

Mesure des processus induits par des photons dans CMS et détection des protons diffusés au LHC



Etude des collisions entre photons au LHC



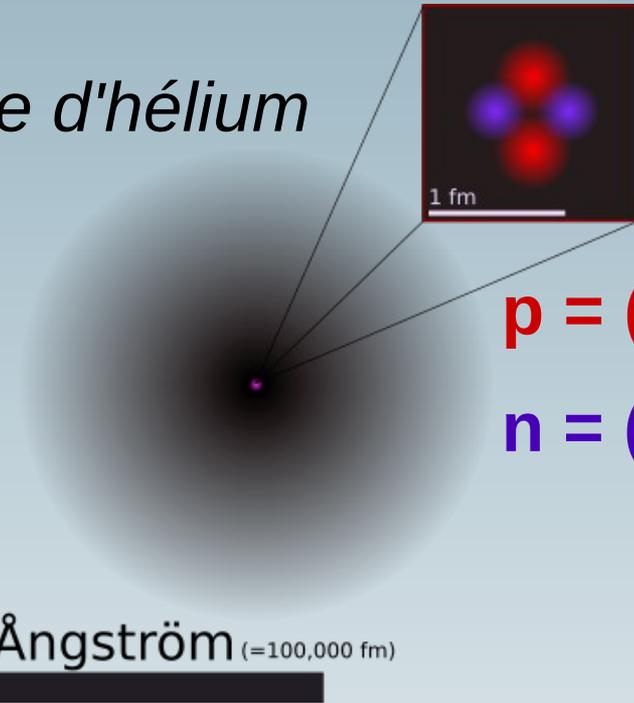
Xavier Rouby – 26 septembre 2008

Université catholique de Louvain

Introduction:
le Modèle Standard,
le LHC et CMS

La matière

L'atome d'hélium



p = (uud)

n = (udd)

Noyau :

les protons et neutrons ne sont pas des particules élémentaires mais sont constitués des quarks u et d

Nuage électronique :

les électrons sont des particules élémentaires

fermions

<i>quarks</i>	<i>u c t</i>	<i>$\bar{u} \bar{c} \bar{t}$</i>
	<i>d s b</i>	<i>$\bar{d} \bar{s} \bar{b}$</i>
<i>leptons</i>	<i>$\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$</i>	<i>$\bar{\nu}_e \bar{\nu}_\mu \bar{\nu}_\tau$</i>
	<i>$e^- \mu^- \tau^-$</i>	<i>$e^+ \mu^+ \tau^+$</i>
	<i>matière</i>	<i>antimatière</i>

Le Modèle Standard

	<i>fermions</i>		<i>bosons</i>	
<i>quarks</i>	u	\bar{u}	γ	Regroupe toutes nos connaissances actuelles sur les particules élémentaires.
	c	\bar{c}	g	
t	\bar{t}	$W^+ W^-$		
d	\bar{d}	Z^0		
<i>leptons</i>	s	\bar{s}		
	b	\bar{b}		
	ν_e	$\bar{\nu}_e$		
	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$		
ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$			
e^-	e^+			
μ^-	μ^+			
τ^-	τ^+			
	<i>matière</i>	<i>antimatière</i>	<i>forces</i>	

Le Modèle Standard “contient”:

- 24 fermions élémentaires

- 3 interactions fondamentales

Electromagnétisme

(1 photon)

Force faible

(2 W et 1 Z)

Force forte

(8 gluons)

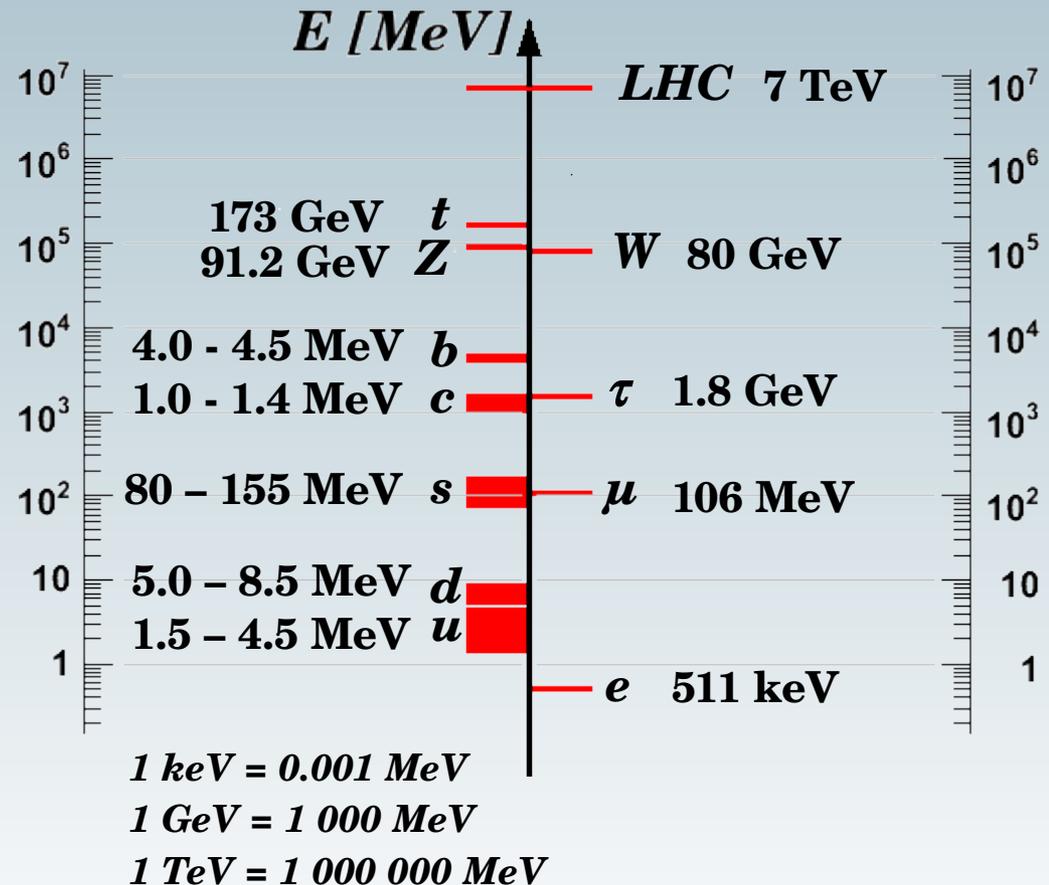
Energies et masses

Chaque particule possède une masse donnée et peut être créée grâce à des collisions entre des faisceaux de particules accélérées.

$$E = mc^2$$

ou plutôt

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$



La traque aux secrets de l'univers

INTERNATIONAL

Physicists run first particles in collider

By Dennis Overbye

BATavia, Illinois Science rode a beam of subatomic particles and a river of Champagne into the future Wednesday.

After 14 years of labor, scientists at CERN's laboratory outside Geneva finally activated the world's largest particle collider and, at 88 billion electron volts, the most expensive scientific experiment in Geneva, scientists sent beams around the collider, which is 17 miles or 27 kilometers deep beneath the earth and them sent them back to their starting point, said Lyn Higgs, project director.

The new era of particle physics began with the Large Hadron Collider, a 27-kilometer-long ring of superconducting magnets that will send beams of protons and lead ions around the world's largest particle collider and, at 88 billion electron volts, the most expensive scientific experiment in Geneva, scientists sent beams around the collider, which is 17 miles or 27 kilometers deep beneath the earth and them sent them back to their starting point, said Lyn Higgs, project director.

The new era of particle physics began with the Large Hadron Collider, a 27-kilometer-long ring of superconducting magnets that will send beams of protons and lead ions around the world's largest particle collider and, at 88 billion electron volts, the most expensive scientific experiment in Geneva, scientists sent beams around the collider, which is 17 miles or 27 kilometers deep beneath the earth and them sent them back to their starting point, said Lyn Higgs, project director.

The new era of particle physics began with the Large Hadron Collider, a 27-kilometer-long ring of superconducting magnets that will send beams of protons and lead ions around the world's largest particle collider and, at 88 billion electron volts, the most expensive scientific experiment in Geneva, scientists sent beams around the collider, which is 17 miles or 27 kilometers deep beneath the earth and them sent them back to their starting point, said Lyn Higgs, project director.

The new era of particle physics began with the Large Hadron Collider, a 27-kilometer-long ring of superconducting magnets that will send beams of protons and lead ions around the world's largest particle collider and, at 88 billion electron volts, the most expensive scientific experiment in Geneva, scientists sent beams around the collider, which is 17 miles or 27 kilometers deep beneath the earth and them sent them back to their starting point, said Lyn Higgs, project director.

The new era of particle physics began with the Large Hadron Collider, a 27-kilometer-long ring of superconducting magnets that will send beams of protons and lead ions around the world's largest particle collider and, at 88 billion electron volts, the most expensive scientific experiment in Geneva, scientists sent beams around the collider, which is 17 miles or 27 kilometers deep beneath the earth and them sent them back to their starting point, said Lyn Higgs, project director.

The new era of particle physics began with the Large Hadron Collider, a 27-kilometer-long ring of superconducting magnets that will send beams of protons and lead ions around the world's largest particle collider and, at 88 billion electron volts, the most expensive scientific experiment in Geneva, scientists sent beams around the collider, which is 17 miles or 27 kilometers deep beneath the earth and them sent them back to their starting point, said Lyn Higgs, project director.



A wooden globe at the entrance to the world's most powerful particle collider, near Geneva, which will be a distant second. Electron volts are the currency of choice in physics for both mass and energy. The more you have, the closer and hotter you can punch back in time toward the Big Bang.

In 1993, the U.S. Congress canceled plans for an even bigger collider and directed Supercollider, after its cost ballooned to \$1 billion.

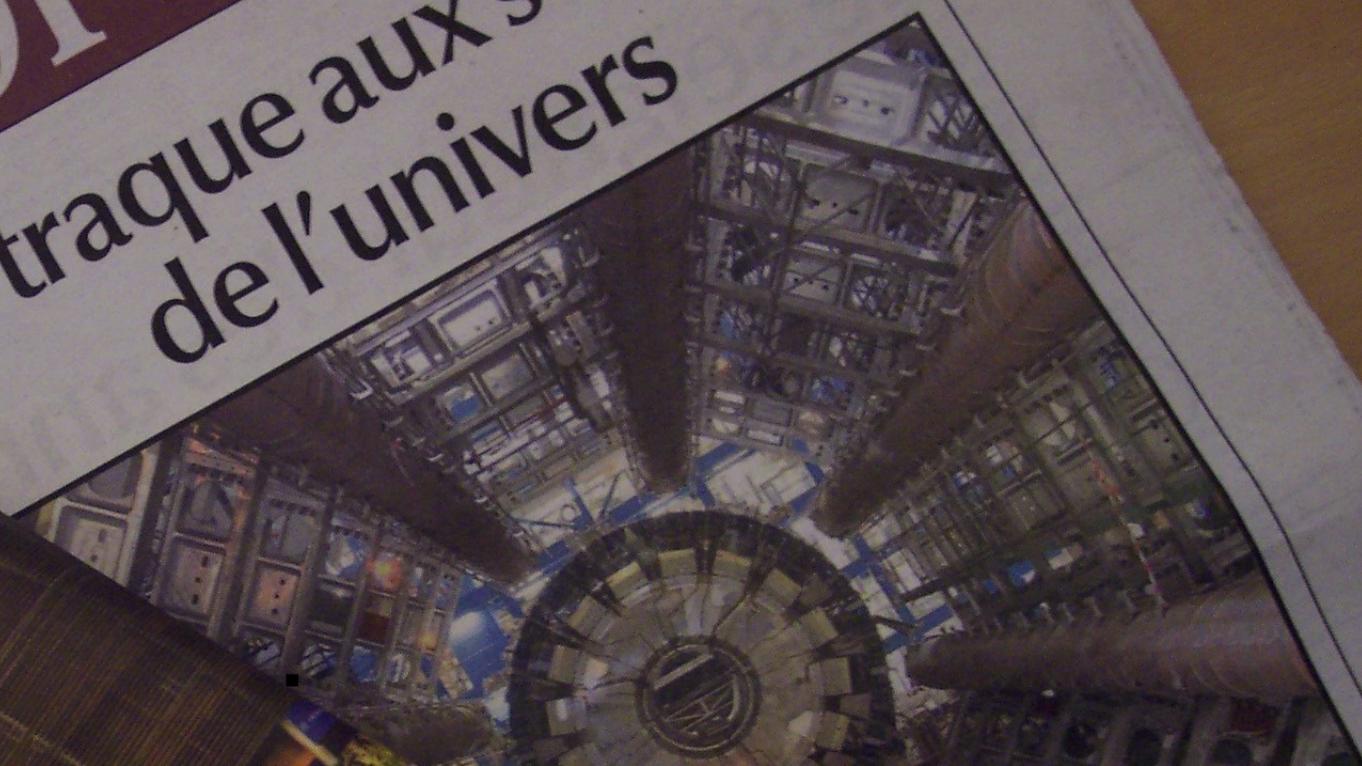
Oddone, Fermilab's director, said the finding made the situation at Fermilab and physics in general in the United States "suspenseful."

CERN on the other hand, is an organization of 20 countries, whose budget is determined by treaty and thus stable. The year after the supercollider was killed, CERN decided to go ahead with its own collider.

Fermilab and the United States, which eventually contributed \$51 million for the collider, have not exactly cans constitute about a quarter of the scientists who have built the four giant detectors that sit at points around the racetrack to collect and analyze the debris from the primordial fireballs.

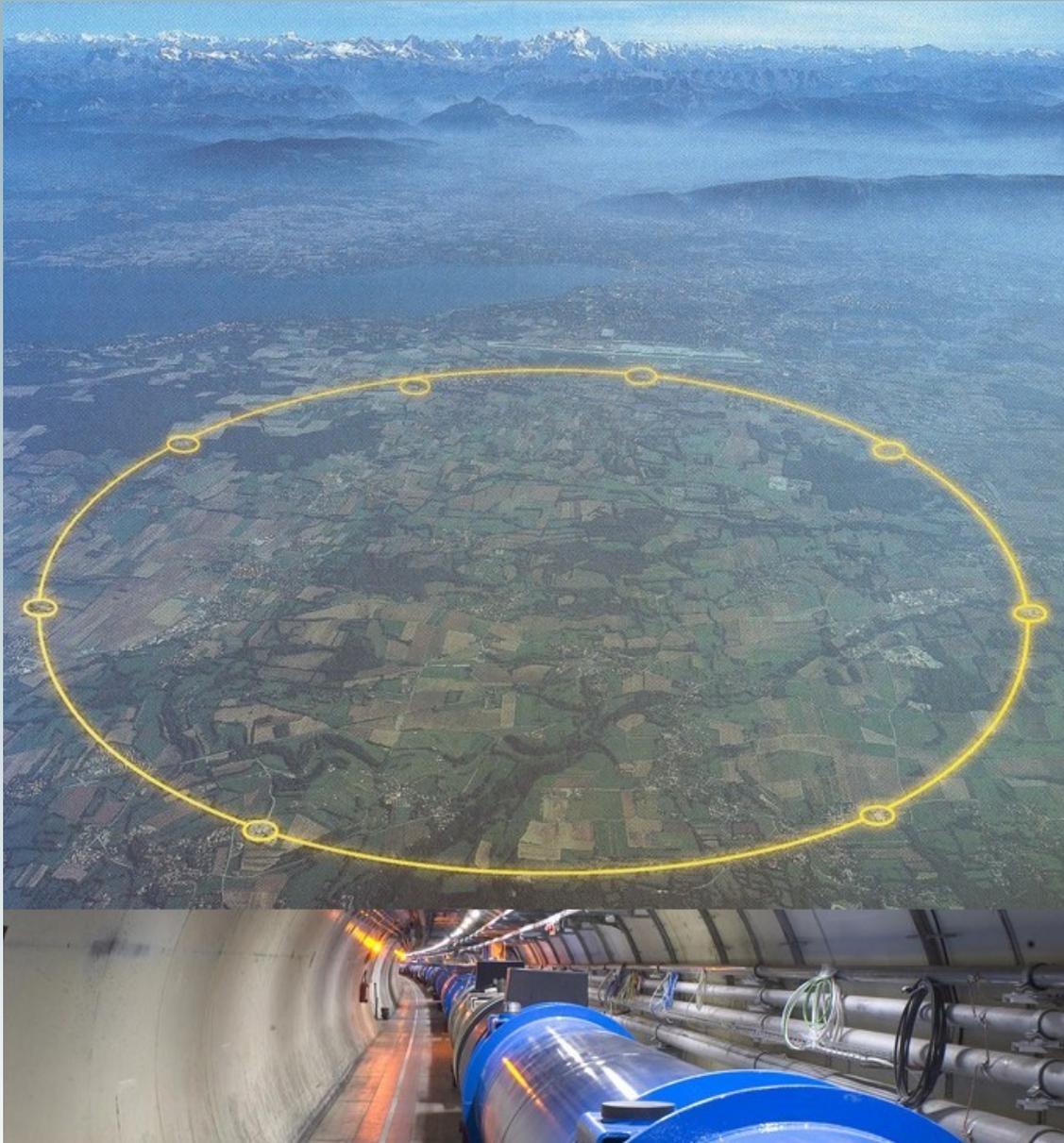
In fact, a remote-control room for monitoring one of those experiments, built as the main building here, is more than 100 miles away from the collider. It was built at Fermilab, just off the road that the Tevatron was humbly named as the Compact Muon Collider, and so-called "pilot" experiments would initially produce more rapid pace than the Tevatron. "We're so excited about this chance that Tevatron around the world and the Large Hadron Collider."

At Fermilab, the European Commission said, "We have brought this chance that Tevatron around the world and the Large Hadron Collider."



des milliers de scientifiques Belges, vont chercher en remontant au

LHC : Large Hadron Collider



But : étudier la structure de la matière par des collisions entre particules à très hautes énergies

CERN – Genève (Suisse)

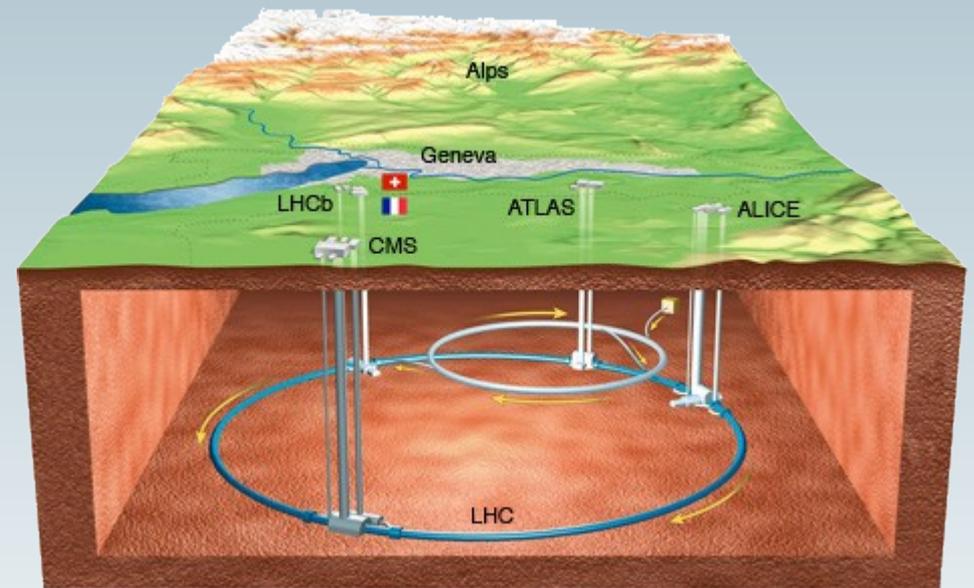
Large Hadron Collider

- 100 mètres sous terre
- 27 km de circonférence
- 2 faisceaux de protons
- 7 TeV par faisceau

ATLAS

ALICE

CMS



4 points d'interaction

4 expériences

Large Hadron Collider

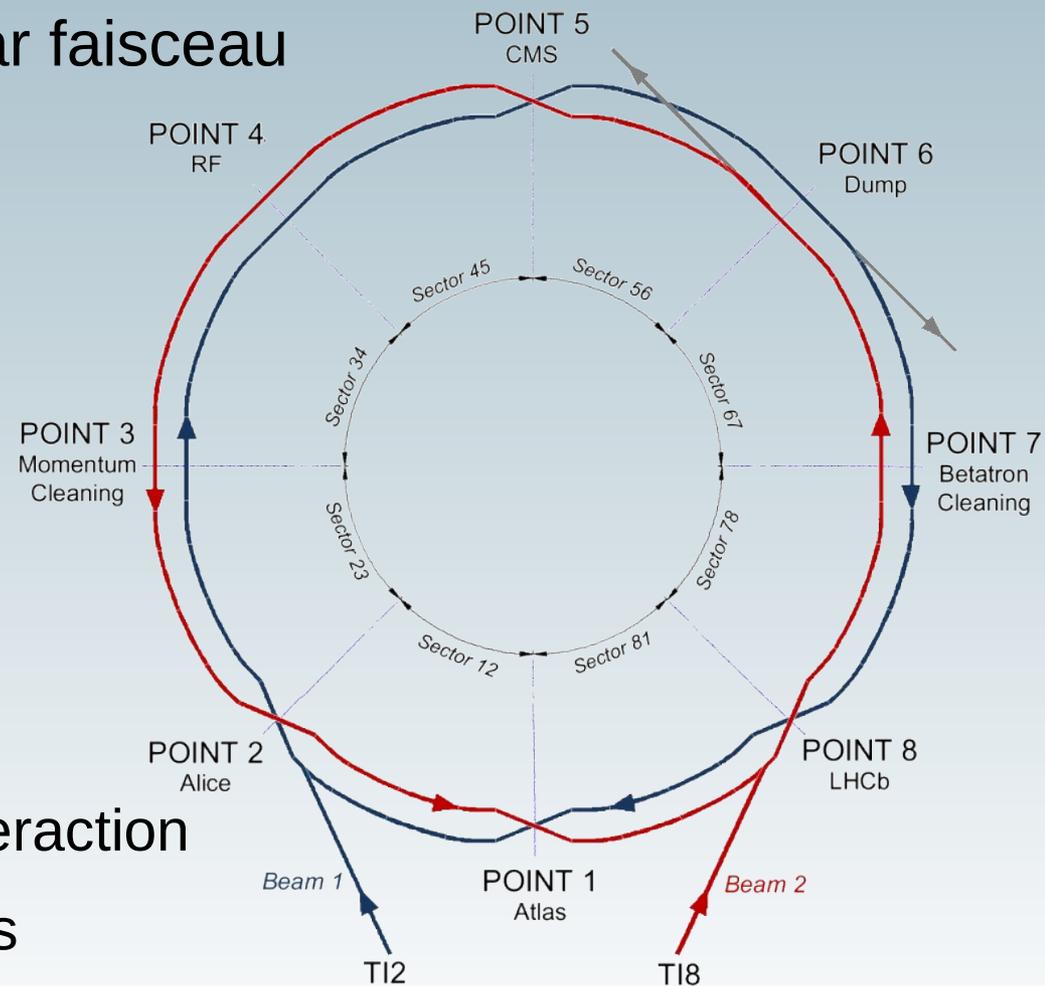
- 100 mètres sous terre
- 27 km de circonférence
- 2 faisceaux de protons
- 7 TeV par faisceau

ATLAS

ALICE

CMS

LHCb

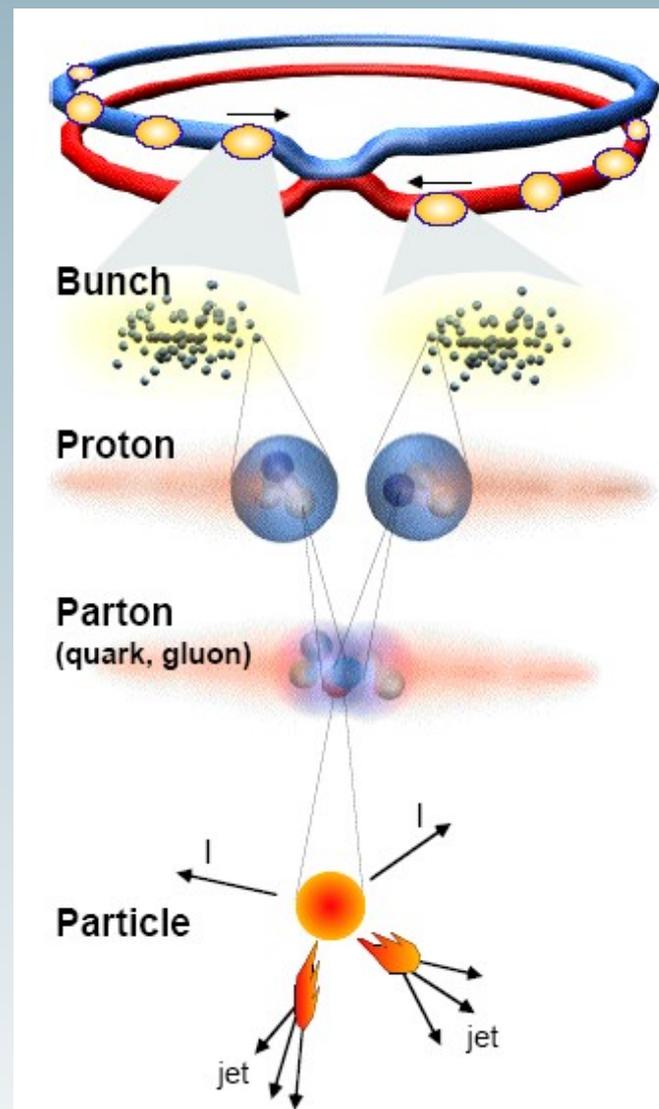
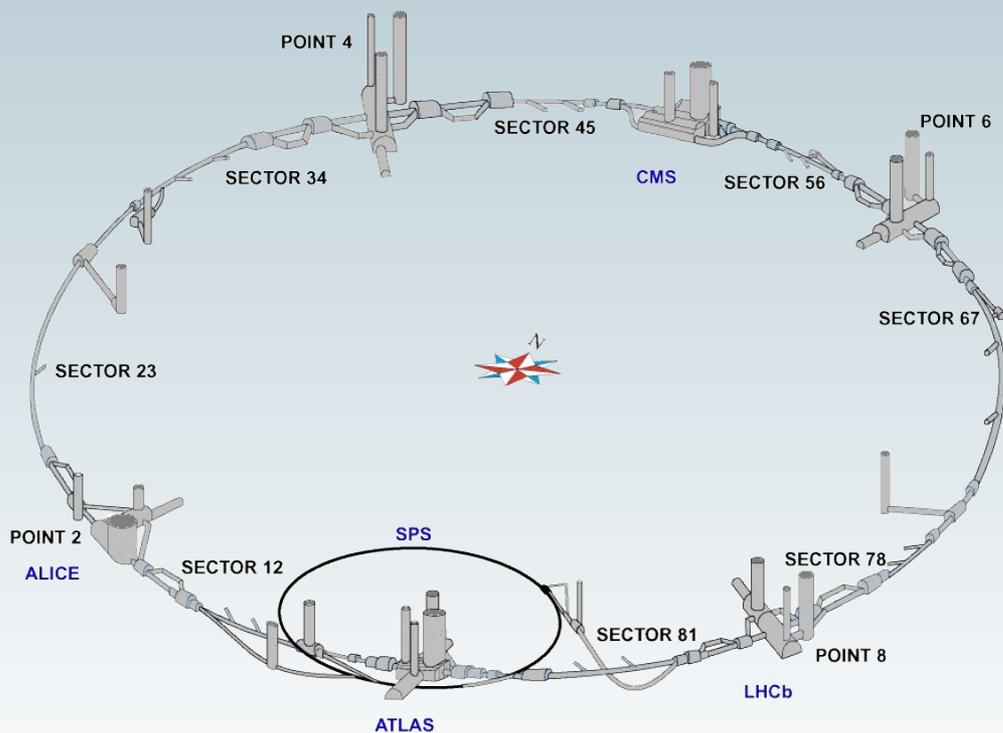


4 points d'interaction

4 expériences

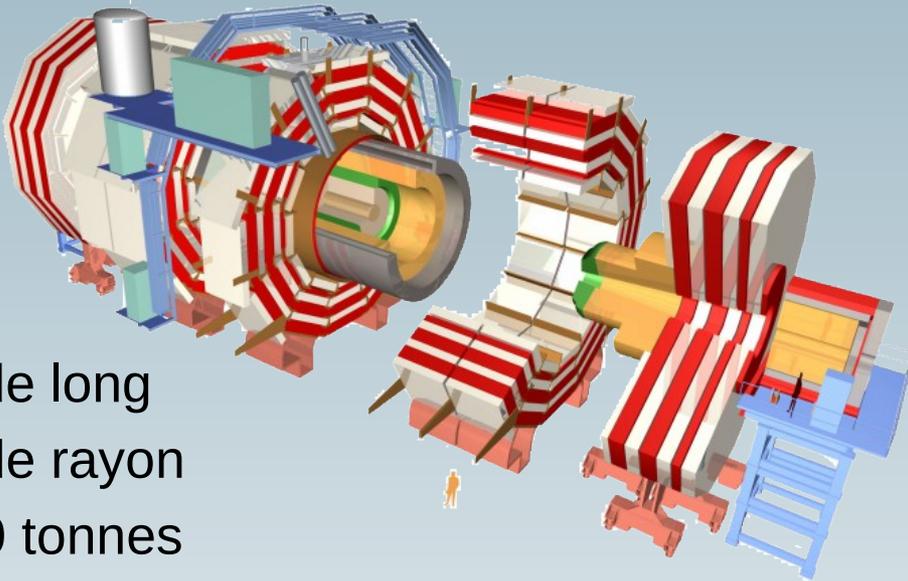
Large Hadron Collider

- 2835 x 2835 paquets (bunches)
- 10^{11} protons par bunch
- 40 000 000 croisements de faisceau par seconde



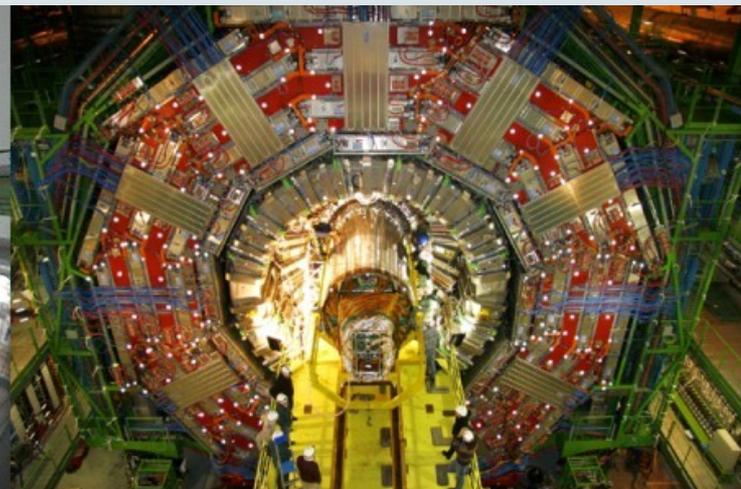
L'expérience CMS

Détecteur central (vue explosée)



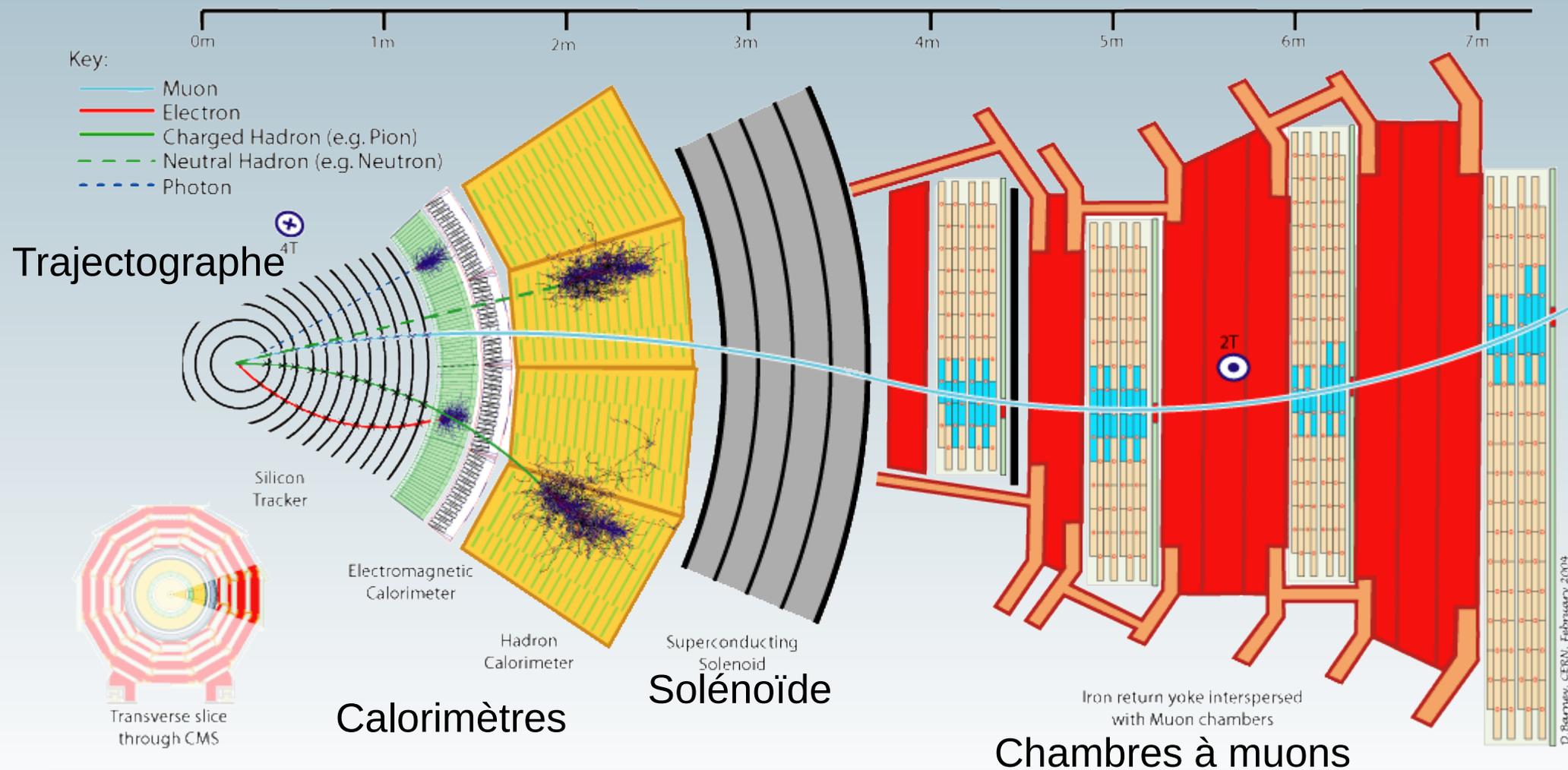
21 m de long
15 m de rayon
12 500 tonnes

Expérience “généraliste” pour
étudier la physique du Modèle
Standard et au-delà (Higgs,
SUSY, ...).



L'expérience CMS

Le détecteur comporte une succession de couches différentes, pour l'identification et la mesure des particules.



CMS : détecteurs distants

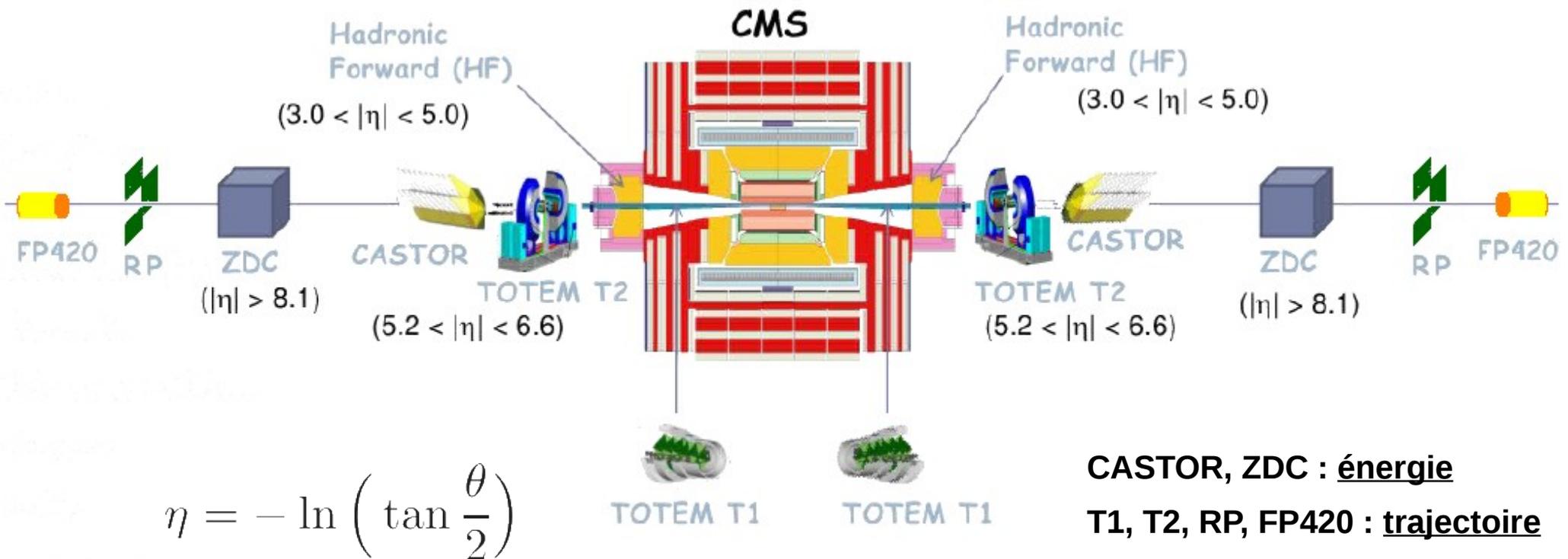
Certaines particules, émises à de très petits angles, peuvent s'échapper de CMS par le tube du faisceau.



Nécessité d'augmenter la couverture de détection en se plaçant le plus proche possible de la ligne de faisceau.

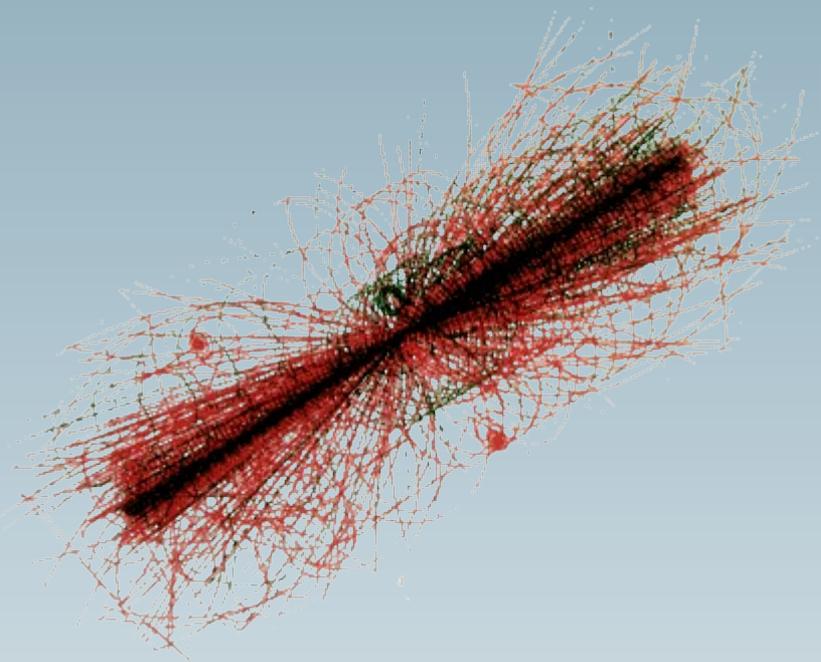
CMS : détecteurs distants

CMS comporte donc également des détecteurs éloignés du point d'interaction, pour mesurer ces particules émises à très petits angles.



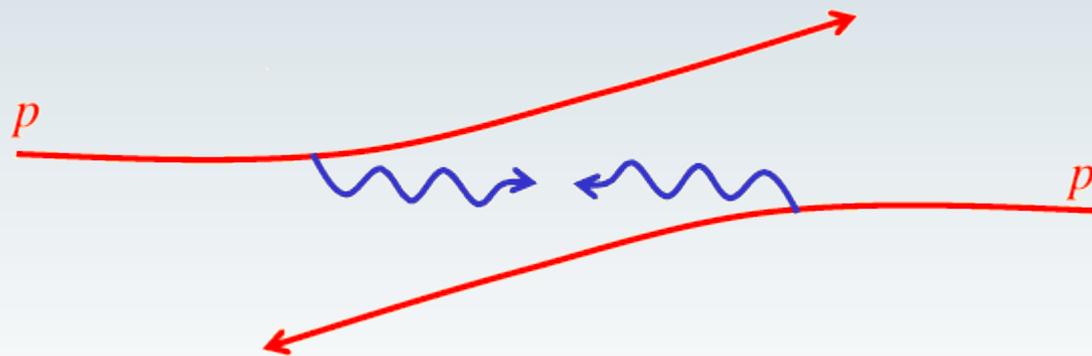
Les processus induits
par l'échange
de photons

Les collisions au LHC



Les protons n'étant pas des particules élémentaires ($p = uud$), les collisions au LHC mènent, en général, à un **grand nombre de particules** produites dans l'état final.

Si les protons interagissent par l'échange d'un ou plusieurs **photons**, ils ont une certaine probabilité de rester intacts et de survivre à l'interaction.



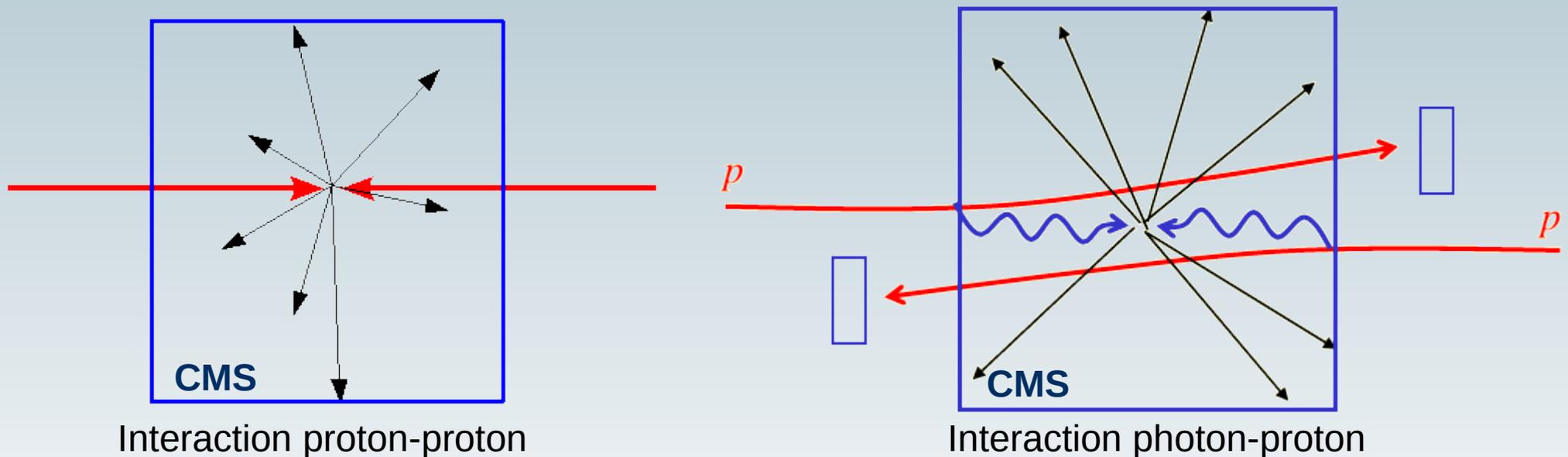
Echange d'un ou plusieurs photons

Conséquences expérimentales :

- L'état final observé contient beaucoup moins de particules.

Etat final plus propre!

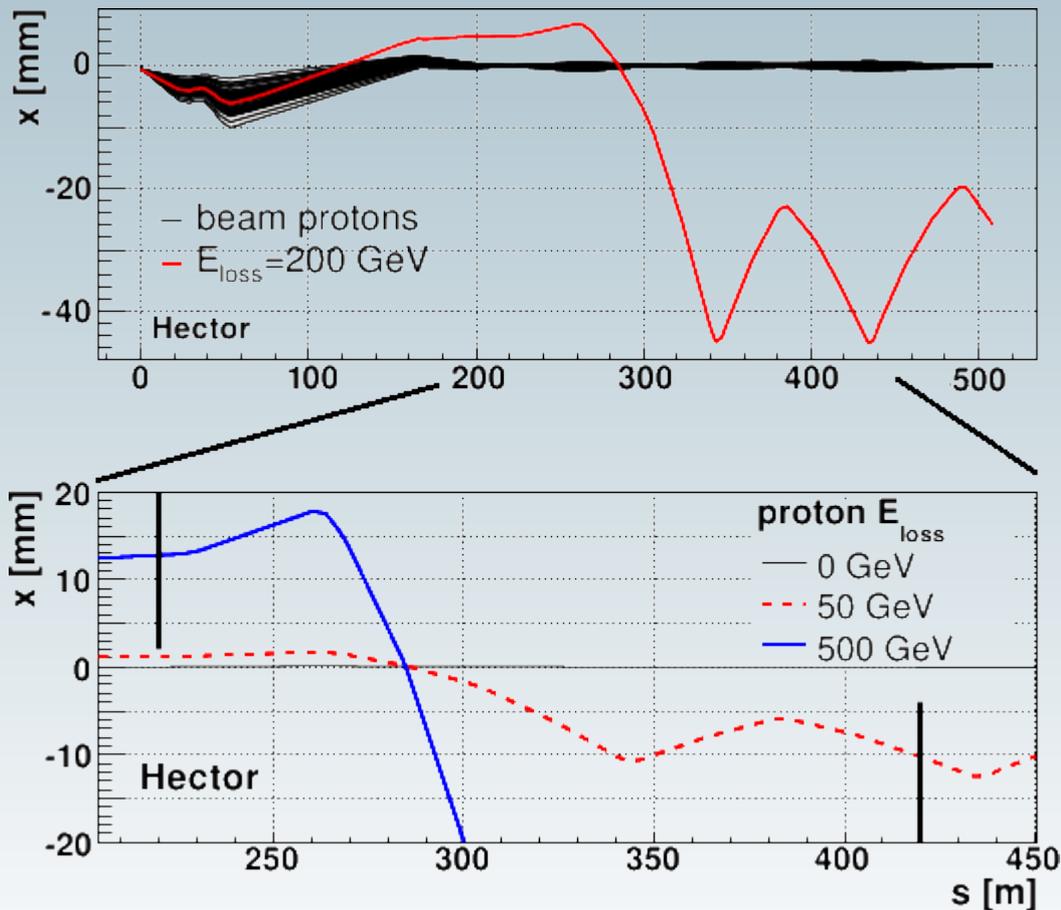
- Au moins un proton est diffusé à très petit angle vers l'avant.



➡ Le proton émis à petit angle permet de séparer les interactions proton-proton des interactions photon-proton

Détections des protons émis à très petits angles

Un proton émis à très petit angle peut s'échapper de CMS par le tube du faisceau, sans être détecté.



S'il a perdu de l'énergie, sa **trajectoire** sera **différente** de celle des protons du faisceau.

➡ Il est possible de l'observer en utilisant les détecteurs situés le long de la ligne de faisceau

Détections des protons émis à très petits angles

Pour mesurer ces protons il faut donc :

- des détecteurs spécialisés très proches du faisceau

Détecteurs sans bords et au silicium

Détections des protons émis à très petits angles

Pour mesurer ces protons il faut donc :

- des détecteurs spécialisés très proches du faisceau

Détecteurs sans bords et au silicium

- un simulateur permettant de calculer précisément la trajectoire de ces protons

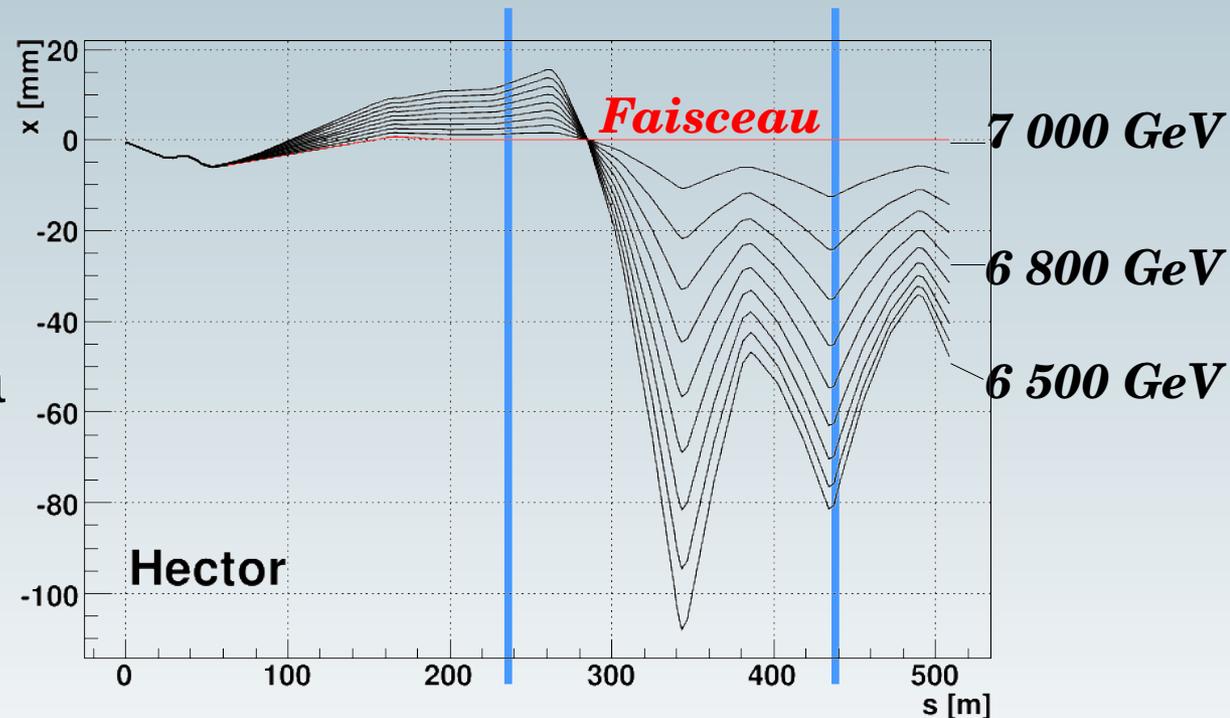
Hector, un simulateur rapide pour le transport de particules dans des lignes de faisceau

Détecteurs de protons diffusés

Détecteurs de protons diffusés

Les protons *diffusés vers l'avant* ont une **énergie** proche de celle du faisceau, mais légèrement inférieure. Leur trajectoire suit, plus ou moins, celle du faisceau.

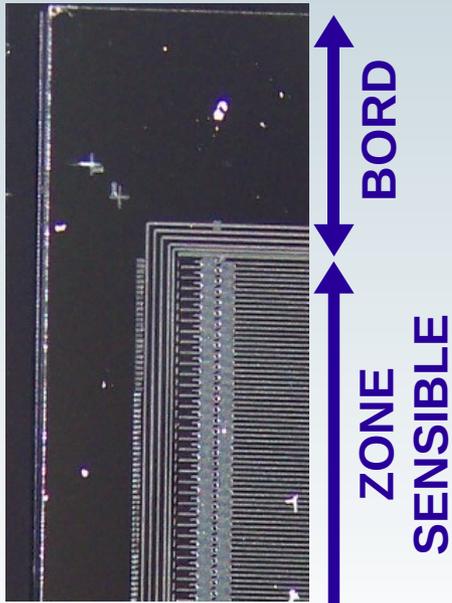
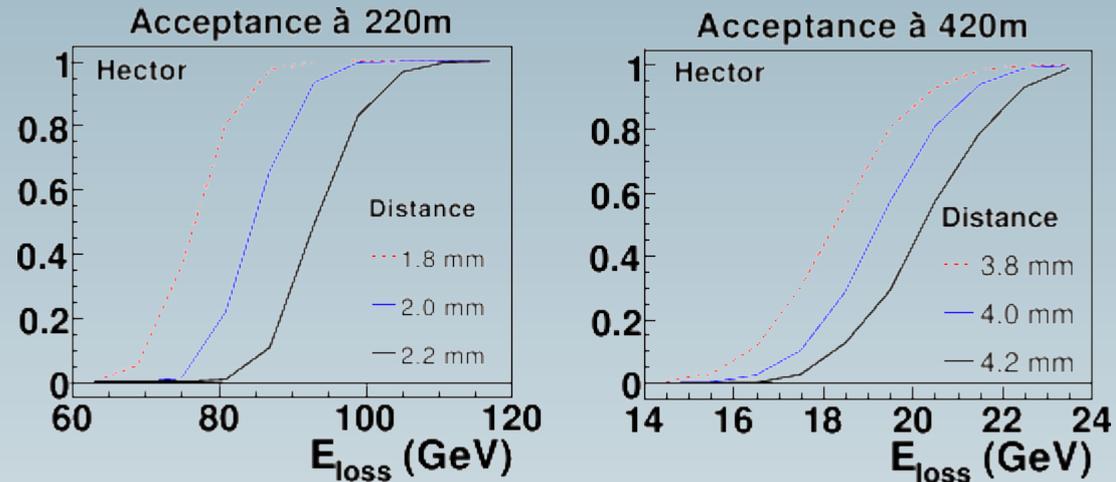
Il est donc possible de détecter ces protons à l'aide de senseurs placés à **quelques millimètres** du faisceau.



perte d'énergie ↔ éloignement

Détecteurs de protons diffusés

Plus le détecteur est proche du faisceau, plus grande est la gamme des énergies qu'il couvre.



Nécessité de minimiser la distance entre le bord physique et la zone sensible du détecteur. Cette distance doit être de quelques dizaines de microns.

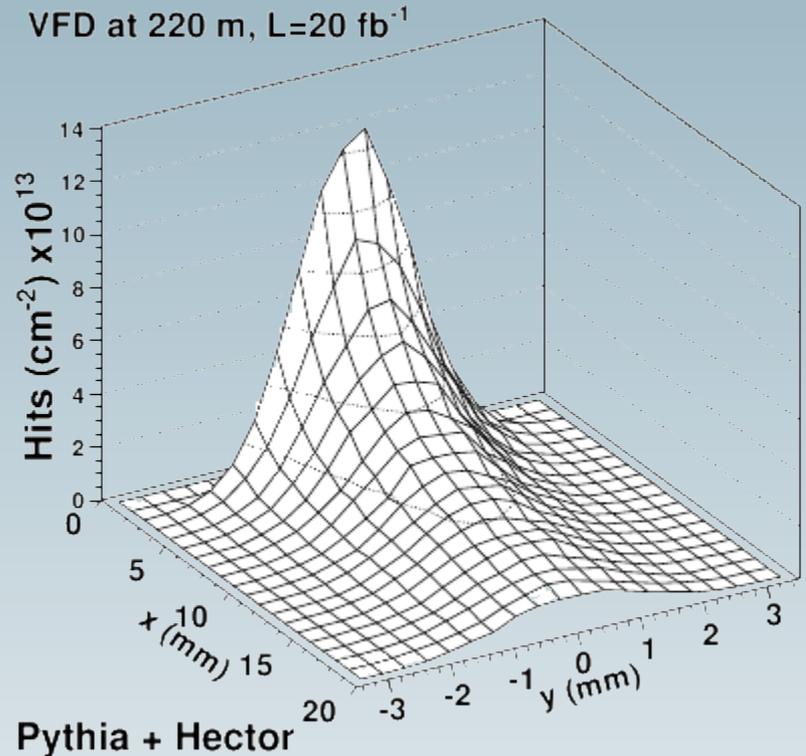
On parle alors de *détecteur sans bord*.

Détecteurs “sans bord”

Contrainte supplémentaire :

les détecteurs doivent également être très résistants aux radiations

$O(10^{14} - 10^{15})$ protons/an/cm²



Solution : détecteurs sans bord au silicium

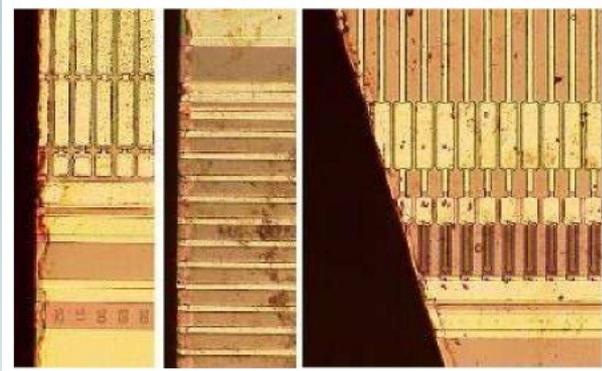
→ Développement de détecteurs *coupés*.

Détecteurs “sans bord”

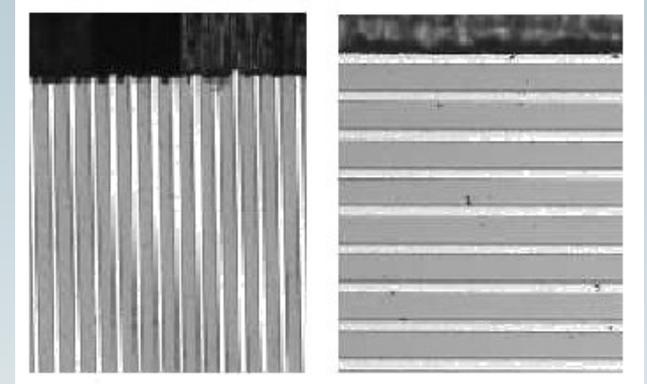
Avec l'aide de O. Militaru et G. Pierre

Une possibilité simple : couper un détecteur “avec bord” au travers de sa zone sensible afin de créer 2 détecteurs “sans bord”.

Découpe au laser



Découpe au plasma



Désavantage : les dégâts dus à la découpe du détecteur augmentent considérablement le bruit. Une basse température pourrait aider.

Technologie prometteuse mais pas encore mature pour le LHC

Rappel :

Pour mesurer ces protons il faut donc :

- des détecteurs spécialisés très proches du faisceau

Détecteurs sans bords et au silicium

- un simulateur permettant de calculer précisément la trajectoire de ces protons

Hector, un simulateur rapide pour le transport de particules dans des lignes de faisceau

Simulation de la trajectoire des
protons diffusés :

Hector, the simulator



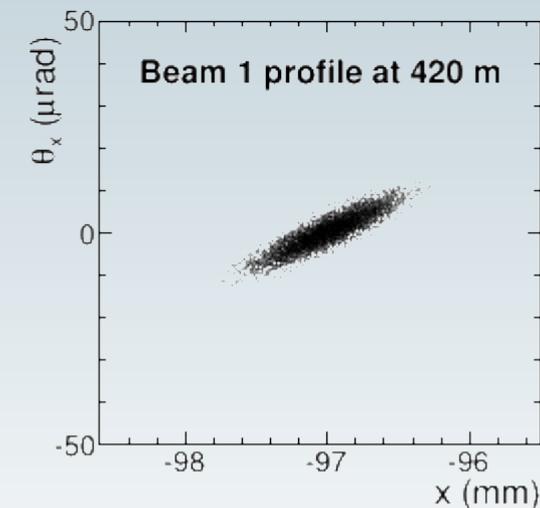
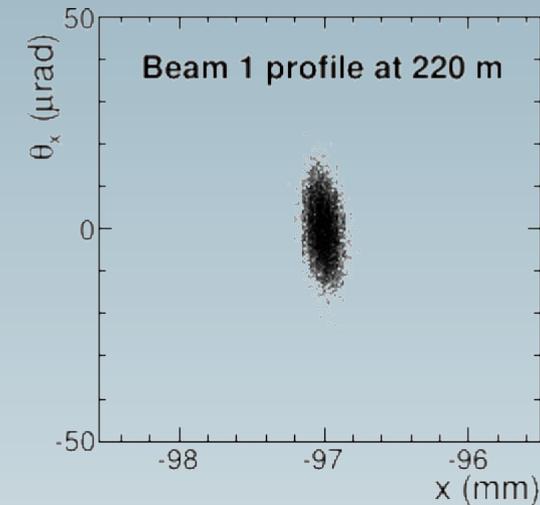
Hector, the simulator

Travail commun avec J. de Favereau

Simulation précise et rapide du transport de particules dans la ligne de faisceau du LHC permettant :

1° De caractériser les détecteurs distants

2° De lier les positions des particules mesurées par ces détecteurs aux données prises par CMS



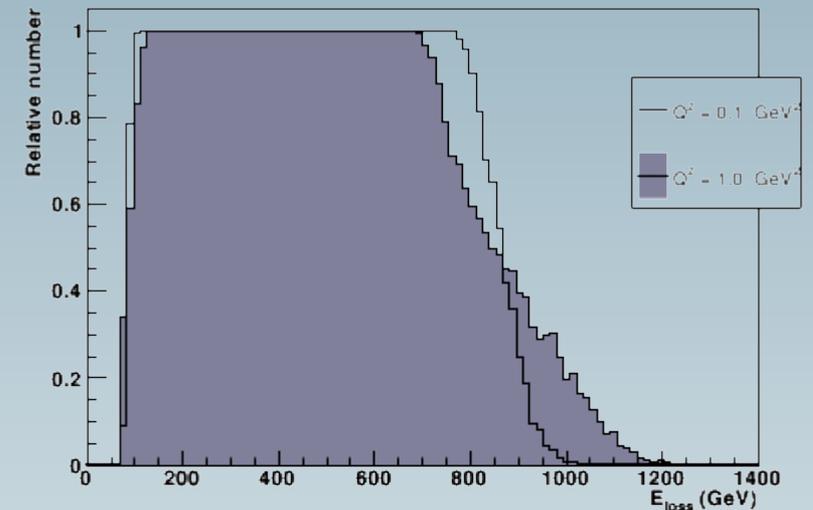
Hector, the simulator

1° Caractérisation des détecteurs

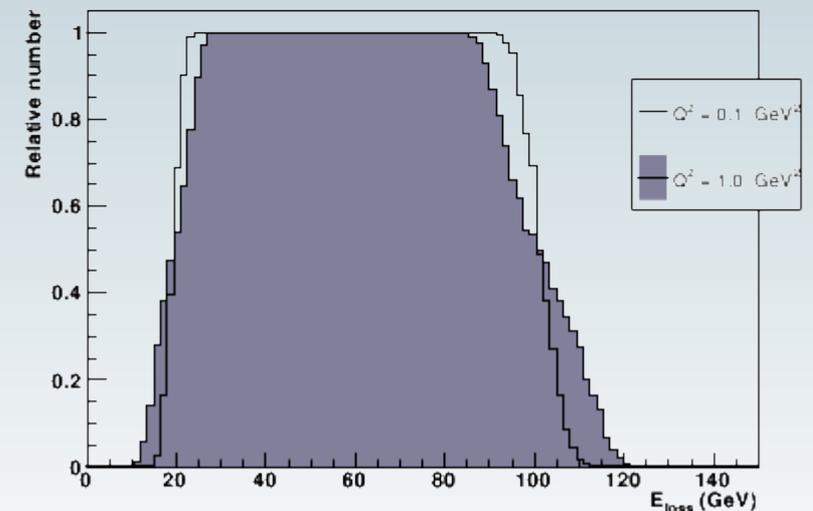
distants :

- Acceptance
- Niveau de radiation
- Positionnement optimal
- Impact de l'épaisseur du bord

Acceptance at 220m (2000 μm) for beam 1



Acceptance at 420m (4000 μm) for beam 1

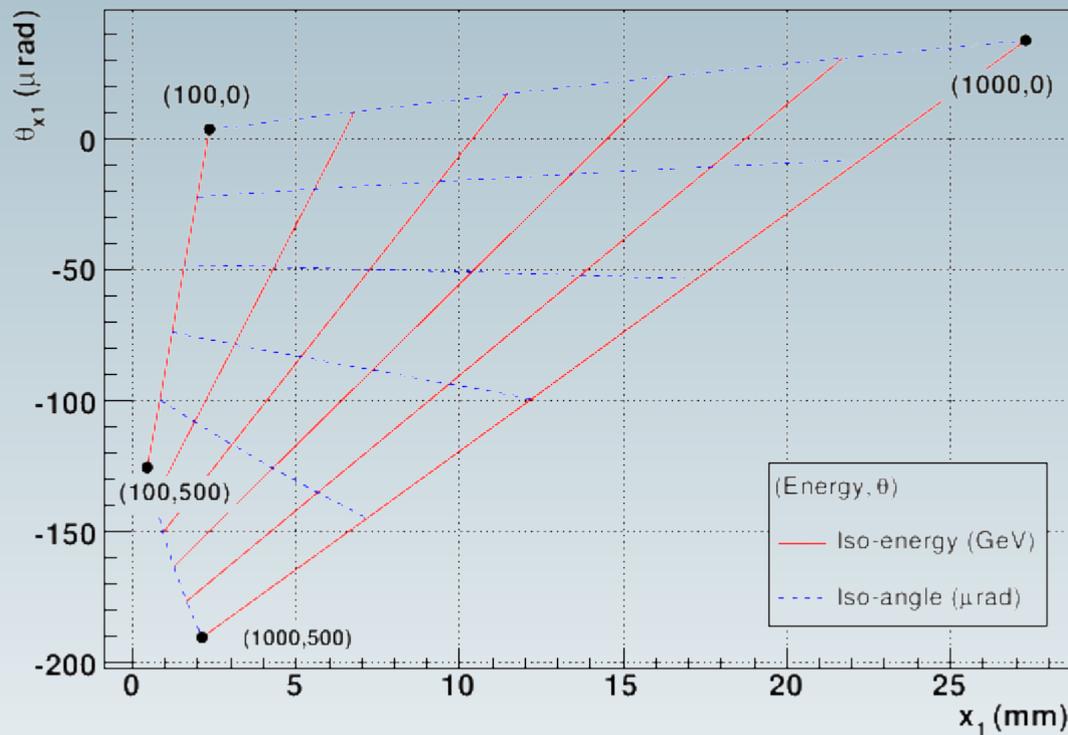


*Si un proton a perdu une
quantité d'énergie donnée,
sera-t-il mesuré ?*

Hector, the simulator

2° Lien entre les mesures des détecteurs distants et de CMS

Chromaticity grid at 220 m



A partir des positions et angles mesurés, l'énergie du proton et son angle de diffusion peuvent être déduits.

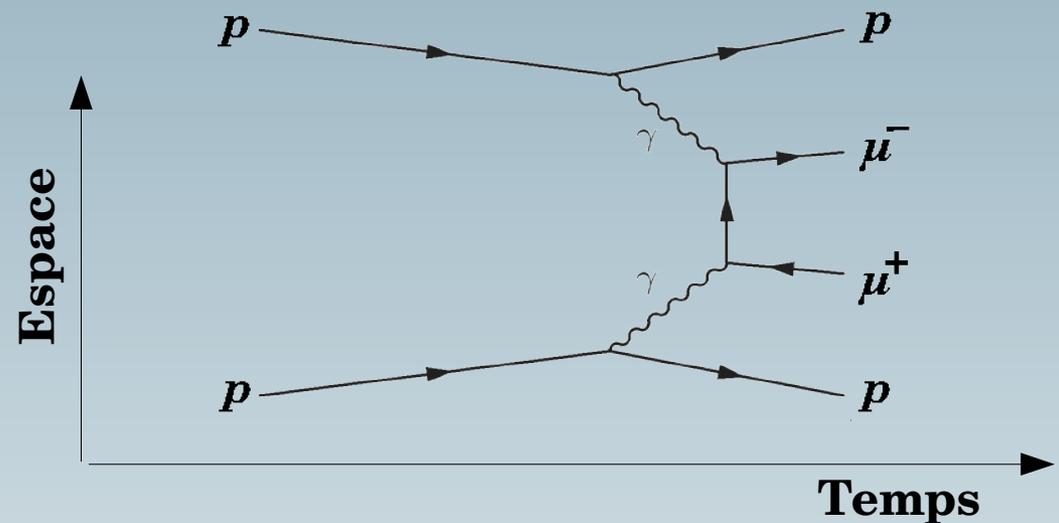
Reconstruction des propriétés cinématiques du proton mesuré.

Production exclusive d'une paire de muons

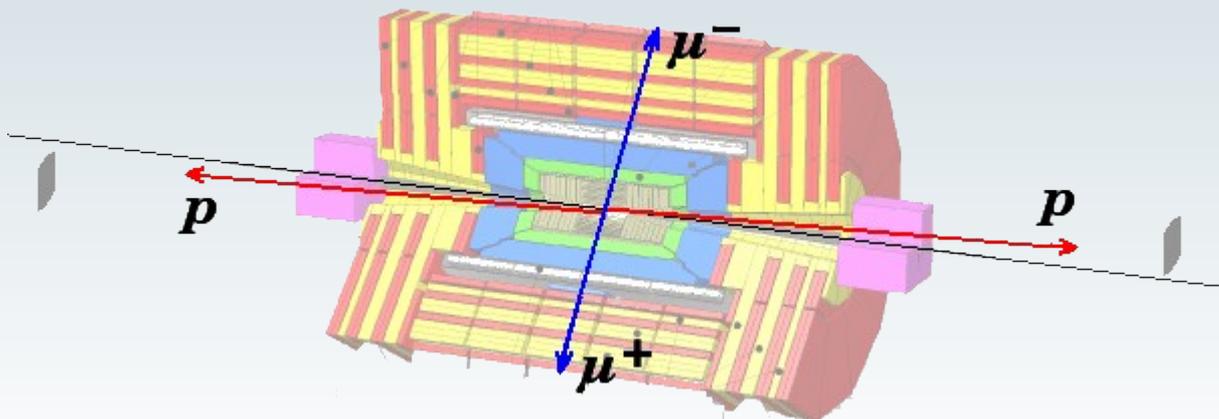
Production exclusive de paires de muons

Avec l'aide de S. Oryn et J. J. Hollar

Deux protons interagissent en émettant chacun un photon. La collision photon-photon produit une paire $\mu^+\mu^-$.



Dû à l'émission des photons, les protons sont diffusés élastiquement à très petits angles.



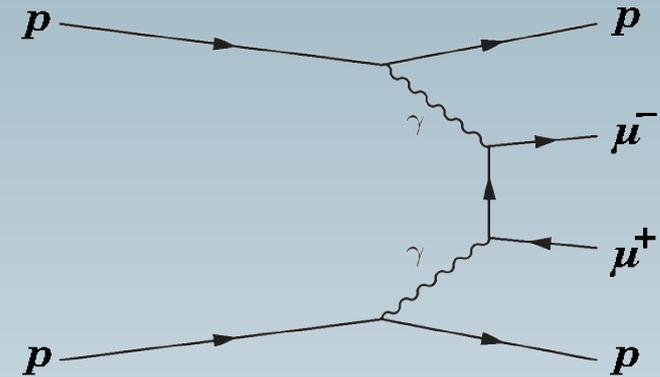
- Muons mesurés dans CMS.
- Protons visibles dans les détecteurs distants.

Production exclusive de paires de muons

Motivations:

- Processus très bien compris théoriquement.
- Sélection facile; peu de processus possèdent la même signature
- Très bonne détection et mesure des muons par CMS
- L'observation de ces événements permet de mesurer la **luminosité intégrée (L)** fournie par le LHC dans CMS. Ce paramètre expérimental est crucial pour la comparaison entre la théorie (σ) et l'expérience (N):

$$N = L \sigma$$



Production exclusive de paires de muons

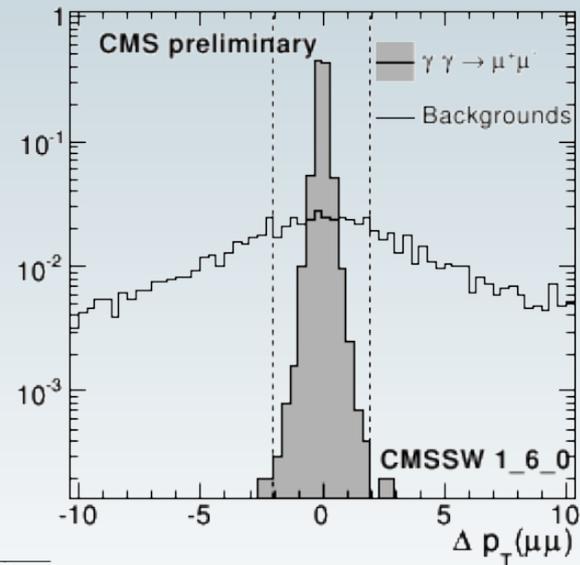
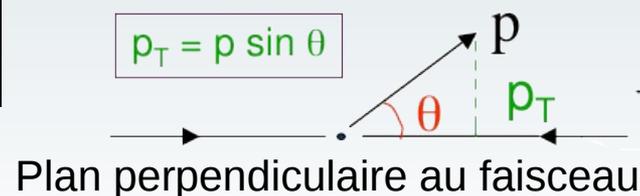
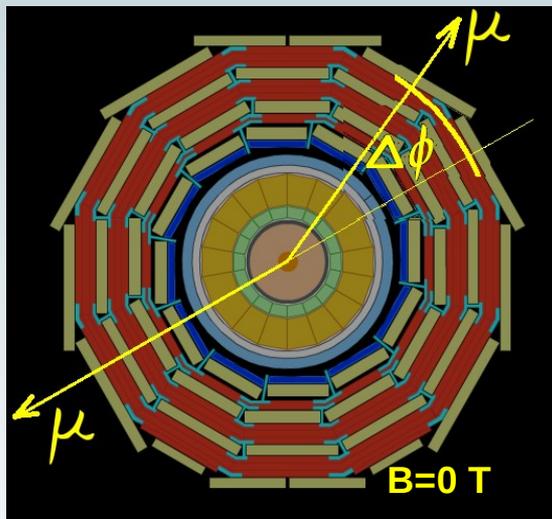
- Sélection de ces événements par CMS grâce aux caractéristiques suivantes :

1° Présence

d'**uniquement** deux muons dans CMS

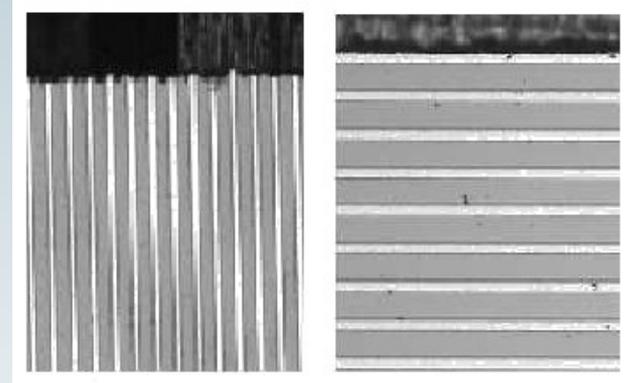
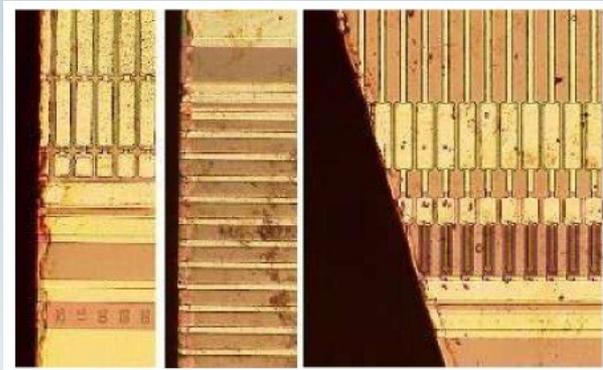
2° Equilibre très prononcé entre la

direction et l'**impulsion** de chacun des muons dans le plan transverse



Conclusions

- Développements techniques :
 - **Détecteurs en silicium sans bord**. Prototypes prometteurs mais technologie non mature pour le LHC.



Conclusions

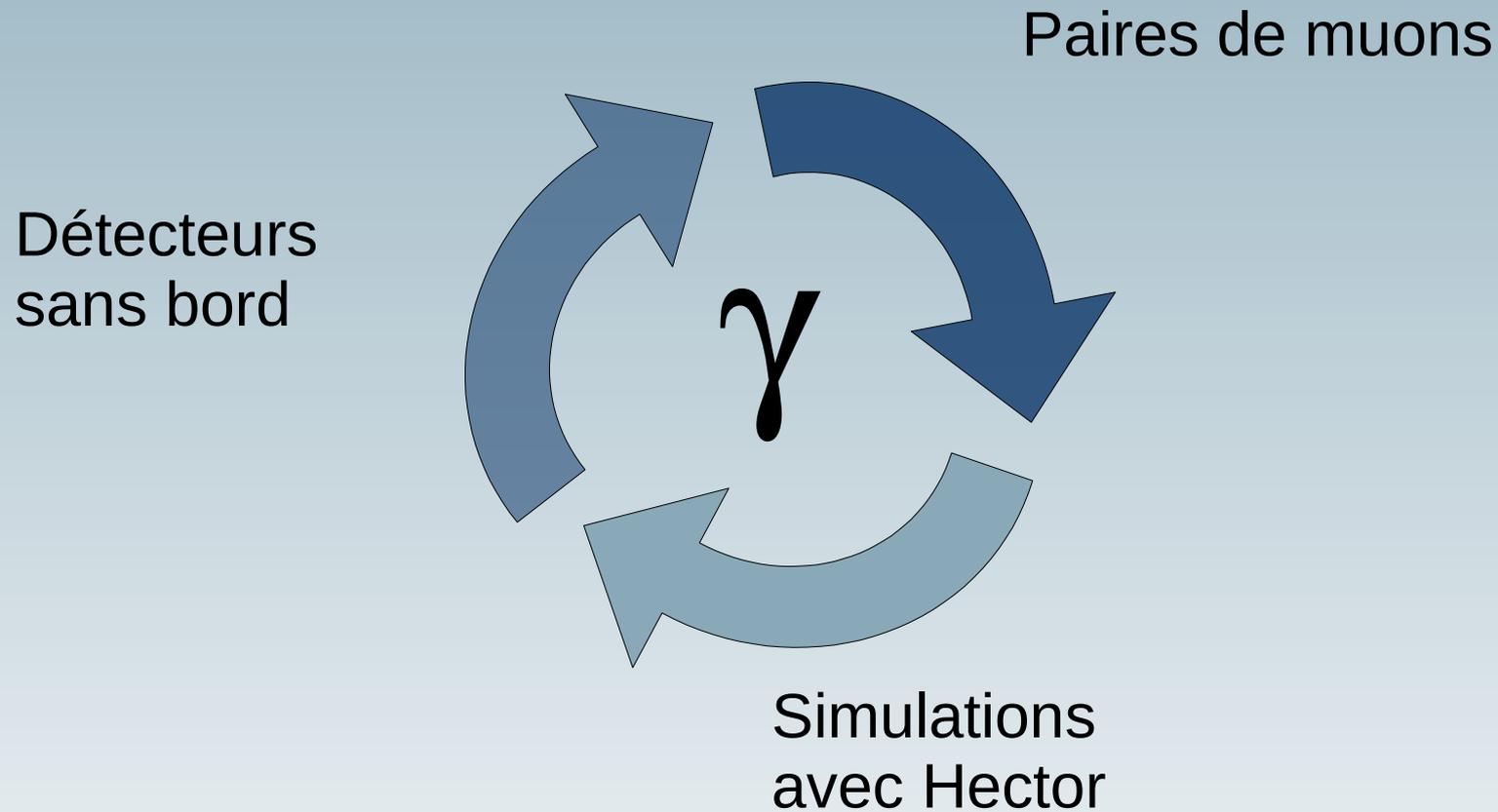
- Développements techniques :
 - **Détecteurs en silicium sans bord**. Prototypes prometteurs mais technologie non mature pour le LHC.
- Développements logiciels :
 - **Simulations du transport de particules** dans des lignes de faisceau (Hector). Utilisé par CMS/TOTEM/FP420.



Conclusions

- Développements techniques :
 - **Détecteurs en silicium sans bord**. Prototypes prometteurs mais technologie non mature pour le LHC.
- Développements logiciels :
 - **Simulations du transport de particules** dans des lignes de faisceau (Hector). Utilisé par CMS/TOTEM/FP420.
- Analyses de données par simulation :
 - **Etude de la production exclusive de paires de muons**. Événements très importants pour la mesure de luminosité intégrée au LHC et la calibration des détecteurs distants.

En quelques mots...

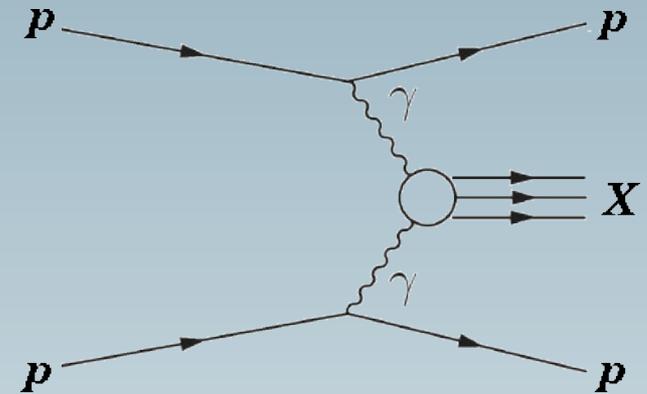


Merci pour votre attention

Informations complémentaires

Flux équivalent de photons

Dans le cadre des interactions par échange de photons, le faisceau de protons peut être vu comme un flux incident de photons.



L'approximation *EPA* permet de factoriser mathématiquement

$$\text{Collision (pp)} = \text{collision } (\gamma \gamma) \times \text{flux}_1(\gamma) \times \text{flux}_2(\gamma)$$

$$d\sigma_{pp} = \sigma_{\gamma\gamma}(x_1, x_2, s) dN(x_1, Q_1^2) dN(x_2, Q_2^2)$$

l'émission de photons par les protons
du processus de collision

Mesure de la luminosité

A l'aide de l'analyse effectuée précédemment, on obtient l'efficacité totale de sélection attendue

$$L = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{bkg}}}{\epsilon \sigma}$$

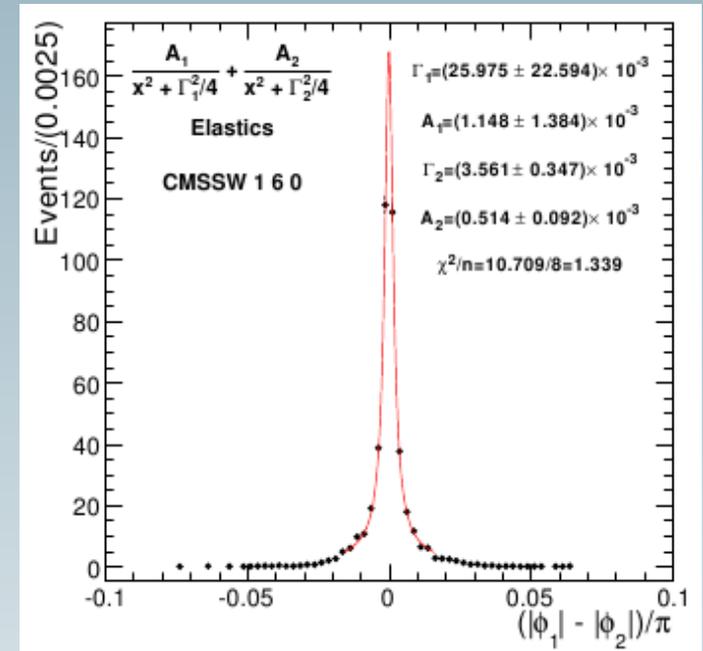
La section efficace σ est très bien connue théoriquement, avec une précision meilleure que 1%.

Scenario (i): $L_{\text{true}} = 100 \text{ pb}^{-1}$

$$L_{\text{meas}} = 96.8 \pm 6.1(\text{stat}) \pm 1.0(\text{th}) \pm 2.9(\text{syst}) \text{ pb}^{-1}.$$

Scenario (ii): $L_{\text{true}} = 100 \text{ pb}^{-1}$ with forward calorimeter veto

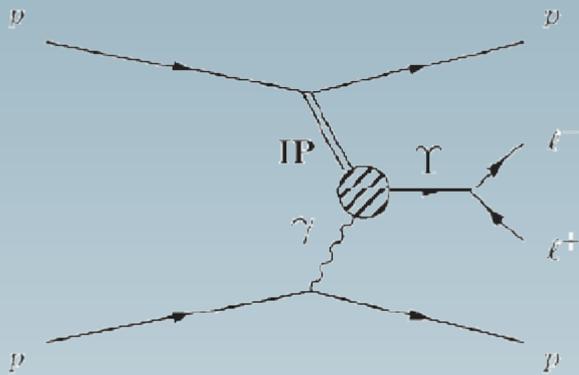
$$L_{\text{meas}} = 99.4 \pm 5.3(\text{stat}) \pm 1.0(\text{th}) \pm 2.9(\text{syst}) \text{ pb}^{-1}.$$



Détermination de N_{bkg}

Incertitude < 7%

Production des mésons Upsilon



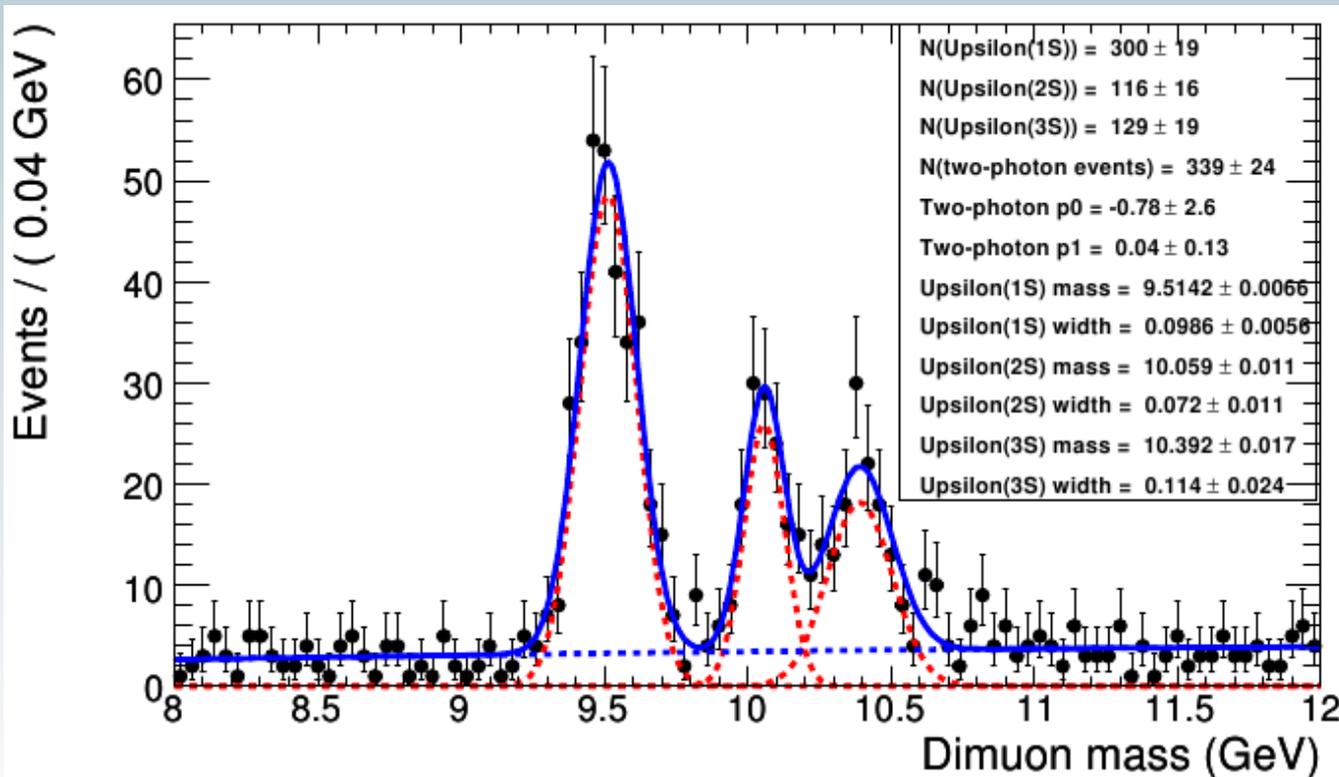
$Y = (bb)$

Section efficace mal connue

Masse très bien connue

L'Upsilon est un outil de calibration très utile

Il sera très rapidement observé dans CMS



E [MeV]

