

Le LHC et LHCb

MasterClass LHCb

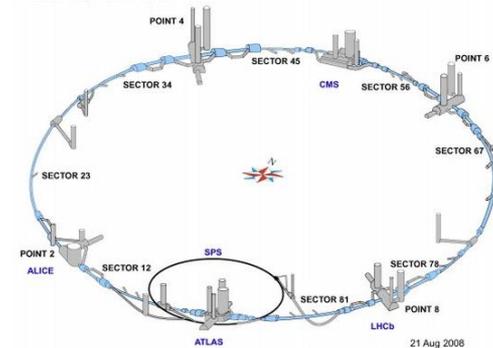


Pourquoi des accélérateurs

Le principe: accélérer des particules chargées grâce à des champs électrique ou magnétique

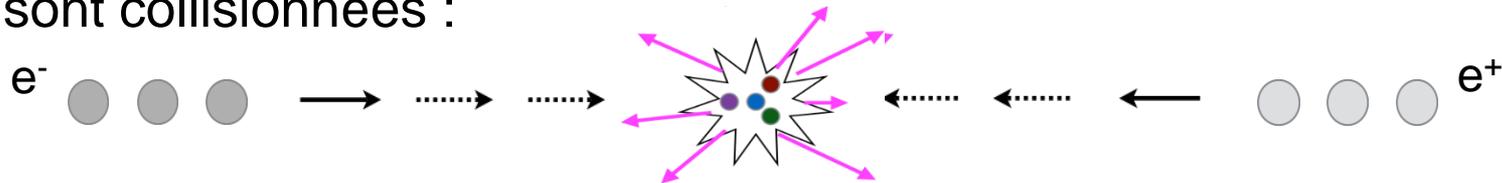


Petit accélérateur de particules

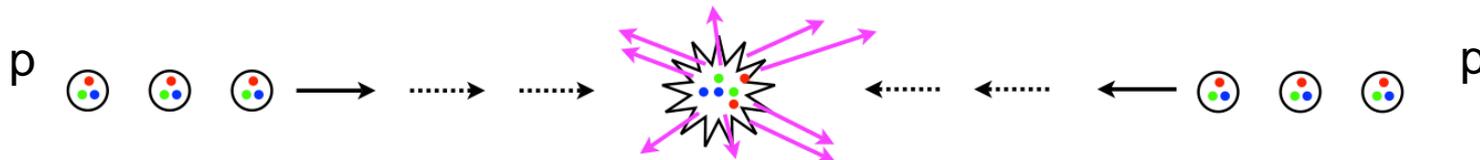


Grand accélérateur de particules

Les particules sont accélérées pour atteindre de très grandes énergies, puis sont collisionnées :



Plein de nouvelles particules sont ainsi produites et peuvent être étudiées !!!



Quelques accélérateurs récents

- Le LEP

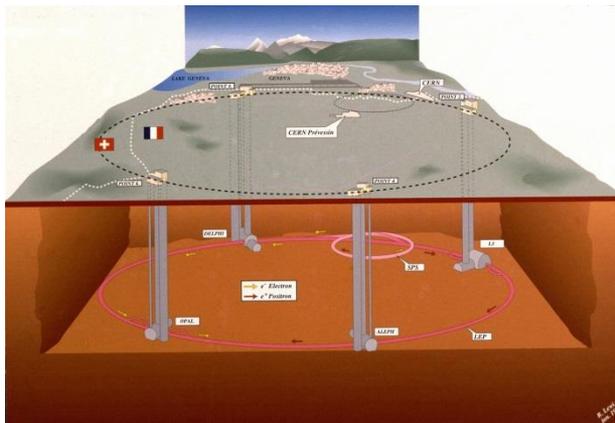
- Au CERN, Genève
- Collisions e^+e^-
- 1989-2000

- Le Tevatron

- Fermilab, Chicago
- Collisions proton-antiproton
- 1983-2011

- Le LHC

- Au CERN
- Collisions proton-proton
- Depuis 2009



Le CERN



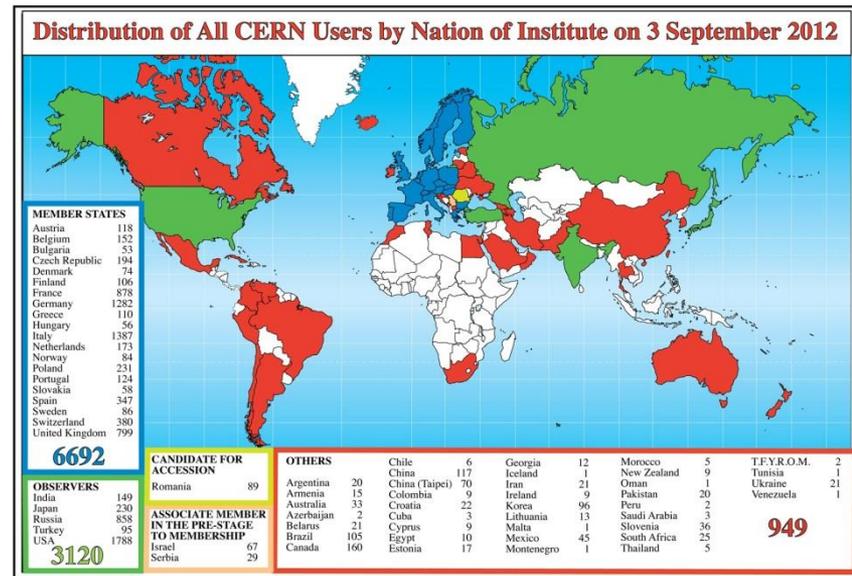
Le CERN en quelques chiffres



Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Le laboratoire européen pour la physique des particules

- organisation internationale
- créé en 1954
- 21 état membres
- emploi ~2500 personnes
- ~10000 utilisateurs
- 500 instituts
- 80 pays



Formidable lieu de collaboration internationale
... et d'incubation pour les technologies de l'information

A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

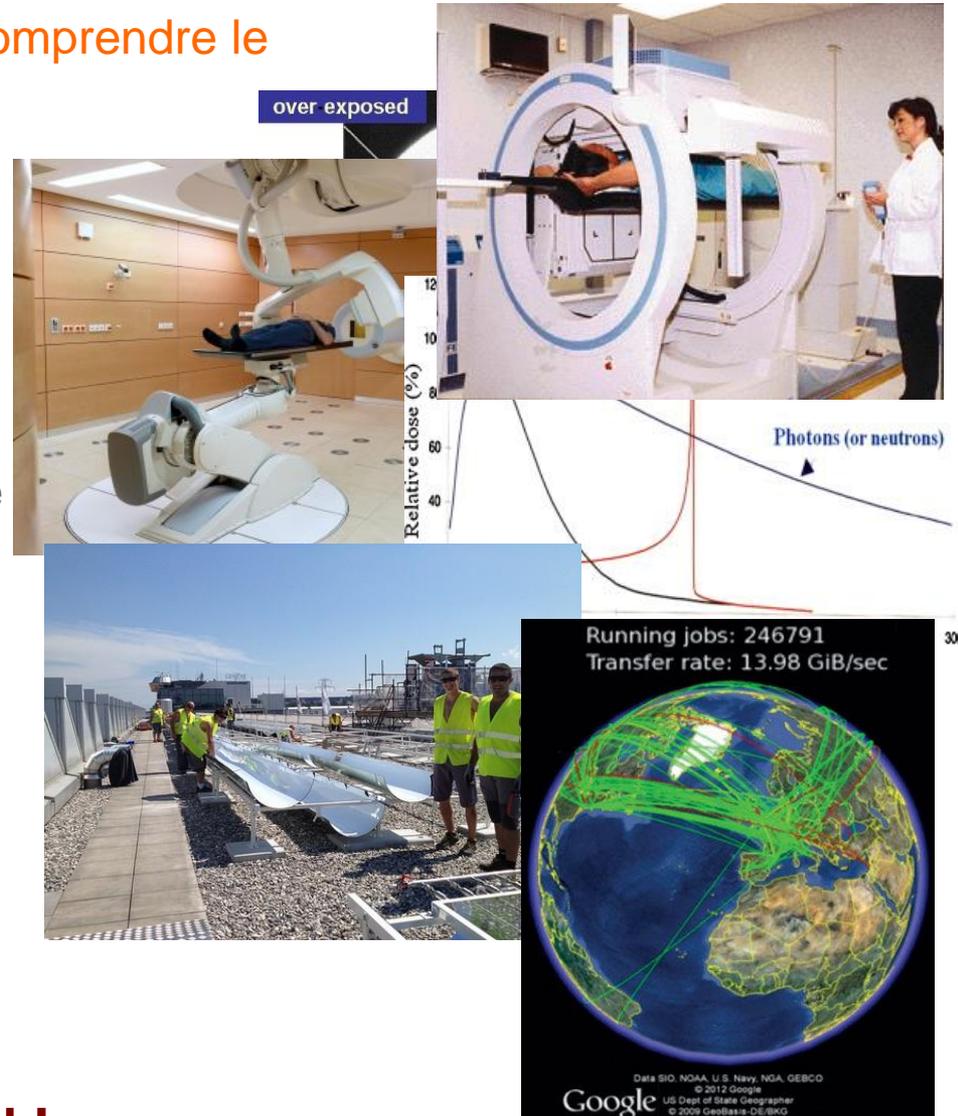
Applications :

- Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- Faisceaux utilisés en hadronthérapie

Plus inattendu :

- Grille de calcul
- Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève

► **Le Web a été inventé au CERN !**

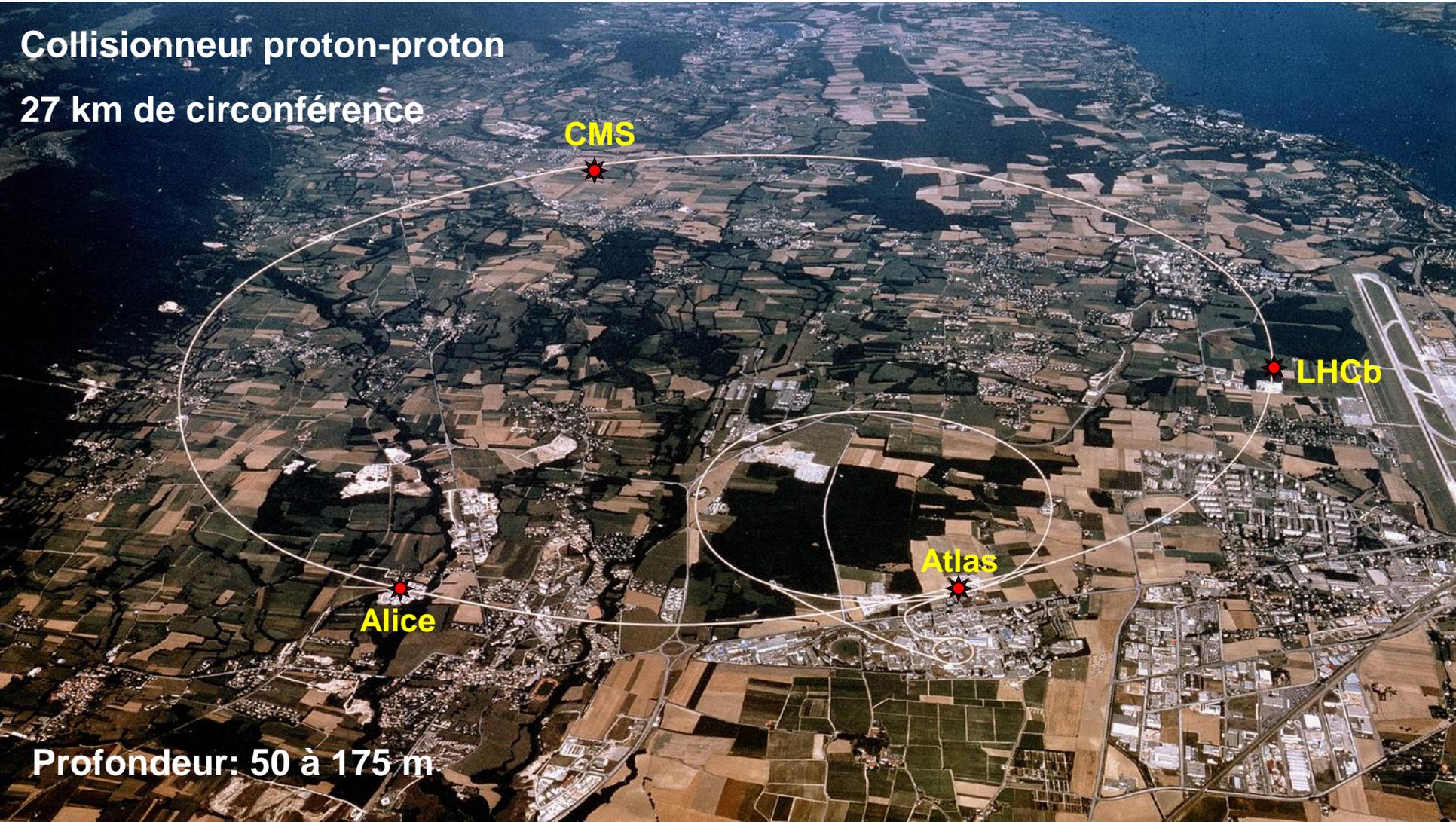


Le Large Hadron Collider (LHC)

- Le plus grand et le plus complexe instrument scientifique au monde!

Collisionneur proton-proton

27 km de circonférence



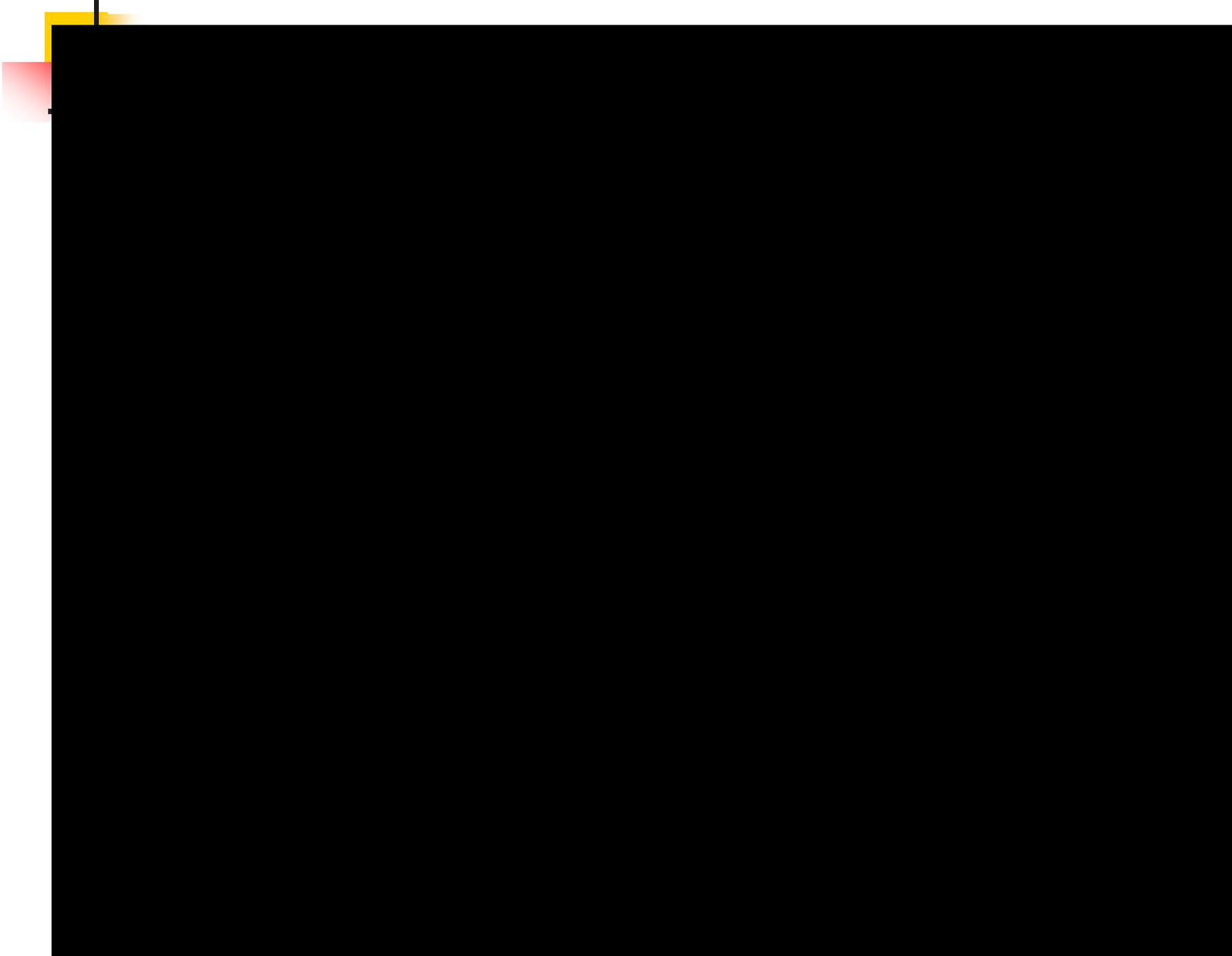
CMS

LHCb

Alice

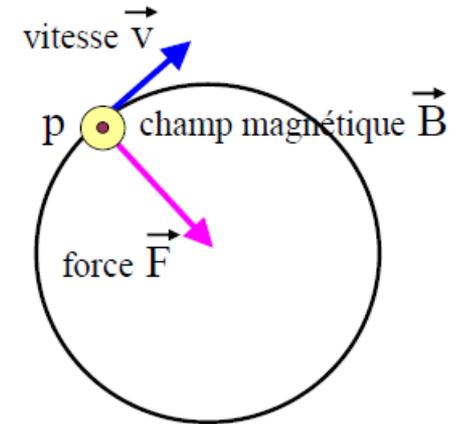
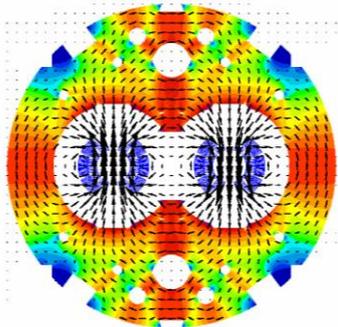
Atlas

Profondeur: 50 à 175 m



Le LHC: un défi technologique

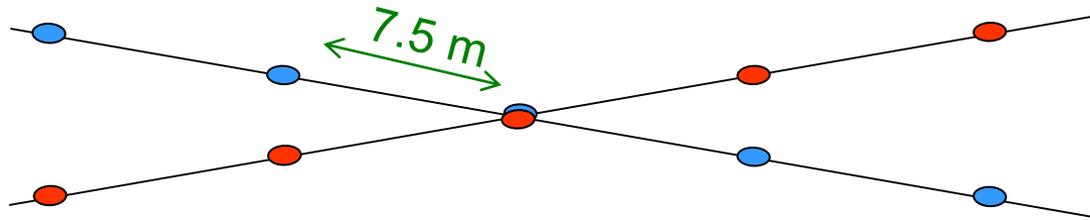
- Les protons sont accélérés par des **champs électriques**
- Ils sont maintenus sur la trajectoire courbée par des **champs magnétiques**
- plus de 1000 aimants (dipôles)



- Champs magnétique dans les dipôles: **8.3T** (~200 000 fois le champ magnétique terrestre)
- Technologie supraconductrice: fonctionne à **-271 °C** !
- Vide extrême dans l'enceinte des faisceaux: **10 fois plus poussé que sur la lune**

Les faisceaux du LHC

- Chaque faisceau contient 2800 paquets de proton
- Dans chaque paquet: 100 milliards de protons



- Energie de chaque faisceau: 7 TeV (pour l'instant 6.5)

1TeV = 1 Tera électron-Volt = 10^{12} eV

Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol

Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.

L'histoire du LHC

- Début du projet dans les années 80
- 1996-1998: approbation des expériences
- Novembre 2000: arrêt du LEP et début de la construction du LHC
- Mars 2005 premier dipôle descendu
- Aout 2008: le LHC est froid
- Septembre 2008: démarrage



L'histoire du LHC

- Début du projet dans les années 80
- 1996-1998: approbation des expériences
- Novembre 2000: arrêt du LEP et début de la construction du LHC
- Mars 2005 premier dipôle descendu
- Aout 2008: le LHC est froid
- Septembre 2008: démarrage et incident électrique ☹️
- Octobre 2009: redémarrage
- Mars 2010: les premiers faisceaux à 3.5 TeV circulent dans le LHC 😊



L'accélération des protons

- Les protons acquièrent leur énergie grâce à une succession de plusieurs accélérateurs

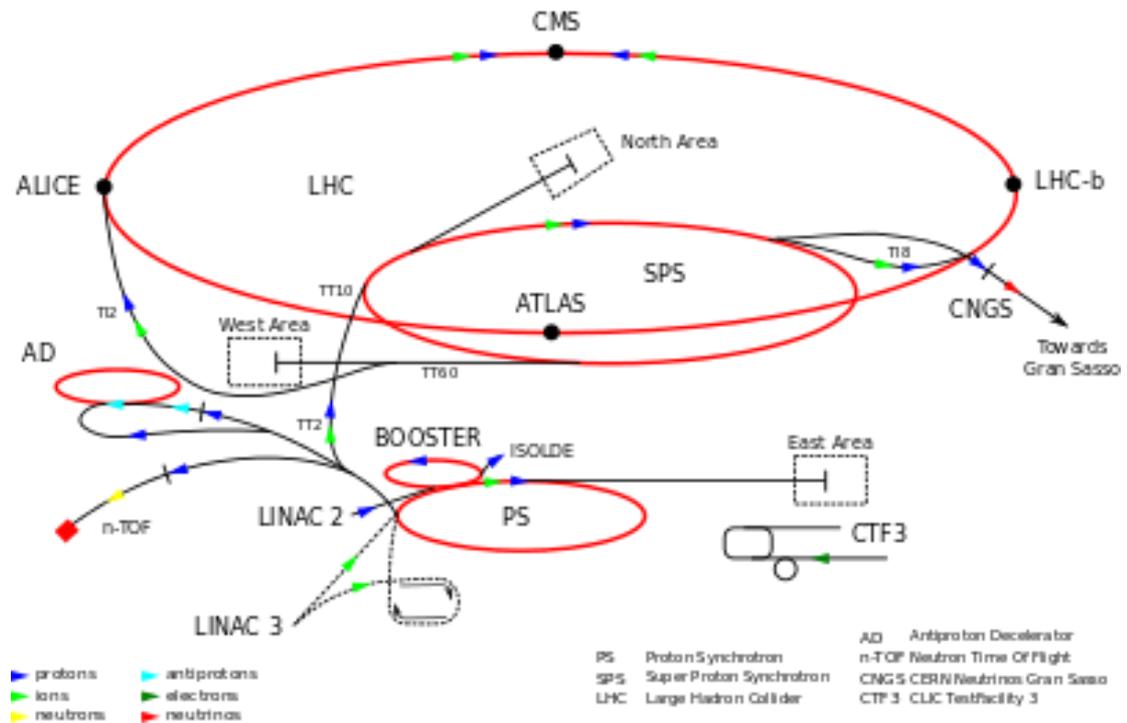
Linac 50 MeV 31%*c*

Booster 1.4 GeV 92%*c*

PS 25 GeV 99.93%*c*

SPS 450 GeV 99.998%*c*

LHC 14 TeV 99.9999991%*c*

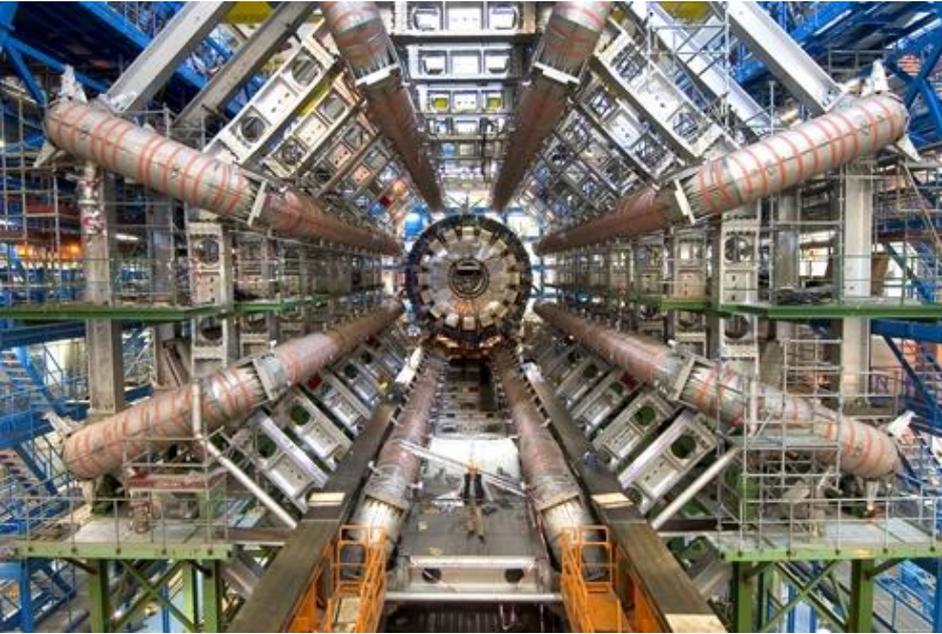


Les expériences

- 2 expériences « généralistes »: ATLAS et CMS (~3000 physiciens chacune)

44m de long, 22m de haut

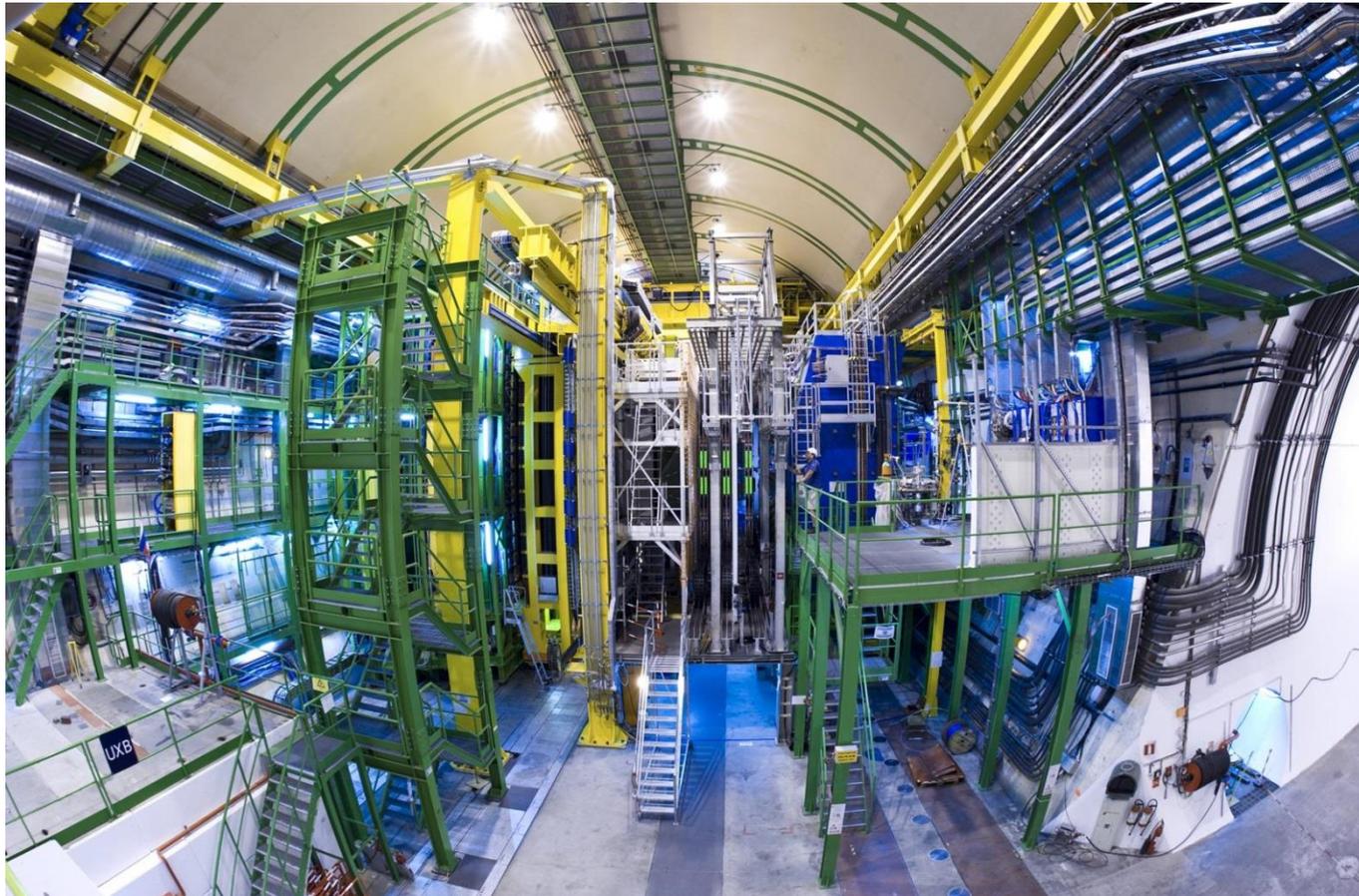
21m de long, 15m de haut



Buts: recherche du boson de Higgs, découverte de nouvelles particules

Les expériences

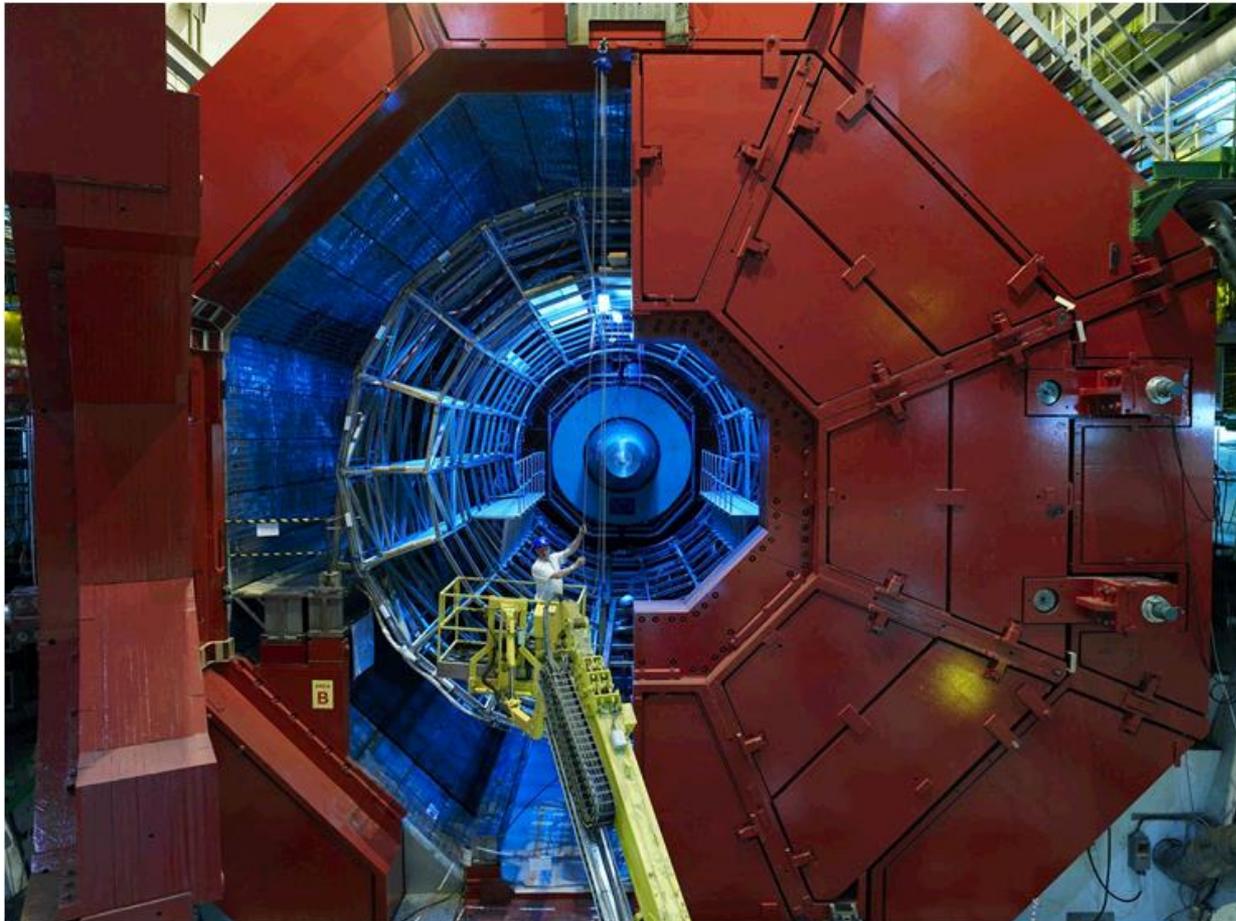
- LHCb: étude de la physique du quark b et c (~1000 physiciens)
20m de long, 10m de haut



Les expériences

- Alice: collisions plomb-plomb pour étudier le plasma quark-gluon (1000 physiciens)

26m de long, 16m de haut



La prise de données

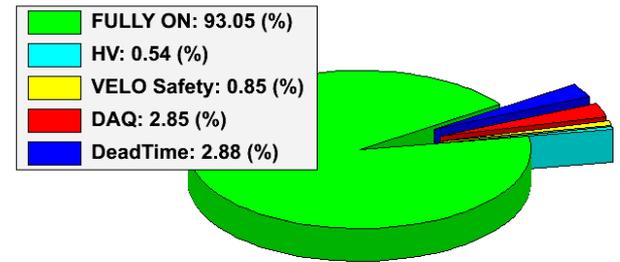
- Le LHC marche 24h/24, 7j/7 (à part pendant les vacances de Noël)
- ATLAS, CMS et LHCb enregistrent ces collisions
- Les physiciens se relayent (3x8h) dans les salles de contrôle pour assurer le bon fonctionnement des détecteurs

Salle de contrôle de LHCb:

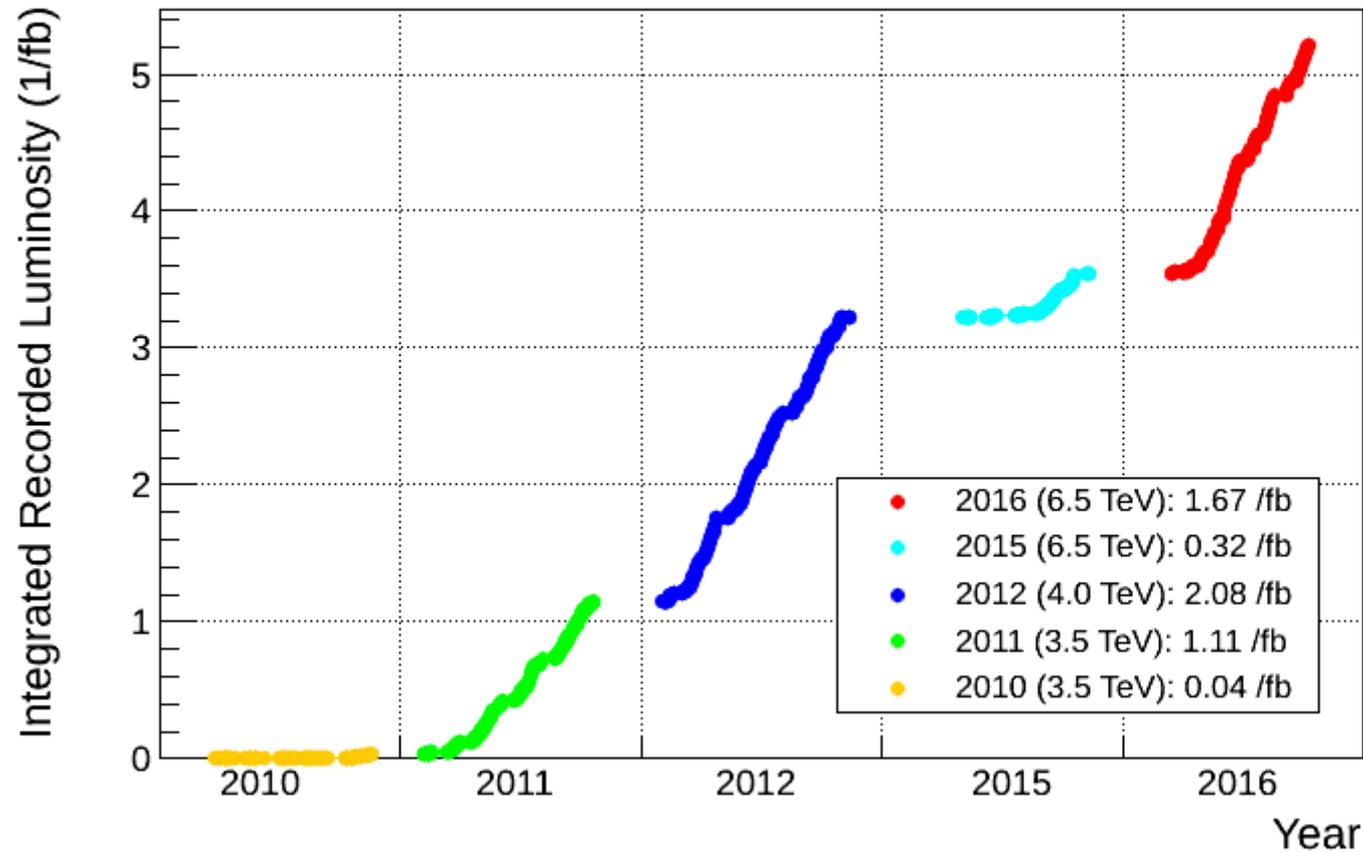


La prise de données

LHCb Efficiency breakdown pp collisions 2010-2012

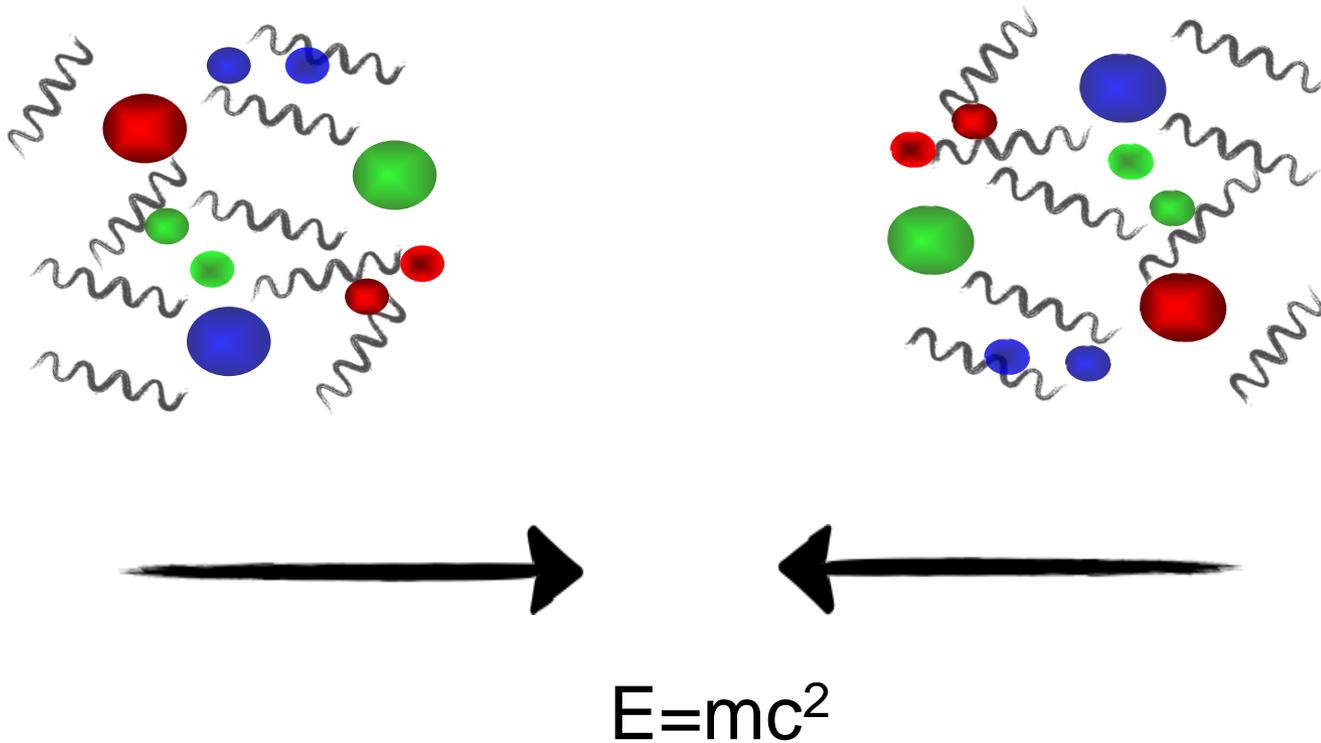


LHCb Cumulative Integrated Recorded Luminosity in pp, 2010-2016



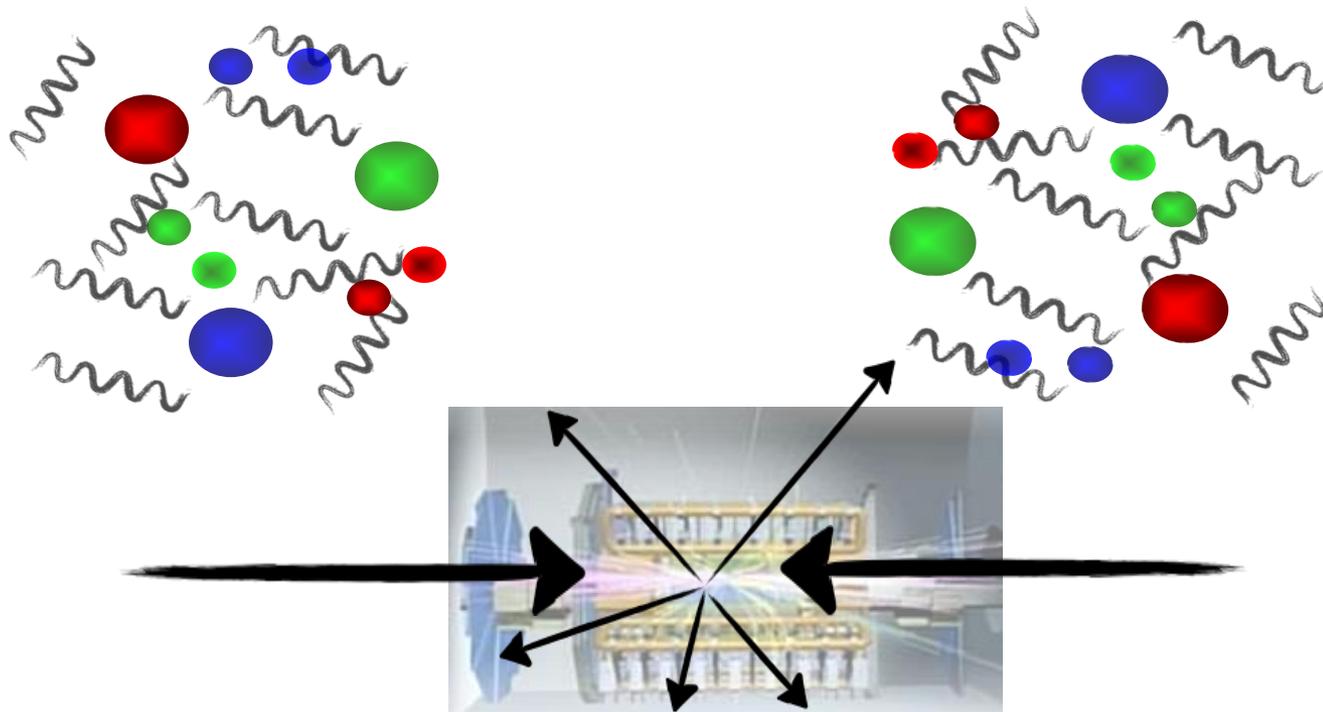
Les collisions

- Le LHC produit **40 millions** de collisions par seconde



Les collisions

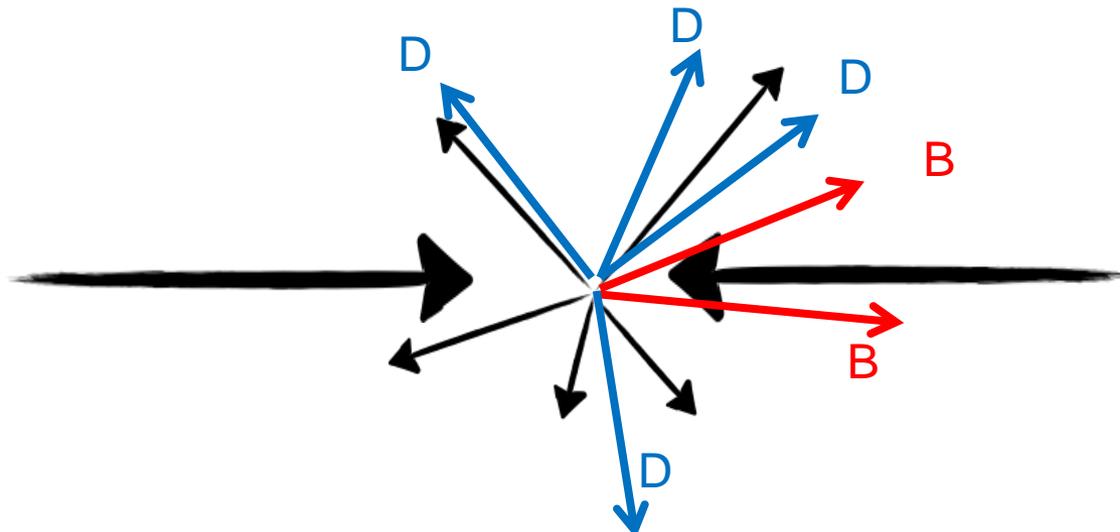
- Le LHC produit **40 millions** de collisions par seconde
- Les expériences détectent les particules créées lors des collisions et leurs produits de désintégration



Dans une collision...

- Pleins de particules de type différents sont créées
- Dans LHC**b**, on s'intéresse aux hadrons **B**, et aussi aux **D**

	1 ^{ÈRE} GÉNÉRATION	2 ^{ÈME} GÉNÉRATION	3 ^{ÈME} GÉNÉRATION
masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	u up	c charm	t top
QUARKS			
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2
	d down	s strange	b bottom



Les désintégrations

- Les hadrons ne sont pas **stables**, à part le proton (sinon on ne serait pas là!)
- Ils se désintègrent de différentes façons tout en respectant des **lois**:
 - Conservation de la **charge électrique**
 - Conservation du **moment cinétique**
 - Conservation de l'**énergie-impulsion**:
désintégration de particules lourdes vers des particules plus légères, le surcroît étant transformé en énergie cinétique
 - Conservation du **nombre baryonique, leptonique**

Exemple du neutron :
(désintégration beta)



$$q=0$$

$$q=1-1+0=0$$

$$B=1$$

$$B=1+0+0=1$$

$$L=0$$

$$L=0+1-1=0$$

Probabilité que le neutron se désintègre de cette façon (rapport d'embranchement) = 100%

Les désintégrations

- Plus une particule est lourde, plus elle se désintègre rapidement et plus elle a de possibilités pour se désintégrer

B⁰ DECAY MODES

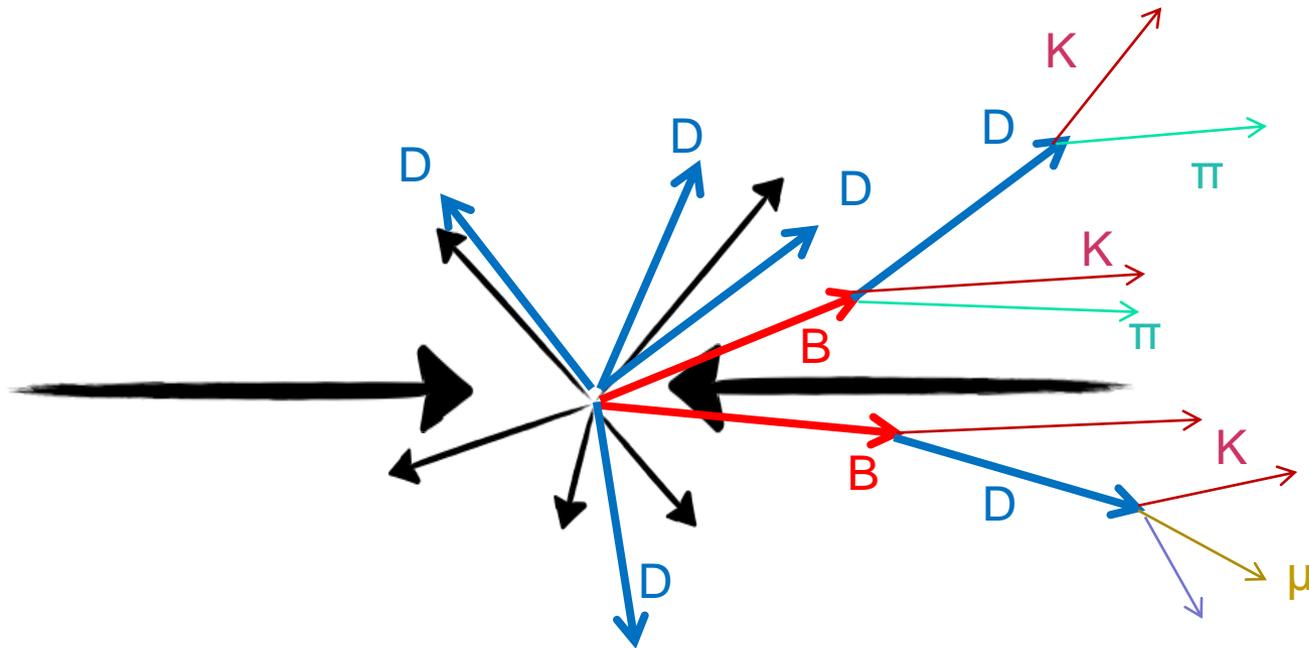
$\bar{D}^0 K^+ \bar{K}^*(892)^0$	$(7.5 \pm 1.7) \times 10^{-4}$	2071	$\bar{D}^*(2007)^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$(1.03 \pm 0.12) \%$	2236
$\bar{D}^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$(1.1 \pm 0.4) \%$	2289	$\bar{D}^*(2007)^0 a_1(1260)^+$	$(1.9 \pm 0.5) \%$	2062
$\bar{D}^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$ nonresonant	$(5 \pm 4) \times 10^{-3}$	2289	$\bar{D}^*(2007)^0 \pi^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$	$(1.8 \pm 0.4) \%$	2219
$\bar{D}^0 \pi^+ \rho^0$	$(4.2 \pm 3.0) \times 10^{-3}$	2207	$\bar{D}^{*0} 3\pi^+ 2\pi^-$	$(5.7 \pm 1.2) \times 10^{-3}$	2196
$\bar{D}^0 a_1(1260)^+$	$(4 \pm 4) \times 10^{-3}$	2123	$D^*(2010)^+ \pi^0$	$< 3.6 \times 10^{-6}$	2255
$\bar{D}^0 \omega \pi^+$	$(4.1 \pm 0.9) \times 10^{-3}$	2206	$D^*(2010)^+ K^0$	$< 9.0 \times 10^{-6}$	CL=90% 2225
$D^*(2010)^- \pi^+ \pi^+$	$(1.35 \pm 0.22) \times 10^{-3}$	2247	$D^*(2010)^- \pi^+ \pi^+ \pi^0$	$(1.5 \pm 0.7) \%$	2235
$D^- \pi^+ \pi^+$	$(1.07 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	2299	$D^*(2010)^- \pi^+ \pi^+ \pi^+ \pi^-$	$(2.6 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	2217
$D^+ K^0$	$< 5.0 \times 10^{-6}$	CL=90% 2278	$\bar{D}^{*0} \pi^+$	$(5.9 \pm 1.3) \times 10^{-3}$	-
$\bar{D}^*(2007)^0 \pi^+$	$(5.19 \pm 0.26) \times 10^{-3}$	2256	$\bar{D}_1^*(2420)^0 \pi^+$	$(1.5 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	S=1.3 2081
$\bar{D}_{CP(+)}^{*0} \pi^+$	[qqq] $(2.9 \pm 0.7) \times 10^{-3}$	-	$\bar{D}_1(2420)^0 \pi^+ \times B(\bar{D}_1^0 \rightarrow$	$(1.9 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	2081
$D_{CP(-)}^{*0} \pi^+$	[qqq] $(2.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	-	$\bar{D}^0 \pi^+ \pi^-)$		
$\bar{D}^*(2007)^0 \omega \pi^+$	$(4.5 \pm 1.2) \times 10^{-3}$	2149	$\bar{D}_2^*(2462)^0 \pi^+$	$(3.5 \pm 0.4) \times 10^{-4}$	-
$\bar{D}^*(2007)^0 \rho^+$	$(9.8 \pm 1.7) \times 10^{-3}$	2181	$\times B(\bar{D}_2^*(2462)^0 \rightarrow D^- \pi^+)$		
$\bar{D}^*(2007)^0 K^+$	$(4.21 \pm 0.35) \times 10^{-4}$	2227	$\bar{D}_0^*(2400)^0 \pi^+$	$(6.4 \pm 1.4) \times 10^{-4}$	2128
$\bar{D}_{CP(+)}^{*0} K^+$	[qqq] $(2.8 \pm 0.4) \times 10^{-4}$	-	$\times B(\bar{D}_0^*(2400)^0 \rightarrow D^- \pi^+)$		
$\bar{D}_{CP(-)}^{*0} K^+$	[qqq] $(2.32 \pm 0.33) \times 10^{-4}$	-	$\bar{D}_1(2421)^0 \pi^+$	$(6.8 \pm 1.5) \times 10^{-4}$	-
$\bar{D}^*(2007)^0 K^*(892)^+$	$(8.1 \pm 1.4) \times 10^{-4}$	2156	$\times B(\bar{D}_1(2421)^0 \rightarrow D^{*-} \pi^+)$		
$\bar{D}^*(2007)^0 K^+ \bar{K}^0$	$< 1.06 \times 10^{-3}$	CL=90% 2132	$\bar{D}_2^*(2462)^0 \pi^+$	$(1.8 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	-

Etc !!!

- Les hadrons B se désintègrent souvent en un D

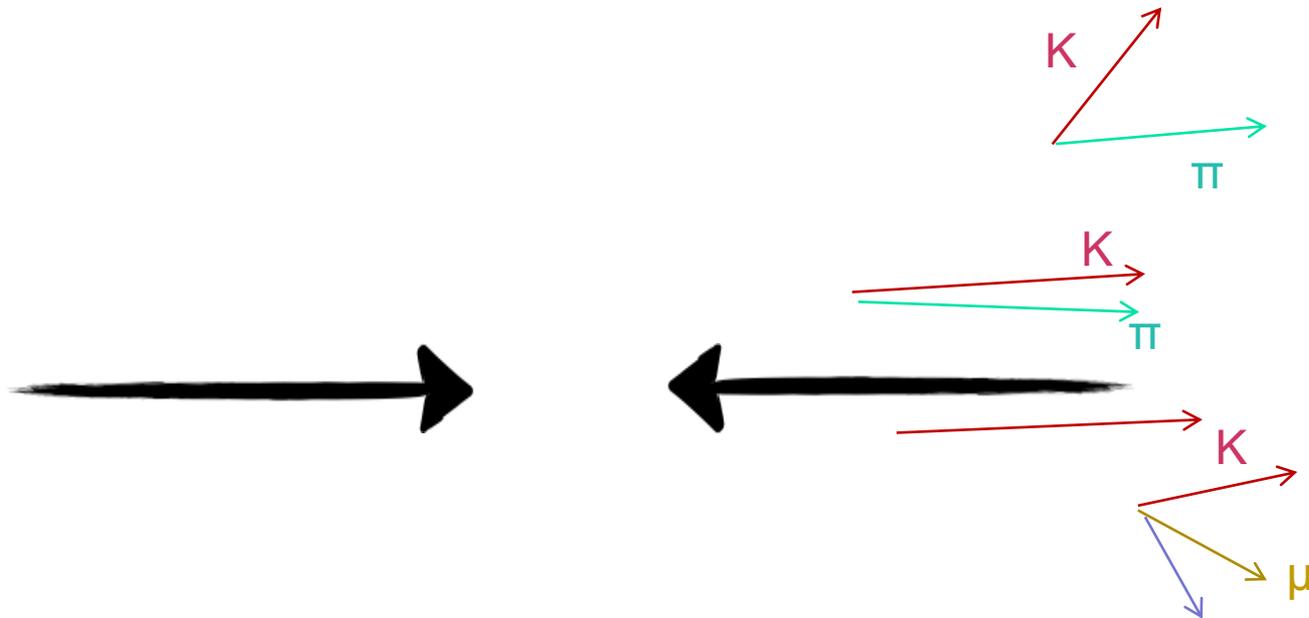
Dans une collisions...

- Plein de particules de type différents sont créées
- Dans LHC**b**, on s'intéresse aux hadrons **B**, et aussi aux **D**



Dans une collisions...

- Plein de particules de type différents sont créées
- Dans LHC**b**, on s'intéresse aux hadrons **B**, et aussi aux **D**

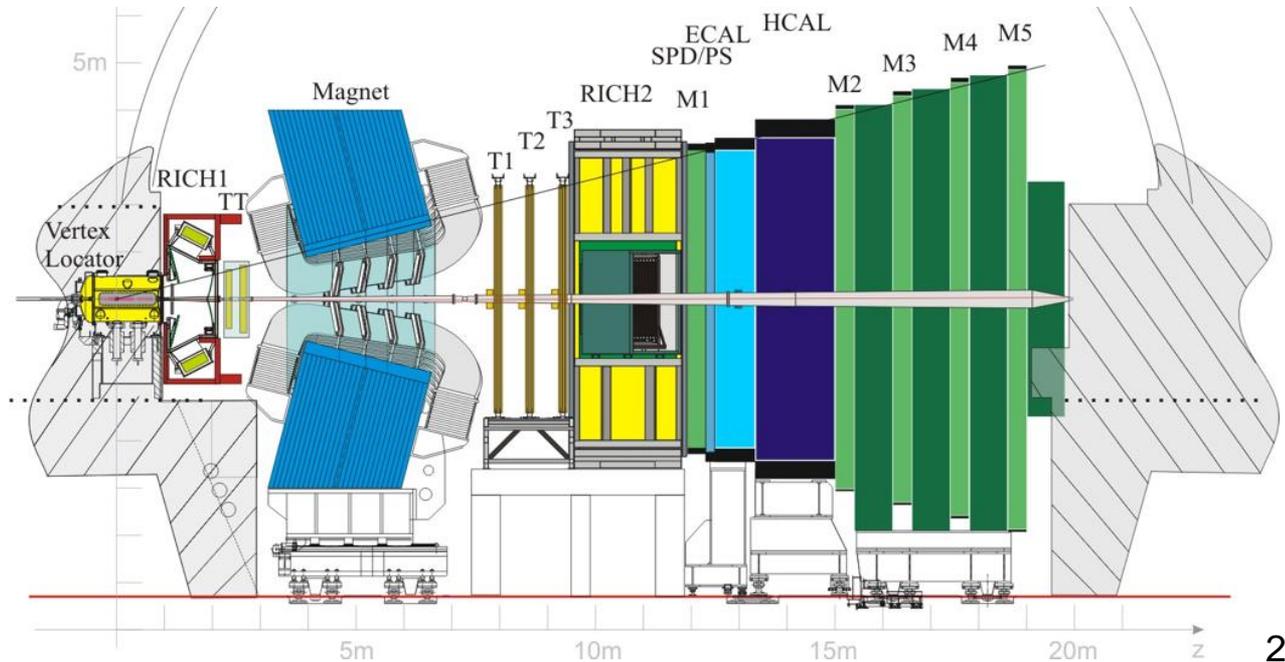


- Dans les détecteurs, on « voit » les produits de désintégrations stables ou à durée de vie longue (grâce au boost relativiste!)

Les collisions dans LHCb

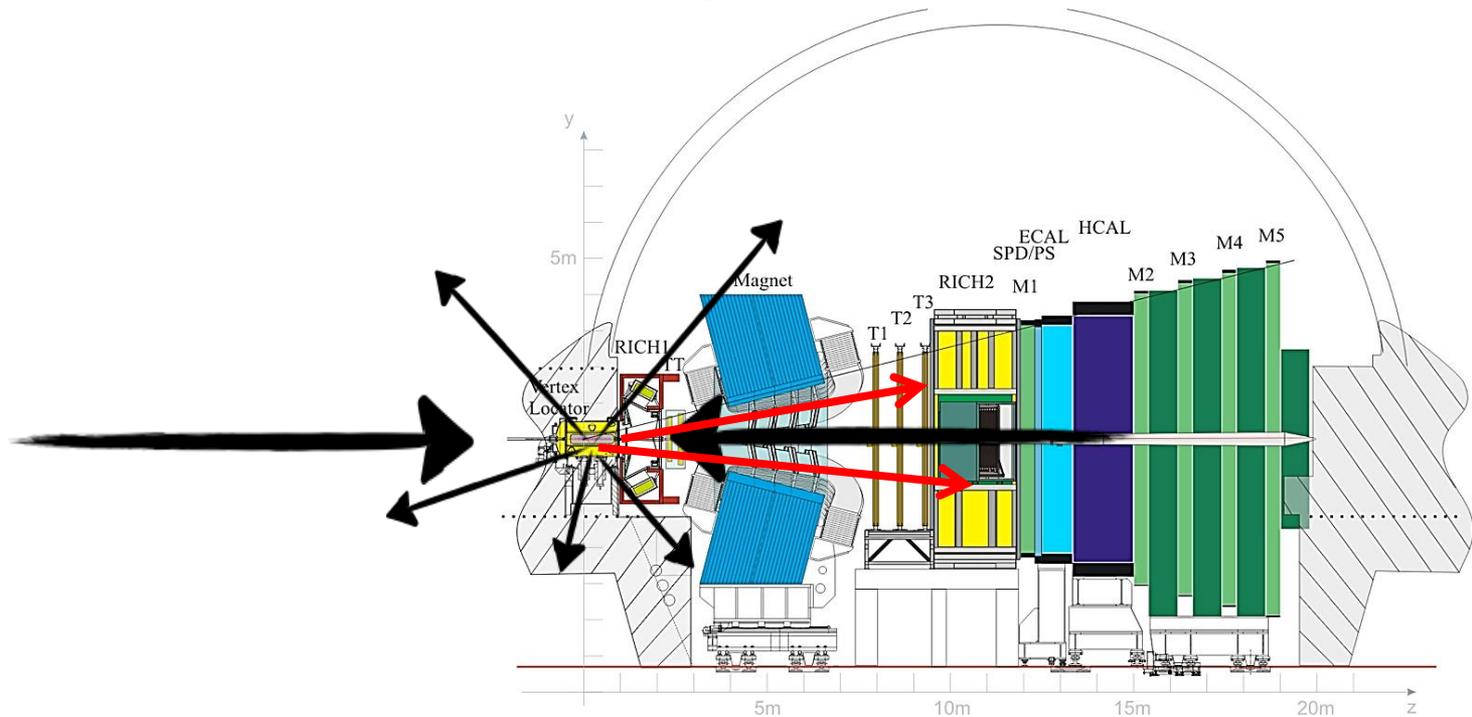
Des centaines de particules sont créées à chaque collisions.

Les particules les plus lourdes se désintègrent en particules « **stables** », qu'on peut **voir** dans le détecteur: **photon, électron, muon, pion, kaon, proton, neutron**



Les collisions dans LHCb

- Contrairement a ATLAS et CMS, LHCb couvre seulement la direction vers « l'avant », car c'est là où sont produits les mésons B

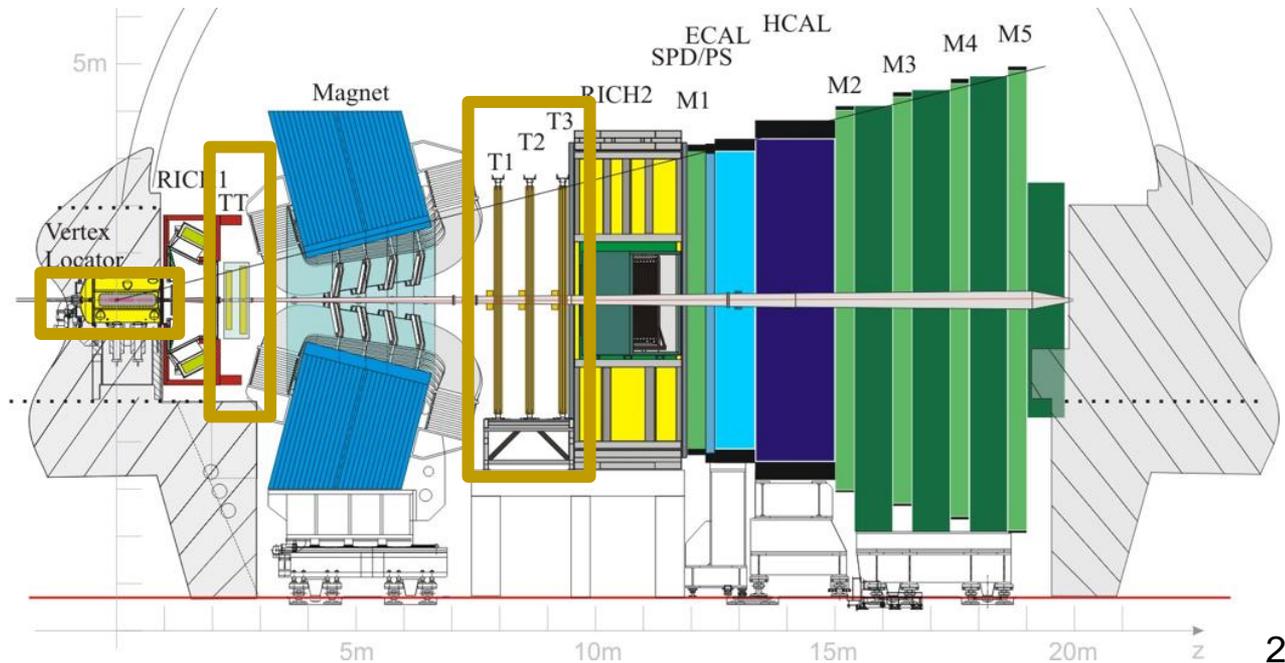


La détection des particules

Des centaines de particules sont créées à chaque collisions

Pour chacune d'elle, on veut savoir:

- La trajectoire → **détecteurs de trace** (pour les particules chargées!)

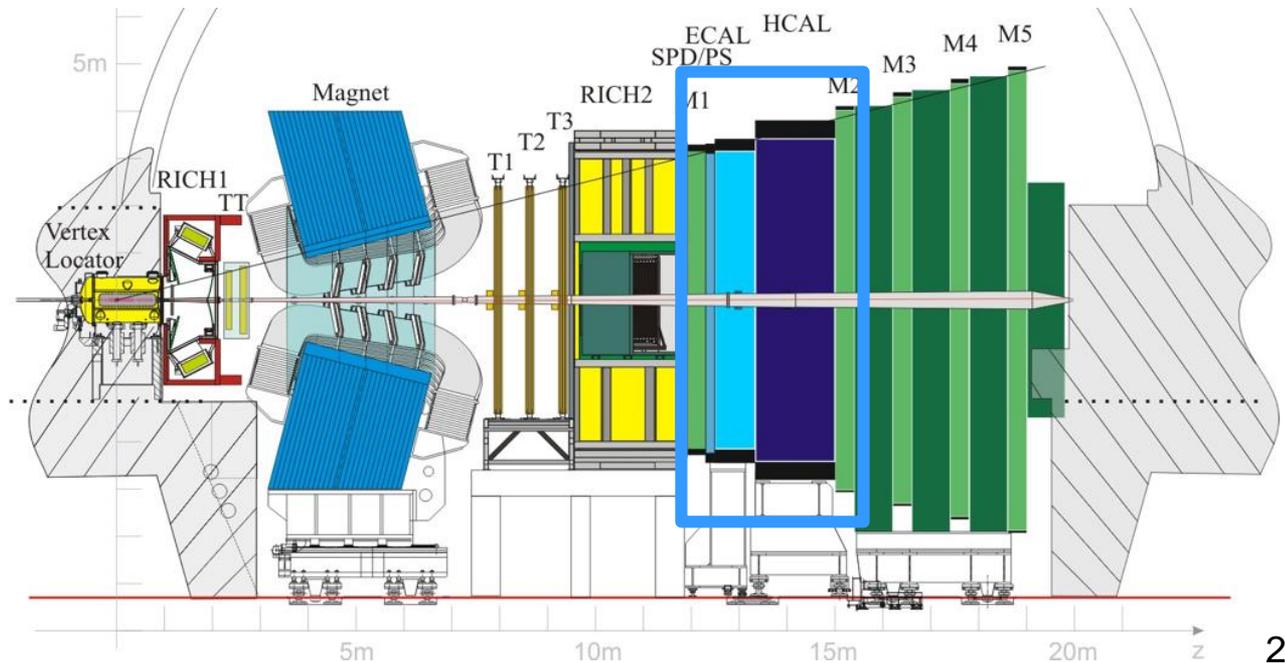


La détection des particules

Des centaines de particules sont créées à chaque collisions

Pour chacune d'elle, on veut savoir:

- La trajectoire → détecteurs de trace
- L'énergie → **calorimètres**

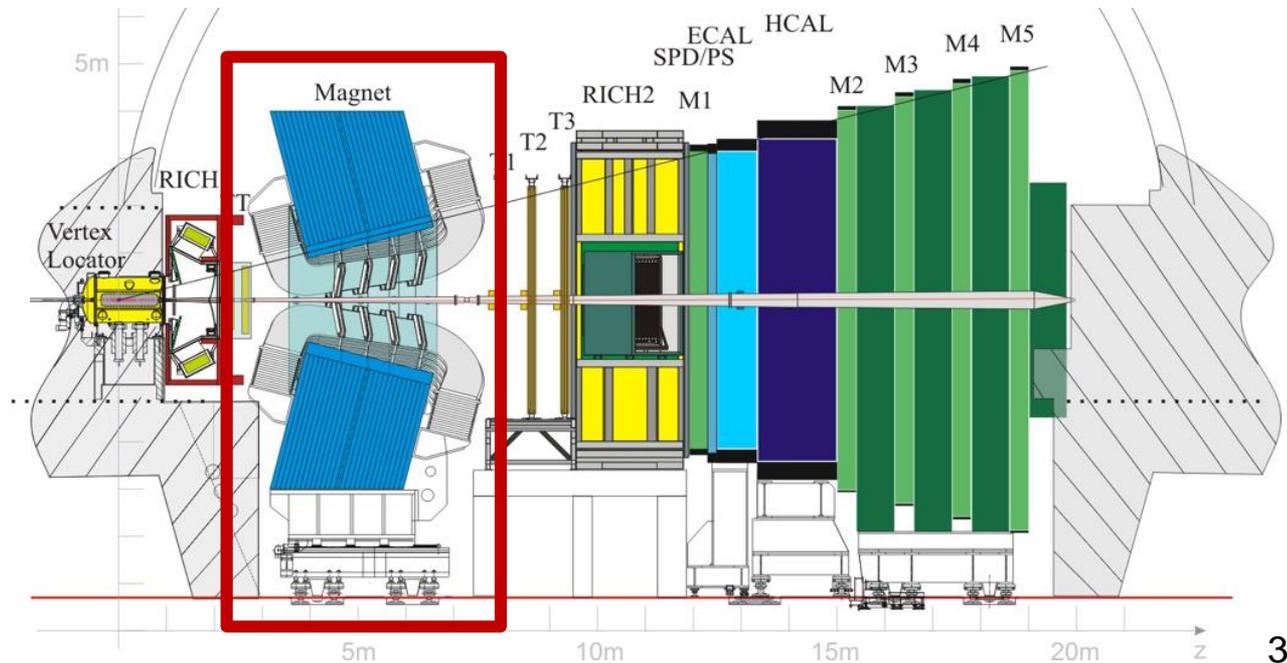
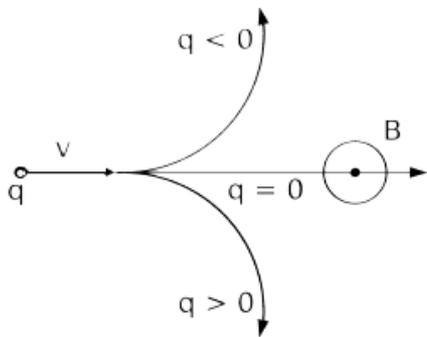


La détection des particules

Des centaines de particules sont créées à chaque collisions

Pour chacune d'elle, on veut savoir:

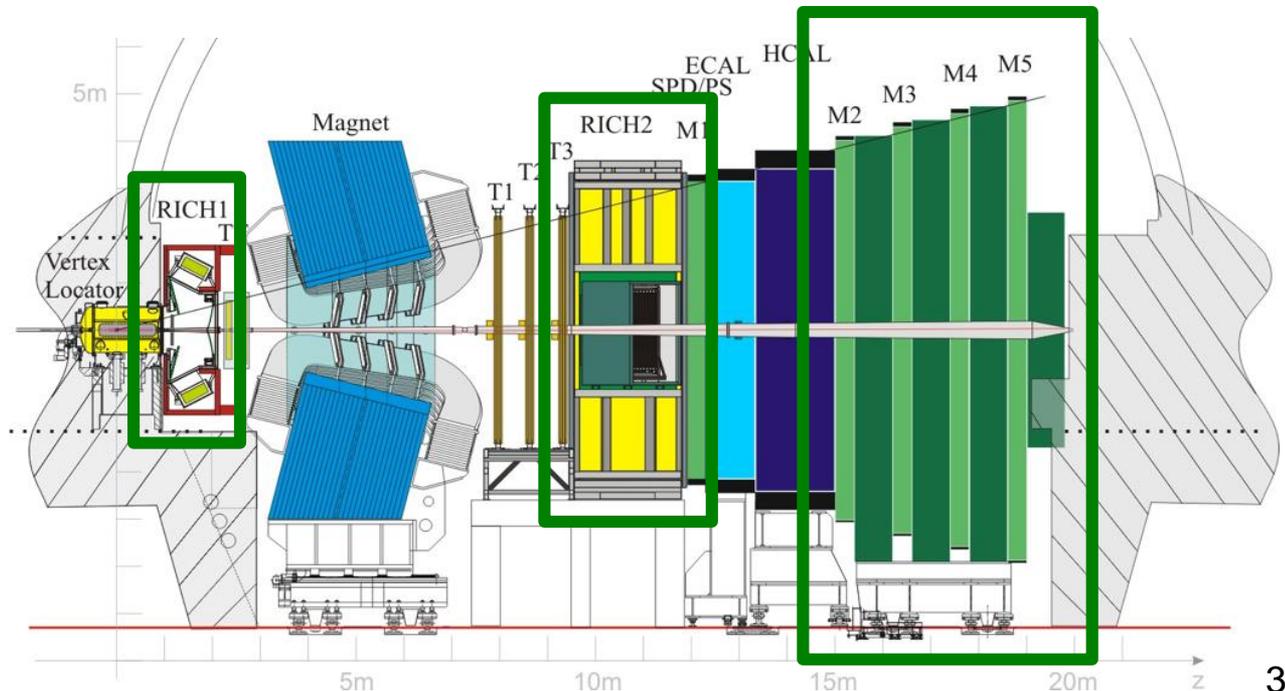
- La trajectoire → détecteurs de trace
- L'énergie → calorimètre
- L'impulsion → **champ magnétique** (pour les particules chargées!)



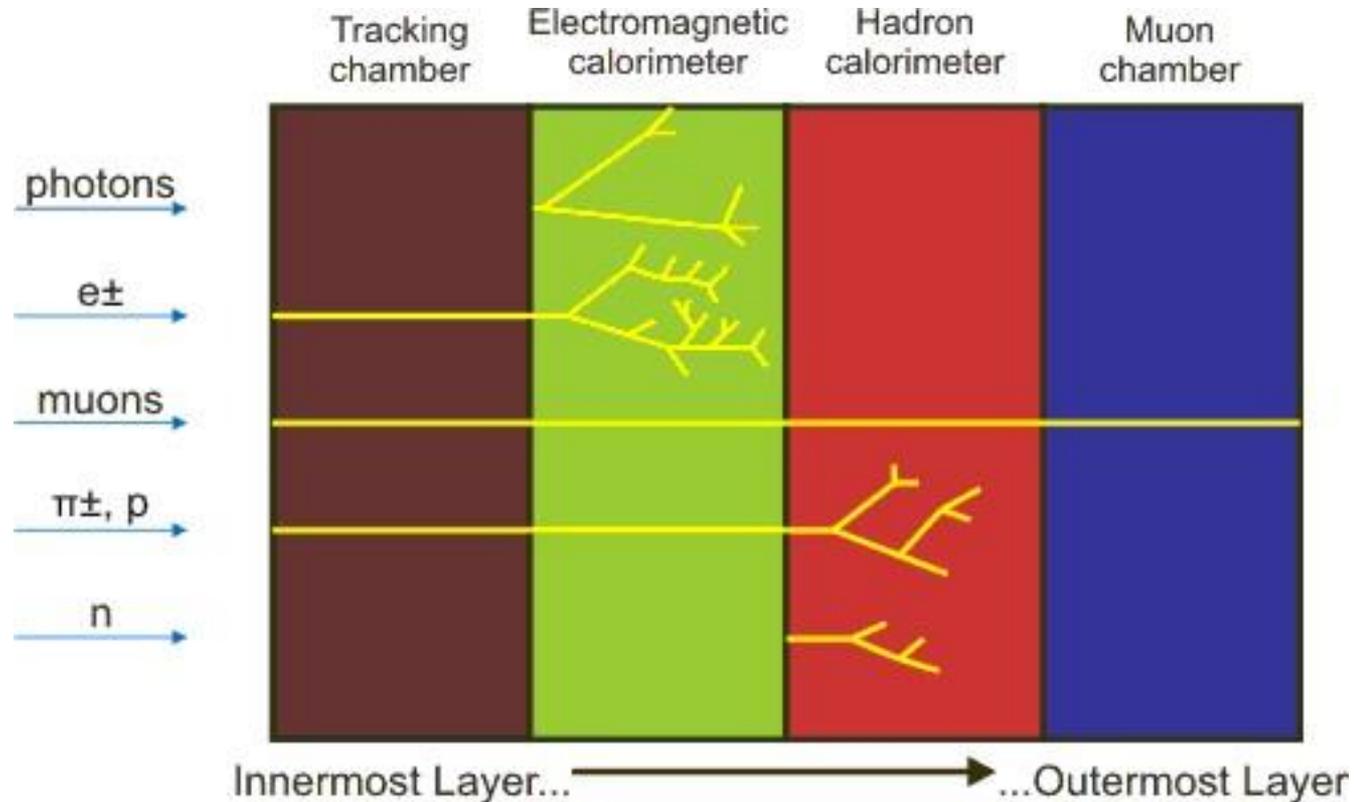
La détection des particules

Des centaines de particules sont créées à chaque collisions
Pour chacune d'elle, on veut savoir:

- La trajectoire → détecteurs de trace
- L'énergie → calorimètre
- L'impulsion → champ magnétique
- La masse → détecteurs de muons, effets cherenkov

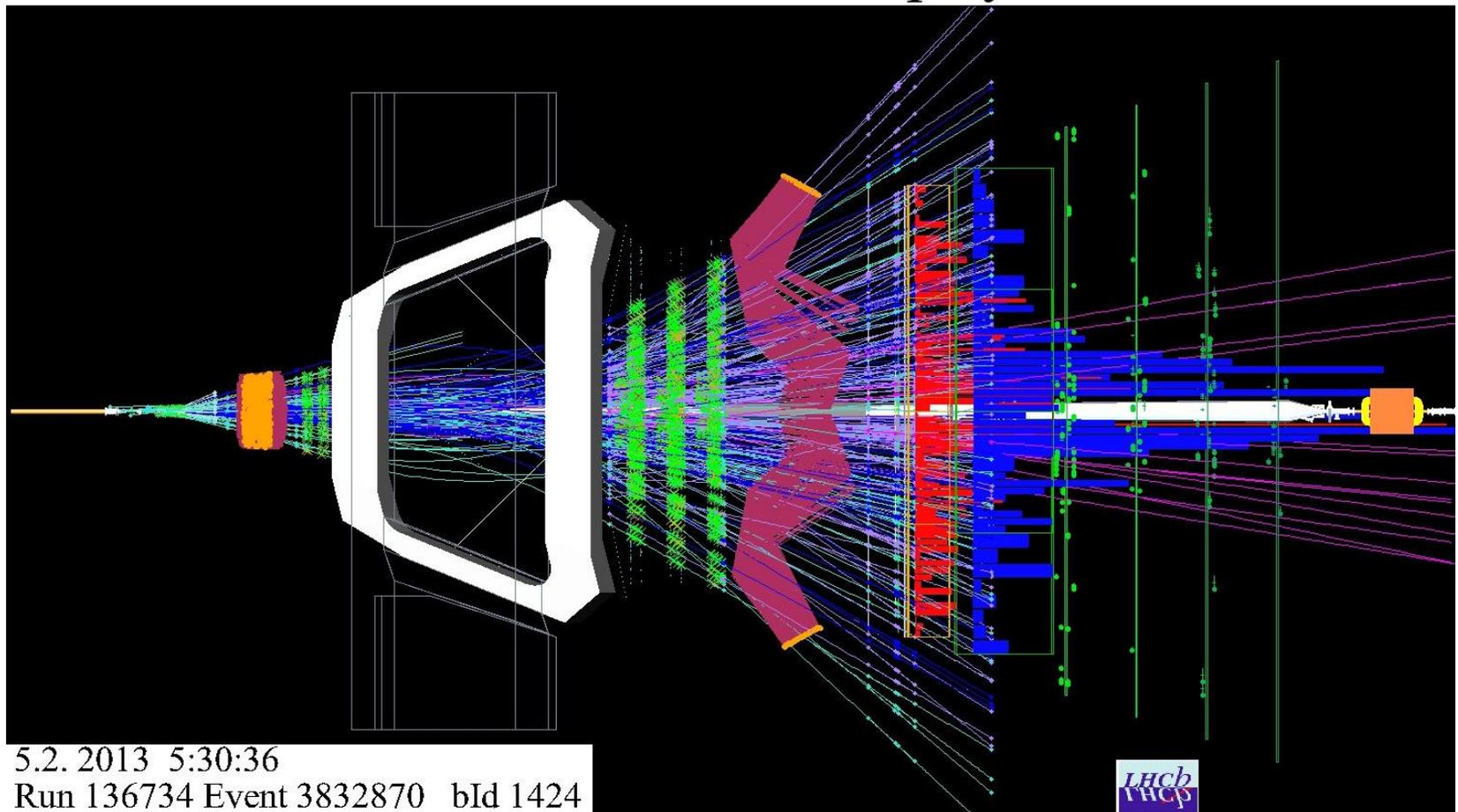


Un détecteur ordonné



Un évènement... en vrai

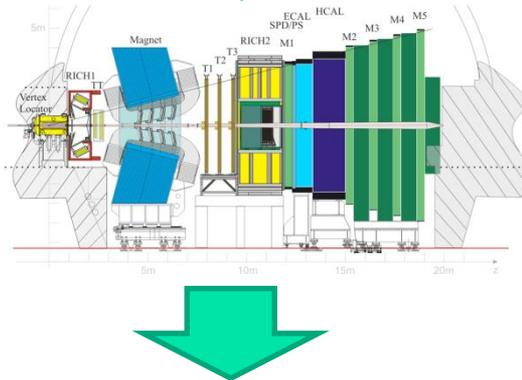
- Un évènement vu de dessus :



La simulation

- Malheureusement, les détecteurs ne sont jamais parfait ☹
- Pour comprendre la réponse d'un détecteur on a besoin de la **simulation**
- Dans la simulation on connaît **TOUT**

Collisions \Rightarrow particules
d'impulsion p , énergie E



Reconstruction: on mesure des
particules d'impulsion p' , énergie E'

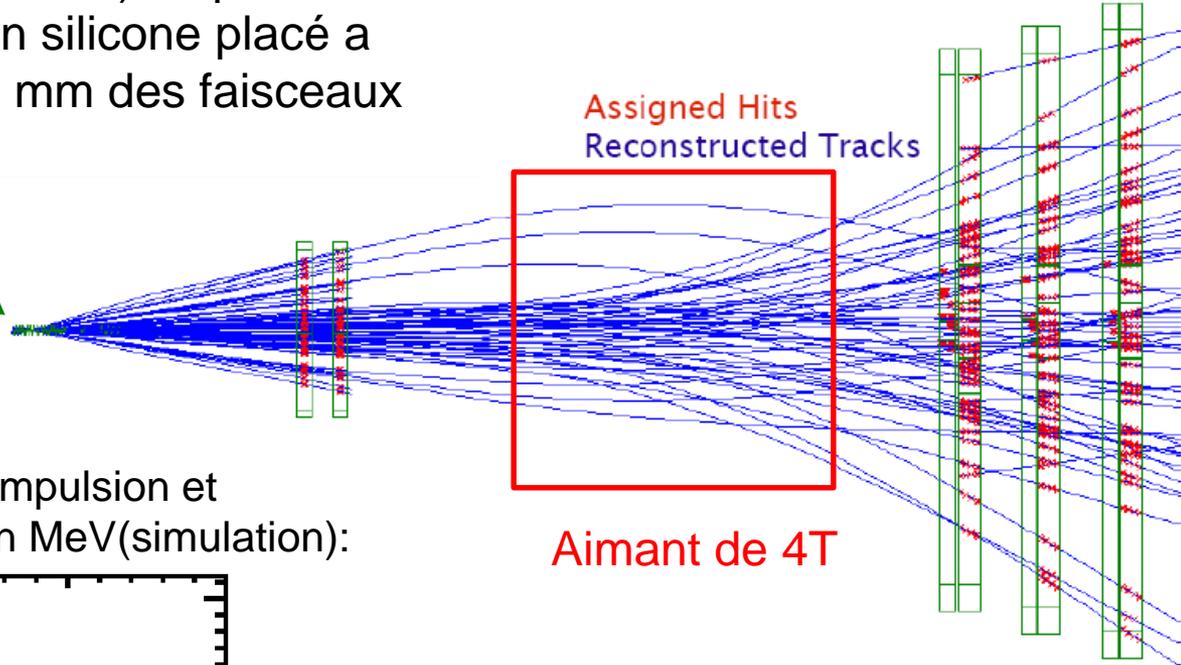
Grace à la simulation on peut
savoir:

- Combien il y a de particules au départ, et combien on en reconstruit: **efficacité**
- la différence entre p , E et p' , E' : **résolution**
- Et combien de fois on se trompe!

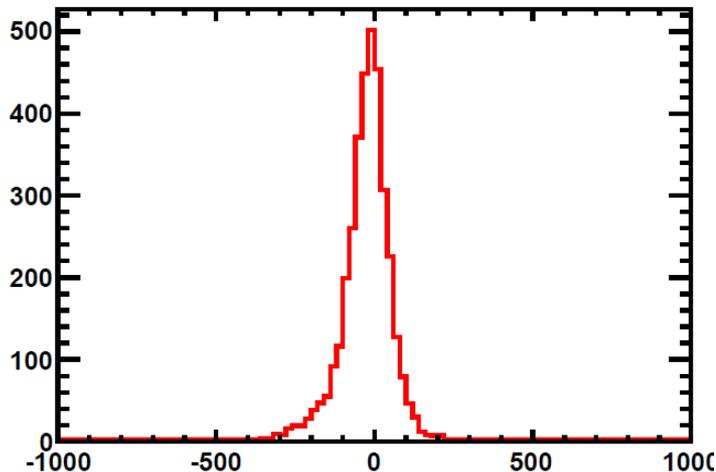
La mesure de l'impulsion



VELO (vertex locator): capteurs en silicium placés à 8 mm des faisceaux



Différence entre la vraie impulsion et l'impulsion reconstruite en MeV (simulation):



Efficacité de reconstruction des traces: 96%

Résolution: 0.5% de l'impulsion

La mesure de l'énergie

La mesure de l'énergie des particules se fait dans des **milieux très denses et instrumentés** : les **calorimètres**. Les particules y déposent toute leur énergie (sauf les muons et les neutrinos)

→ **Mesure destructive**

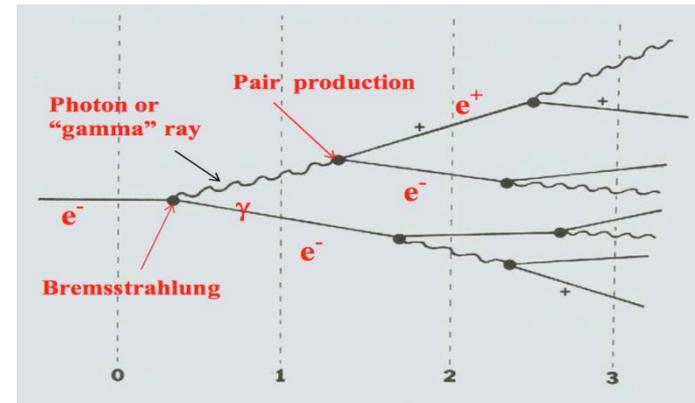
Calorimétrie électromagnétique (ECAL) :

- Détection des électrons :

création de paires $\gamma \rightarrow e^+ e^-$
bremsstrahlung $e \rightarrow \gamma e$

} **gerbe électromagnétique**

- De même détection des désintégrations $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$ et des $\gamma \rightarrow e^+ e^-$.



Calorimétrie hadronique (HCAL) :

Collisions inélastiques des **n, p, π^\pm** sur un noyau de la matière composant le calorimètre (par exemple du Pb)

→ casse le noyau

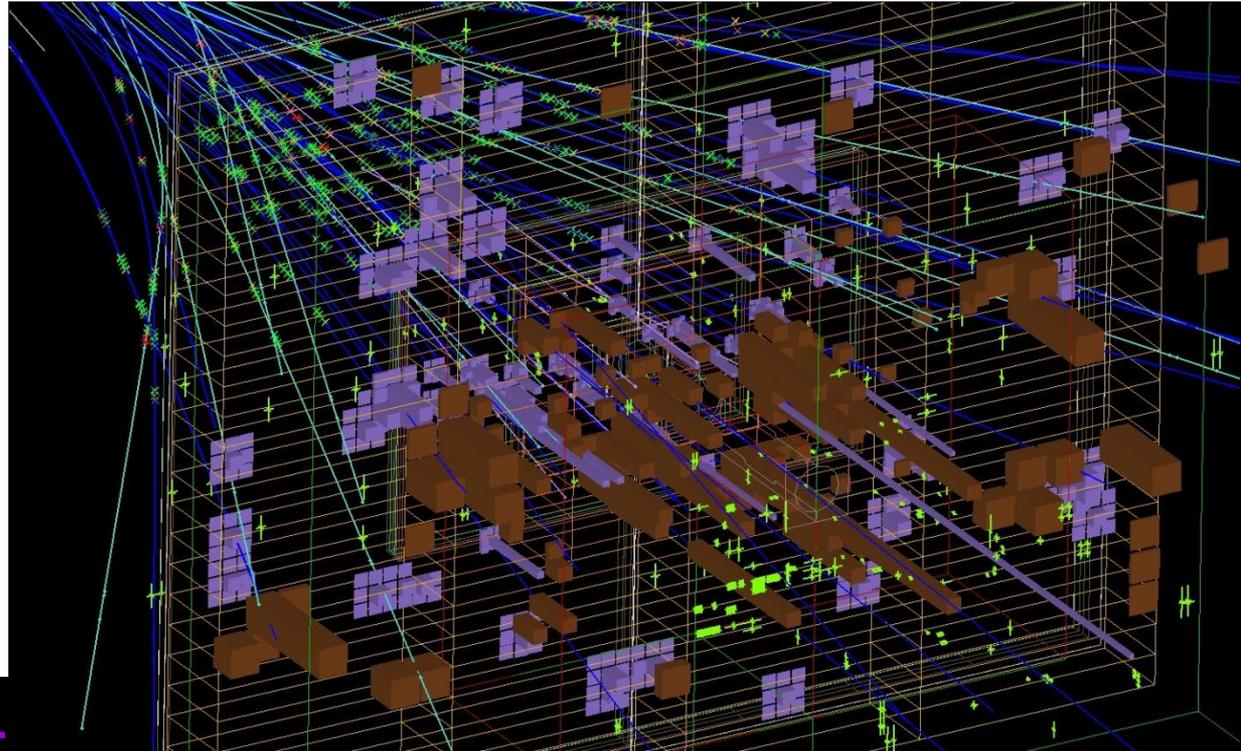
→ production de hadrons secondaires → etc...

→ développement d'une **gerbe hadronique** par interaction forte.

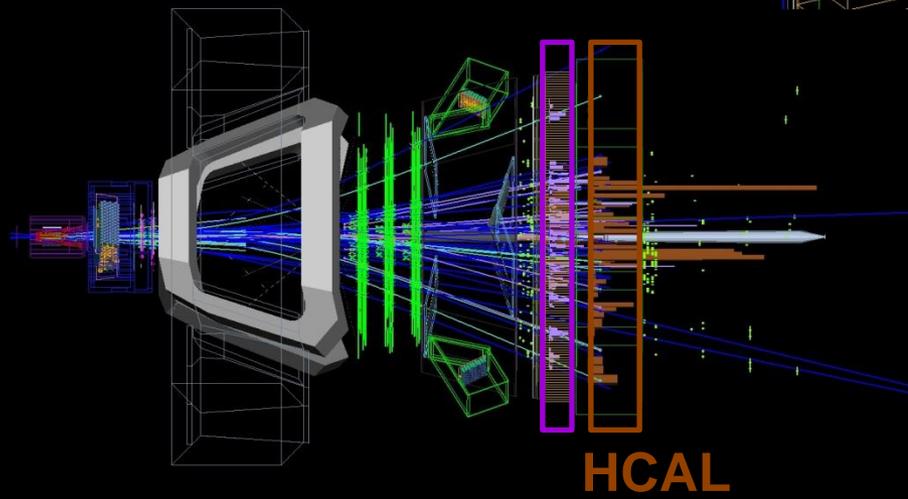
Gerbe de taille supérieure à celle de la gerbe électromagnétique et se développant plus tardivement → le calorimètre hadronique est placé après le calorimètre électromagnétique.

La mesure de l'énergie

L'énergie mesurée d'une particule est ici schématiquement représentée par la hauteur des « tours »



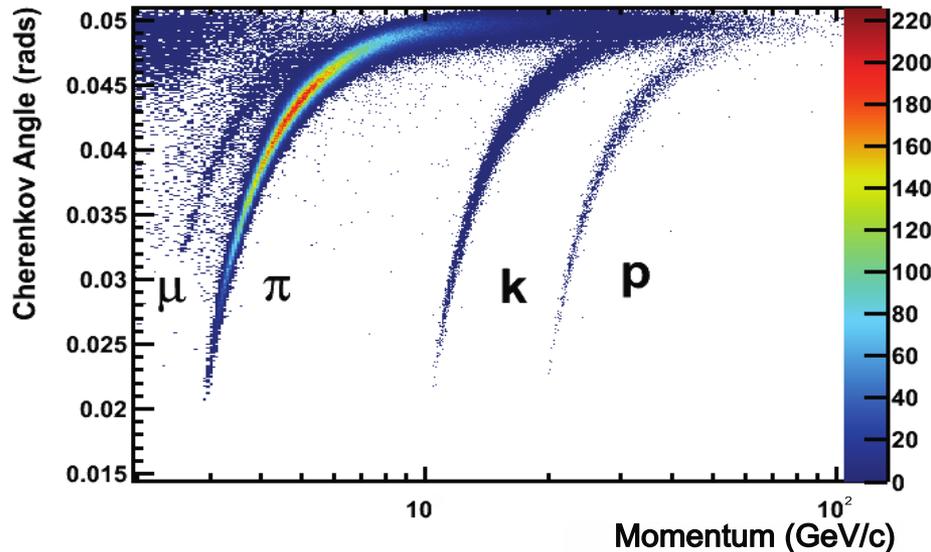
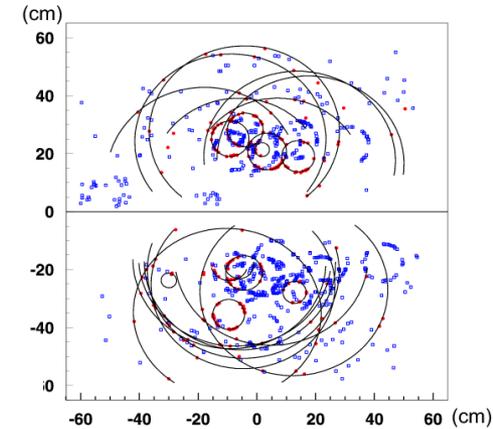
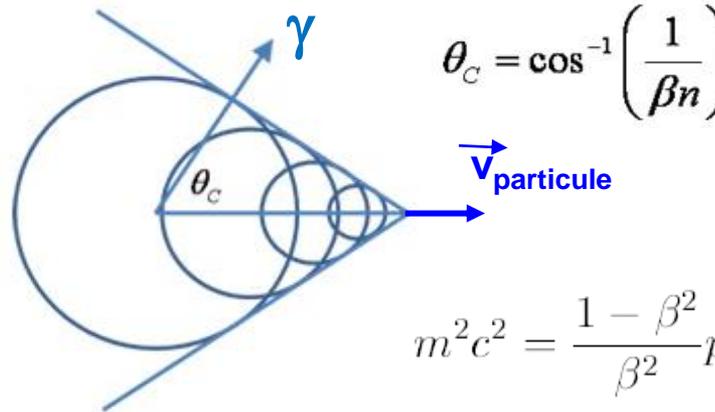
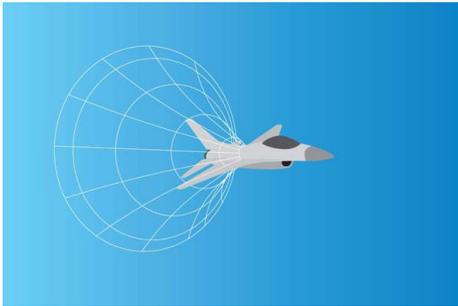
ECAL



Mais on ne sait pas ici quelle sont les « **identités** » des particules qui ont allumées les tours...

Comment identifier les particules ?

- Effet cherenkov : lorsqu'une particule va plus vite que la lumière dans un milieu d'indice n , elle émet des photons (γ)

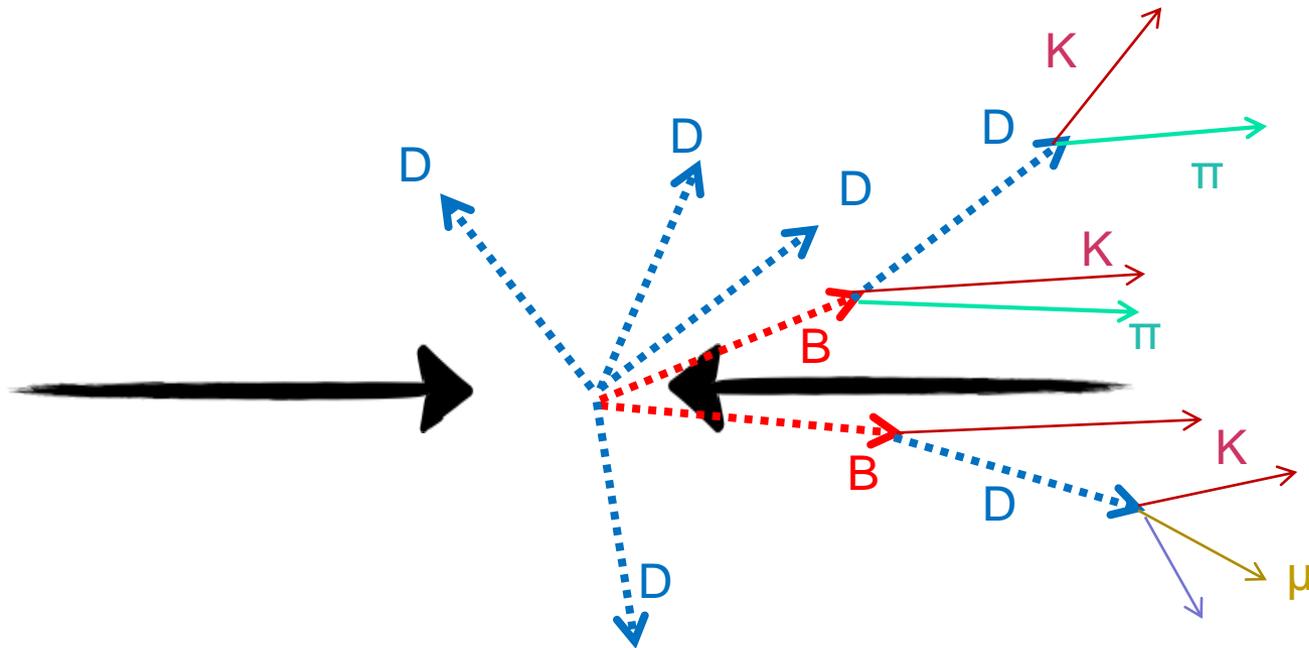


Efficacité d'identification :

- électron :
~ 90 % (~ 5 % $e \rightarrow h$ mis-id)
- kaon :
~ 95 % (~ 5 % $\pi \rightarrow K$ mis-id)
- muon (pas grâce cherenkov) :
~ 97 % (1-3 % $\pi \rightarrow \mu$ mis-id)

Ensuite

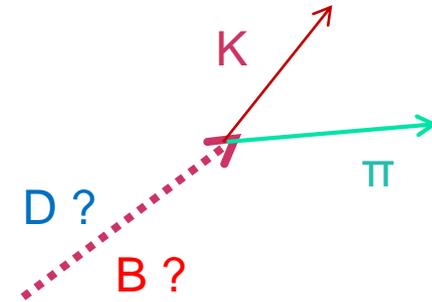
- Maintenant on a mesuré toutes les particules stables:



- Mais on veut savoir d'où elles viennent: un B ? un D ?

La masse invariante

- Avec les énergies et les impulsions mesurées pour K et π , on construit la masse invariante
- On compare avec la vraie masse des B et D
- Ça n'est peut être pas exactement la même à cause de la résolution!



D^0

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

$$\text{Mass } m = 1864.83 \pm 0.14 \text{ MeV}$$

B^0

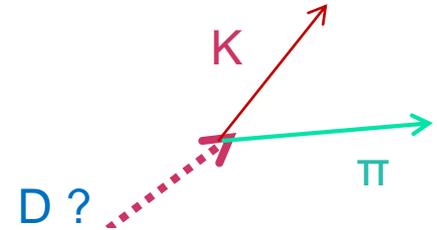
$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

I, J, P need confirmation. Quantum numbers shown are quark-model predictions.

$$\text{Mass } m_{B^0} = 5279.50 \pm 0.30 \text{ MeV}$$

La masse invariante

- Avec les énergies et les impulsions mesurées pour K et π , on construit la masse invariante



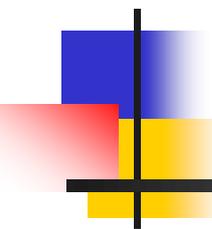
Ca va être à vous de trouver!

B^0

$$I(J^P) = \frac{1}{2}(0^-)$$

I, J, P need confirmation. Quantum numbers shown are quark-model predictions.

$$\text{Mass } m_{B^0} = 5279.50 \pm 0.30 \text{ MeV}$$



Bonus

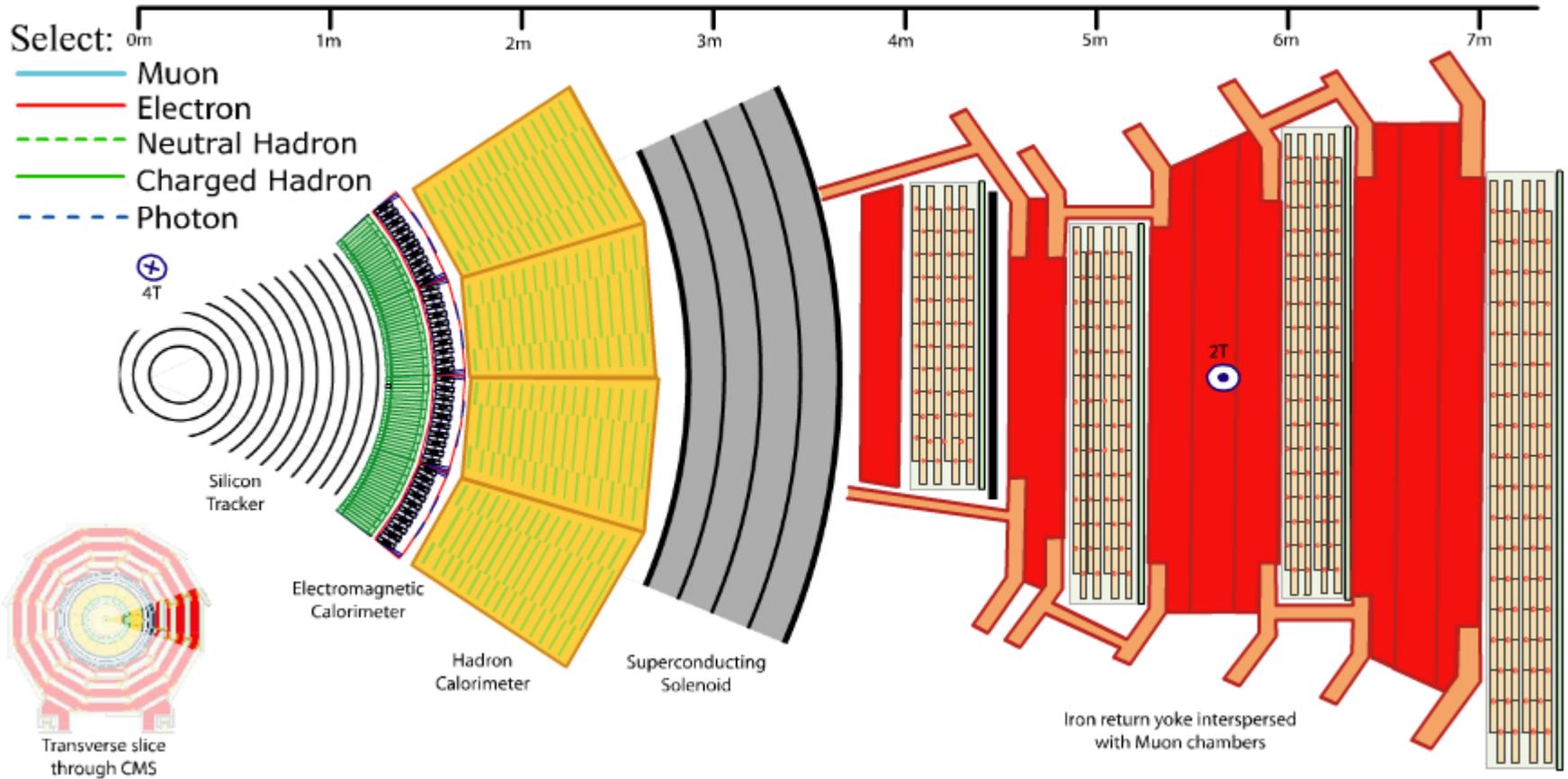
Le LHC: un microscope géant

- Grâce à l'énergie très élevée des protons qui y sont accélérés, le LHC permet de sonder la matière à très petite distance ($\sim 10^{-20}$ m):
 - $\rightarrow \lambda = hc/E$ ($E \uparrow \rightarrow \lambda \downarrow$) : il confère aux sous constituants du proton un pouvoir de résolution très élevé.
- Il permet de recréer les conditions de température et densité d'énergie qui régnaient aux tous premiers instants de l'Univers
- Accès aux particules instables qui existaient après le big bang et qui ont disparues
- On utilise un collisionneur:

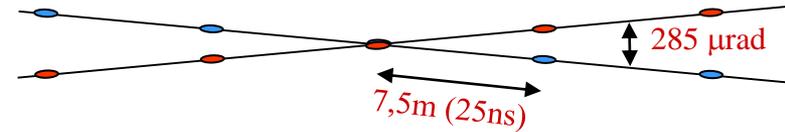


Pour créer une particule de masse m il faut $E + E > mc^2$

Fonctionnement d'un détecteur



Les paramètres faisceaux du LHC (conception nominale)



Energies des protons	7 TeV
Vitesse des protons	99,999 999 1 %c
Nbr de paquet par faisceau	2808
Nbr de protons par paquet	$1,1 \times 10^{11}$
Longueur des paquets	7,5cm
Largeur des paquets	16,6 μm
Espacement des paquets	25 ns
Frequence de croisement	40 MHz
Luminosité nominale	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Le taux de collisions est proportionnelle à la **luminosité L**:

Nbr. par protons/paquet

Nbr. de paquets

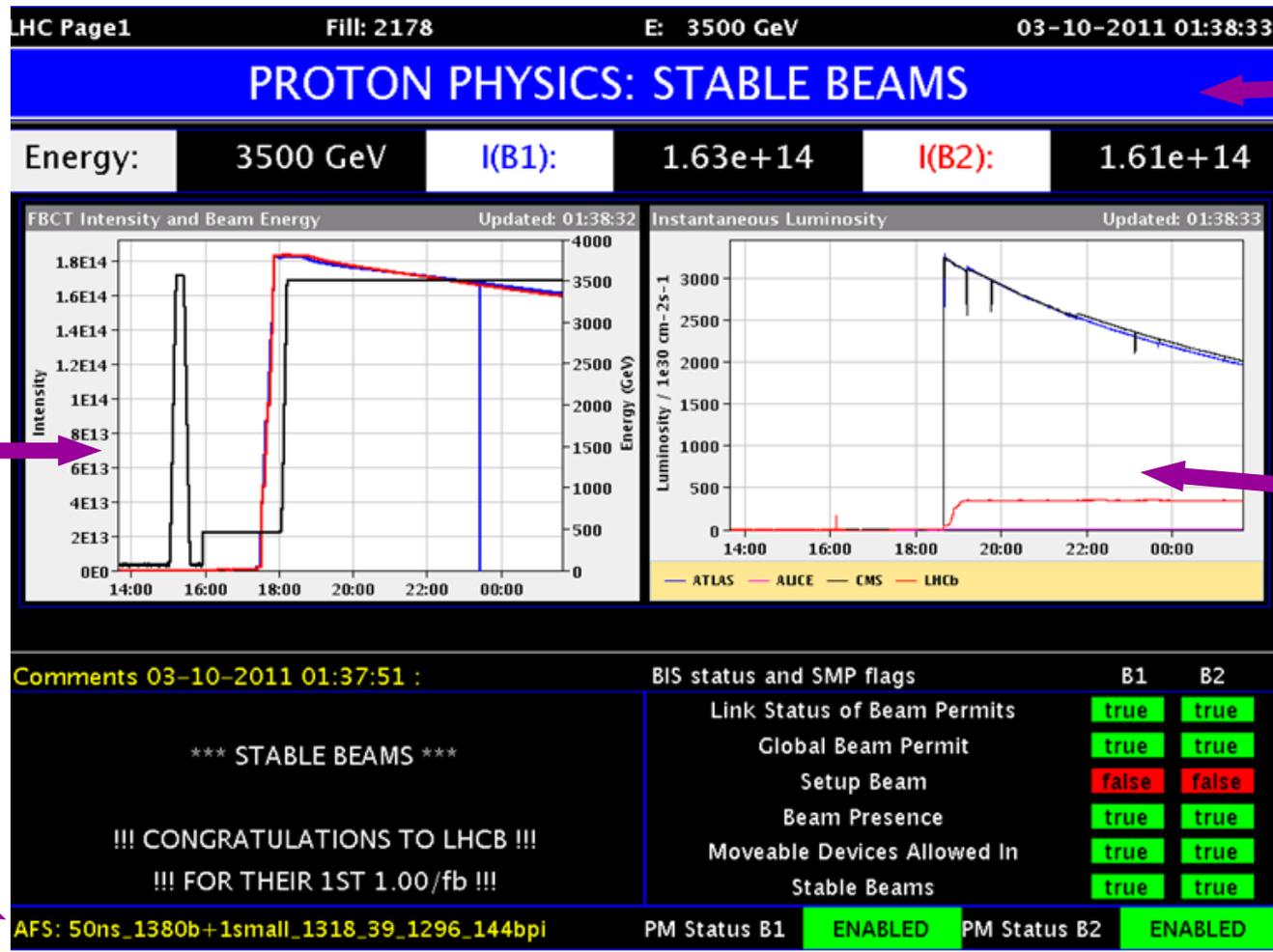
Fréquence de révolution

$$L = \frac{N^2 k_b f}{4 \pi \sigma_x \sigma_y}$$

Largeur des paquets ($\sigma_{x,y} = 16 \mu\text{m}$)

Le fonctionnement

- Lorsque tous les protons ont été injectés, il faut ~20 min pour monter en énergie
- Puis lorsque les faisceaux sont déclarés «stables», les expériences peuvent prendre des données. Cela peut durer plusieurs heures.



État de la machine

Intensité des faisceaux

Luminosités instantanées des 4 expériences

Configuration des faisceaux