
longueur = 45 m
hauteur = 25 m
poids = 7000 t

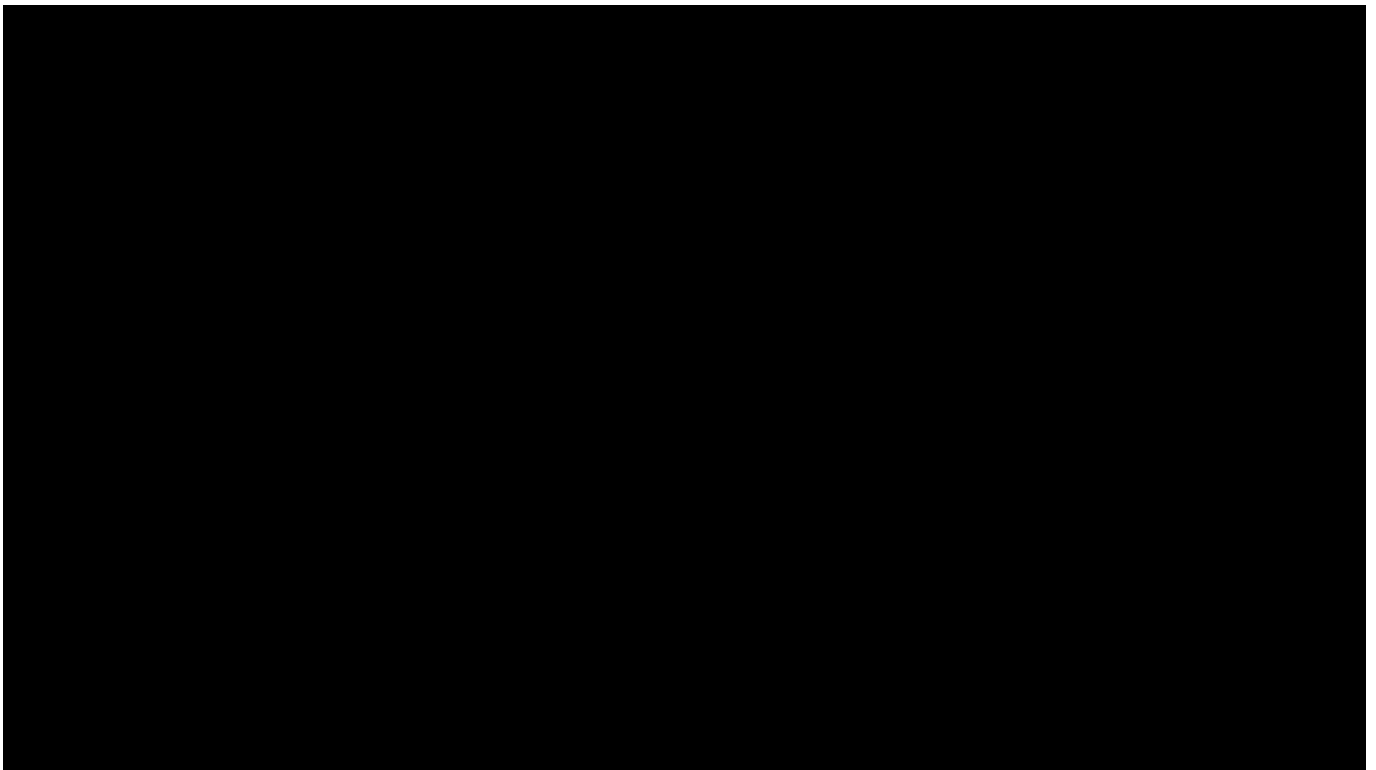


... rapides, résistants aux radiations ...

pour détecter 600 millions de collisions par seconde



Une collision au LHC



Modèle Standard des particules élémentaires

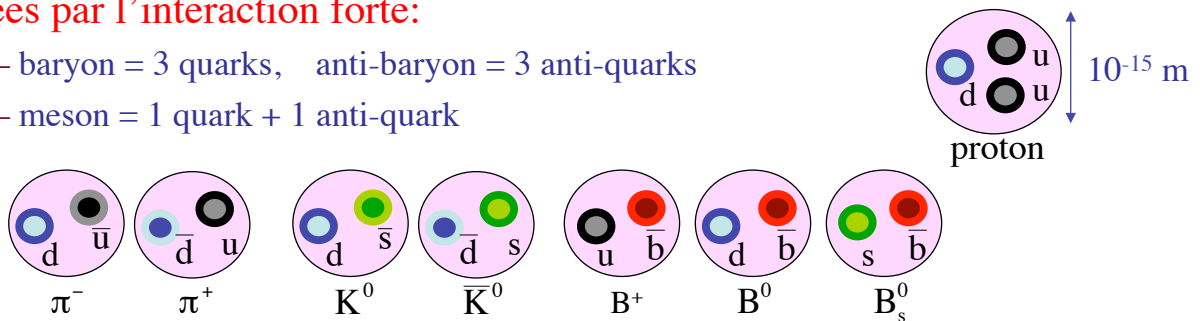
La matière est formée de 3 familles de fermions

	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



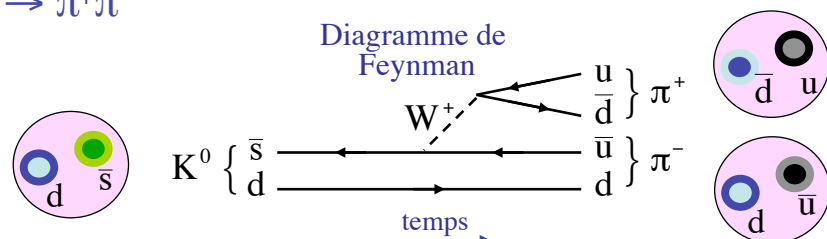
Modèle Standard des particules élémentaires

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

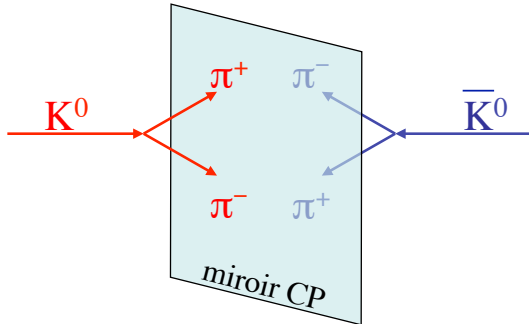
Exemple de processus d'interaction faible, avec échange d'un boson W:

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

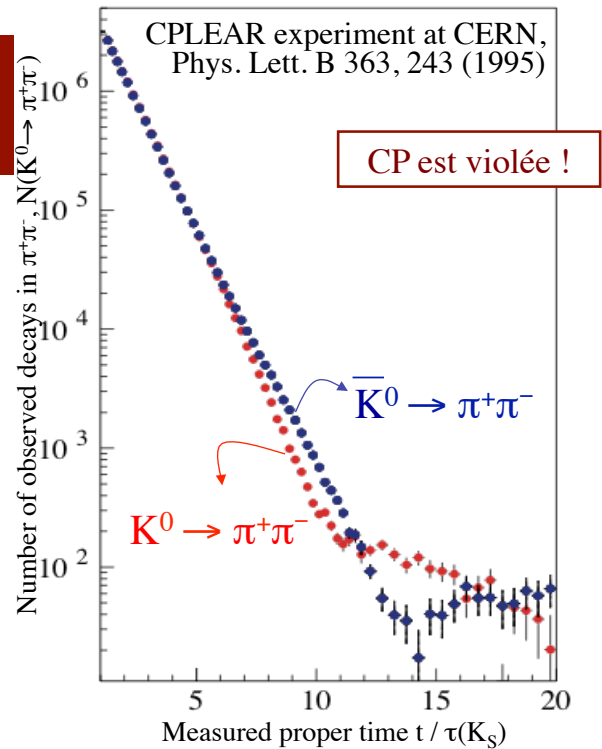


Symétrie CP

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



Si CP is 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) ?

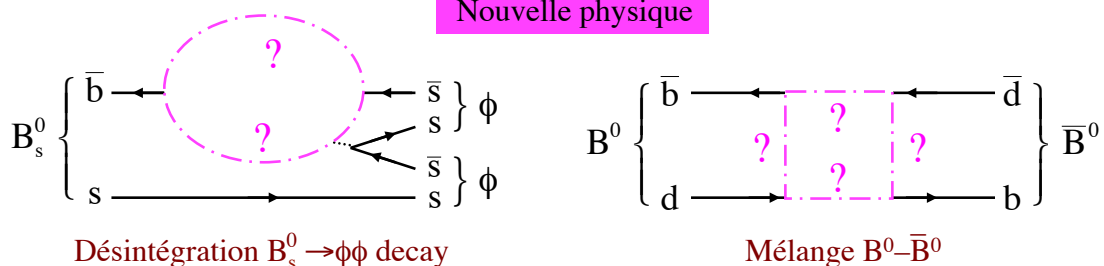
Argument cosmologique:

- 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":

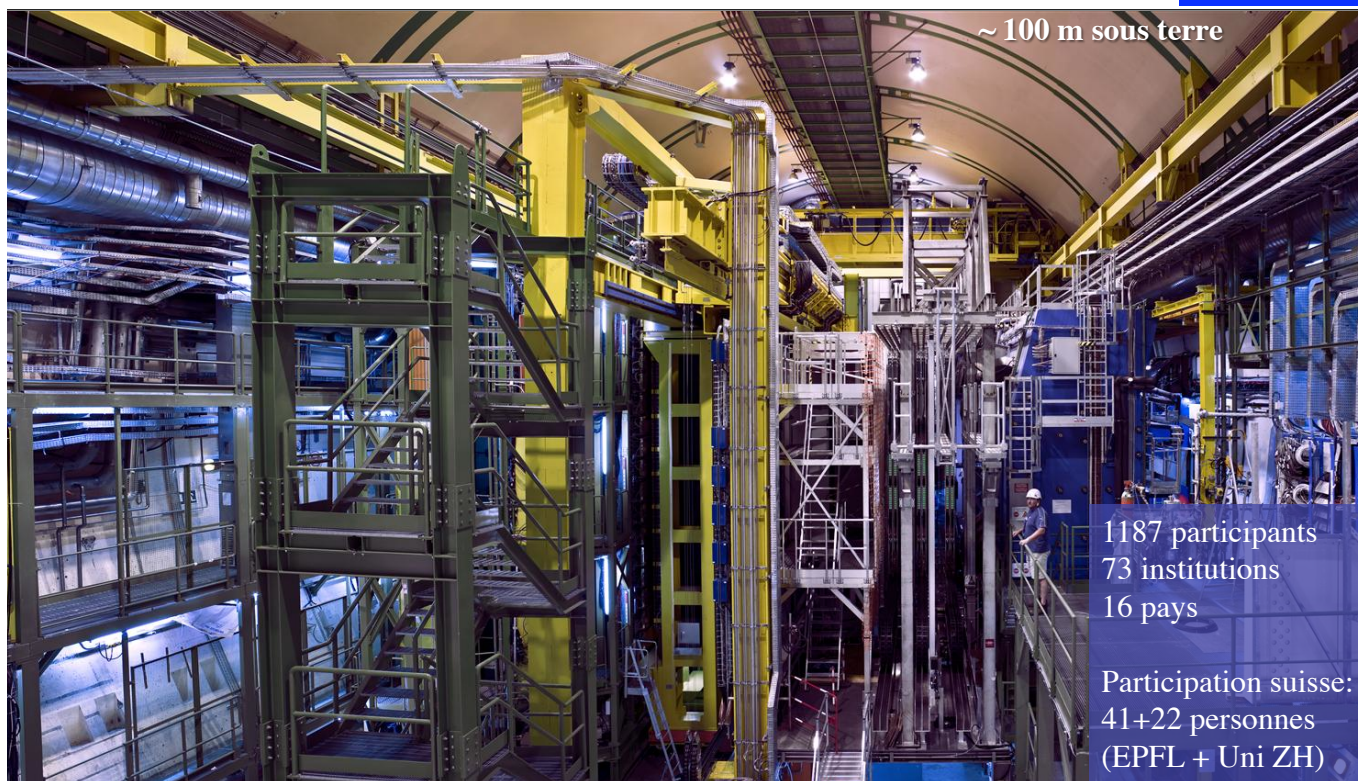


O. Schneider

13 décembre 2017

16

LHCb dans sa “caverne”



~ 100 m sous terre

1187 participants
73 institutions
16 pays

Participation suisse:
41+22 personnes
(EPFL + Uni ZH)

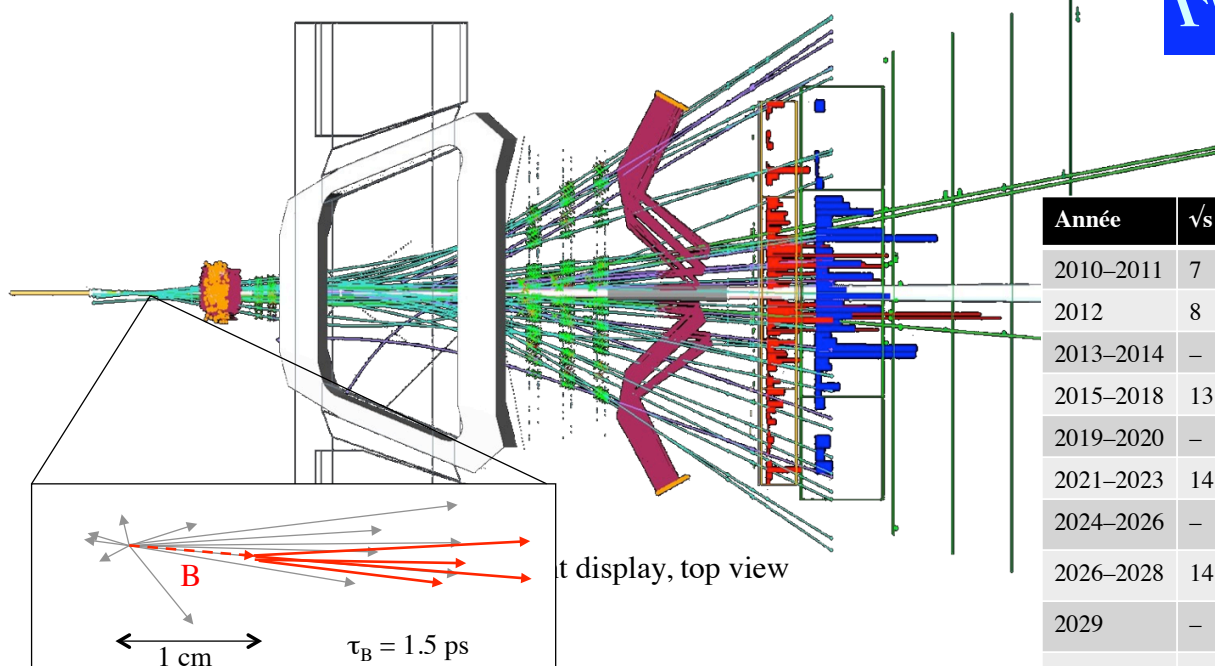
O. Schneider

13 décembre 2017

17

Une collision (“événement”) dans LHCb

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



t display, top view

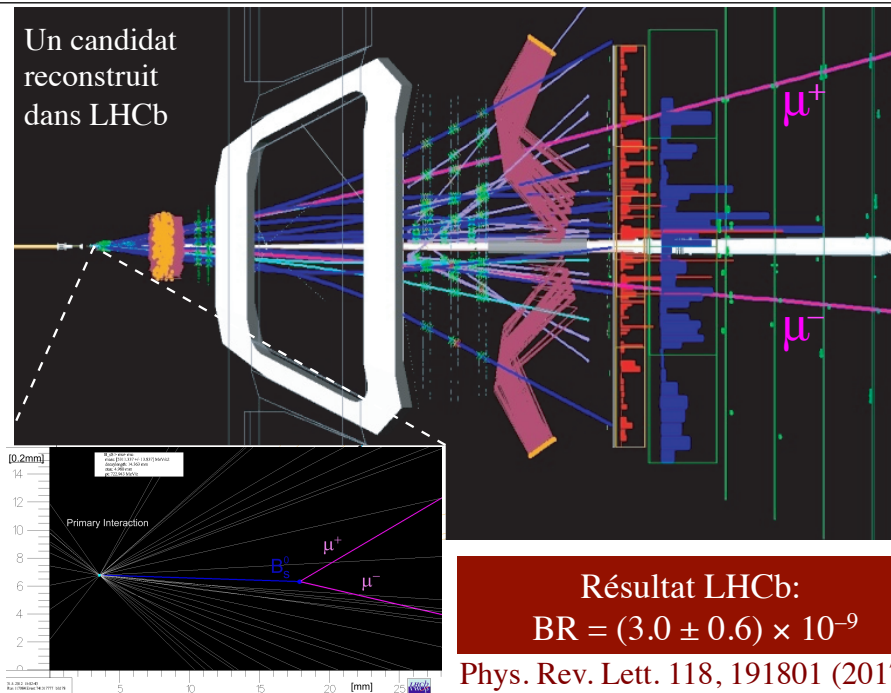
Année	\sqrt{s} (TeV)
2010–2011	7
2012	8
2013–2014	–
2015–2018	13
2019–2020	–
2021–2023	14
2024–2026	–
2026–2028	14
2029	–
2030–	14

O. Schneider

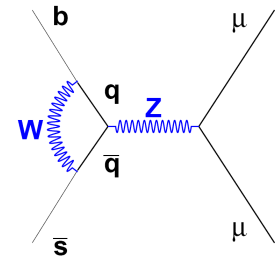
13 décembre 2017

18

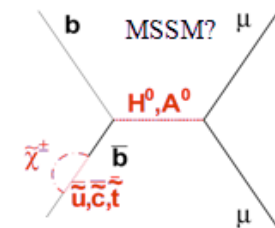
Désintégration rare $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$



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



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

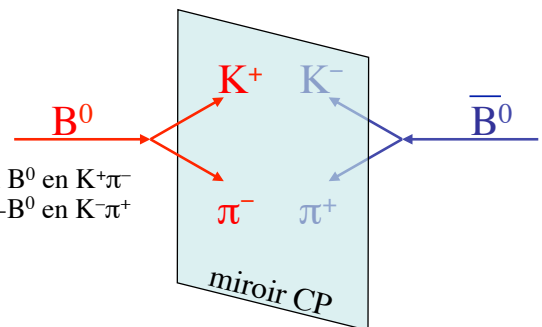


Violation de la symétrie CP

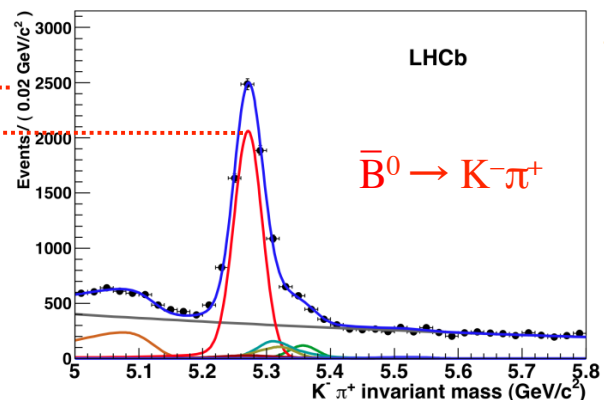
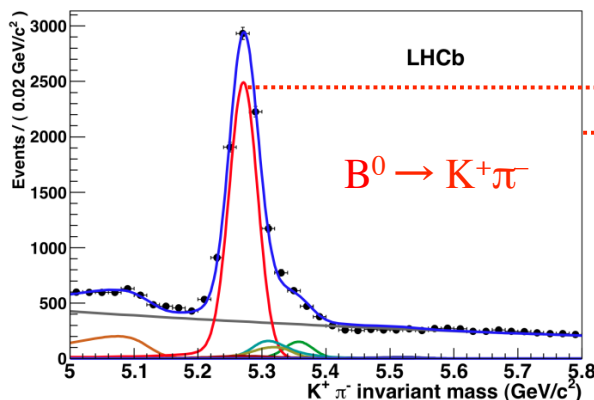


Parité P: gauche \leftrightarrow droite
 Conjugation de charge C: $q \leftrightarrow -q$
 CP: matière \leftrightarrow antimatière

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

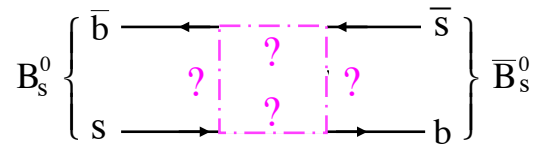


[Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 201601]

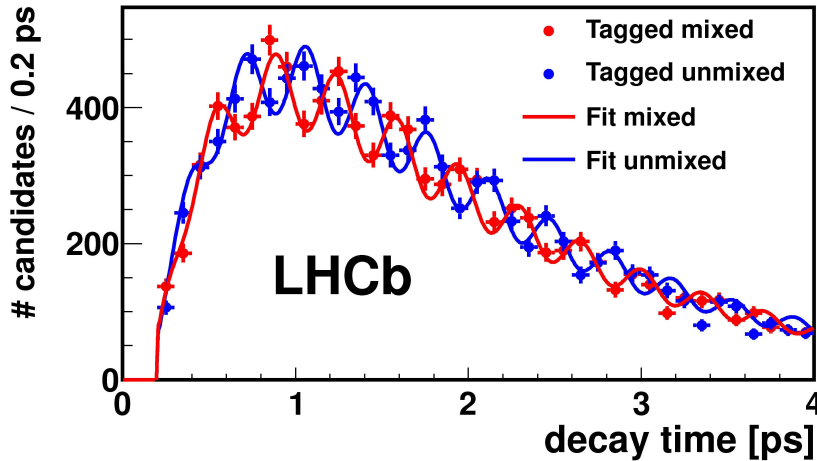
Mélange $B_s - \bar{B}_s$



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



Nouvelle physique



Bleu (unmixed):

$$B_s \rightarrow B_s$$

$$\bar{B}_s \rightarrow \bar{B}_s$$

Rouge (mixed):

$$B_s \rightarrow \bar{B}_s$$

$$\bar{B}_s \rightarrow B_s$$

$$\Delta m_s = 17.768 \pm 0.023 \text{ (stat)} \pm 0.006 \text{ (syst)} \text{ ps}^{-1}$$

New J. Phys. 15 (2013) 053021

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

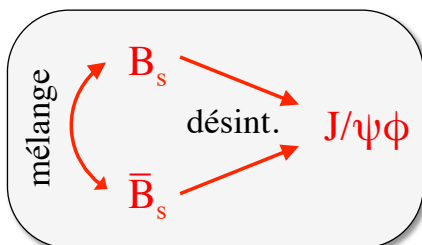


Mélange:

- oscillation entre le meson B_s et son antiparticule

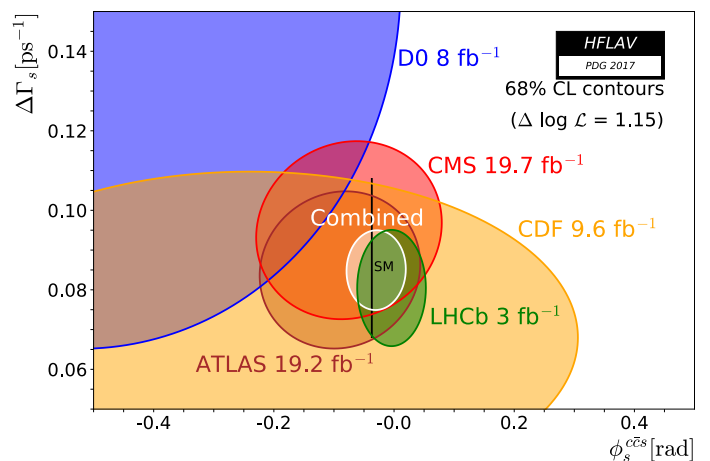
Désintégration:

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



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 ...



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

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

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