



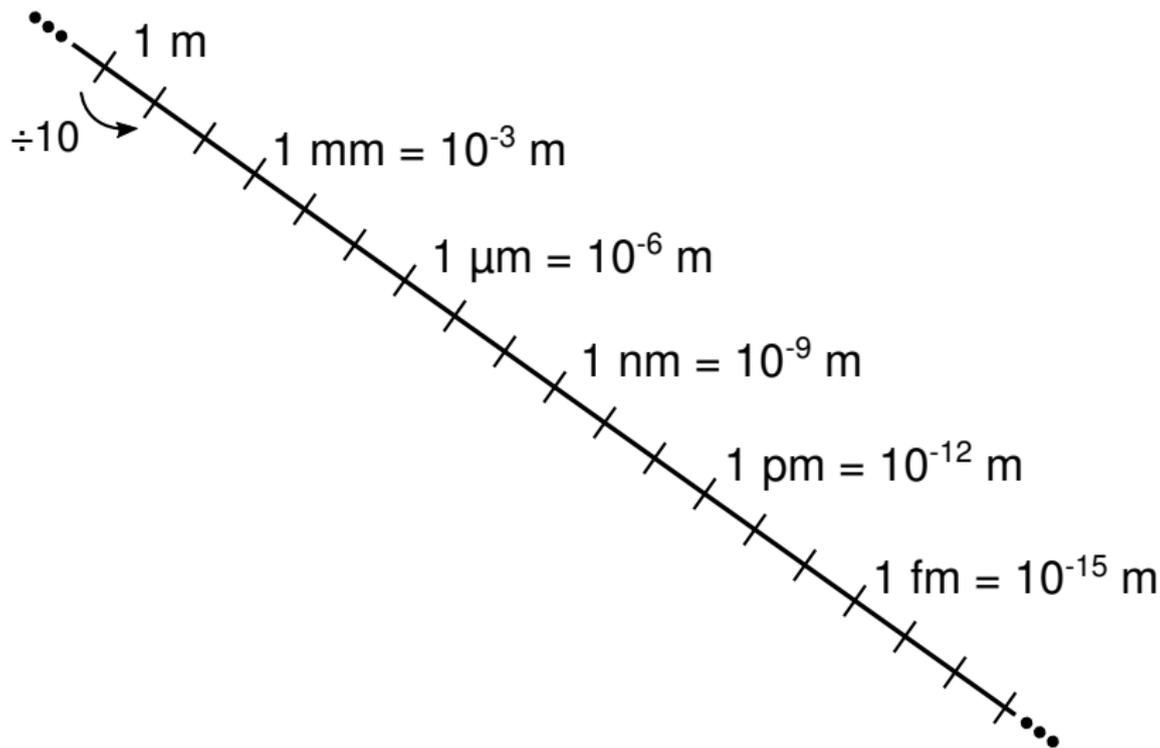
Mesure de processus exclusifs à deux photons au
moyen d'états finaux dileptoniques pour des
collisions pp au LHC

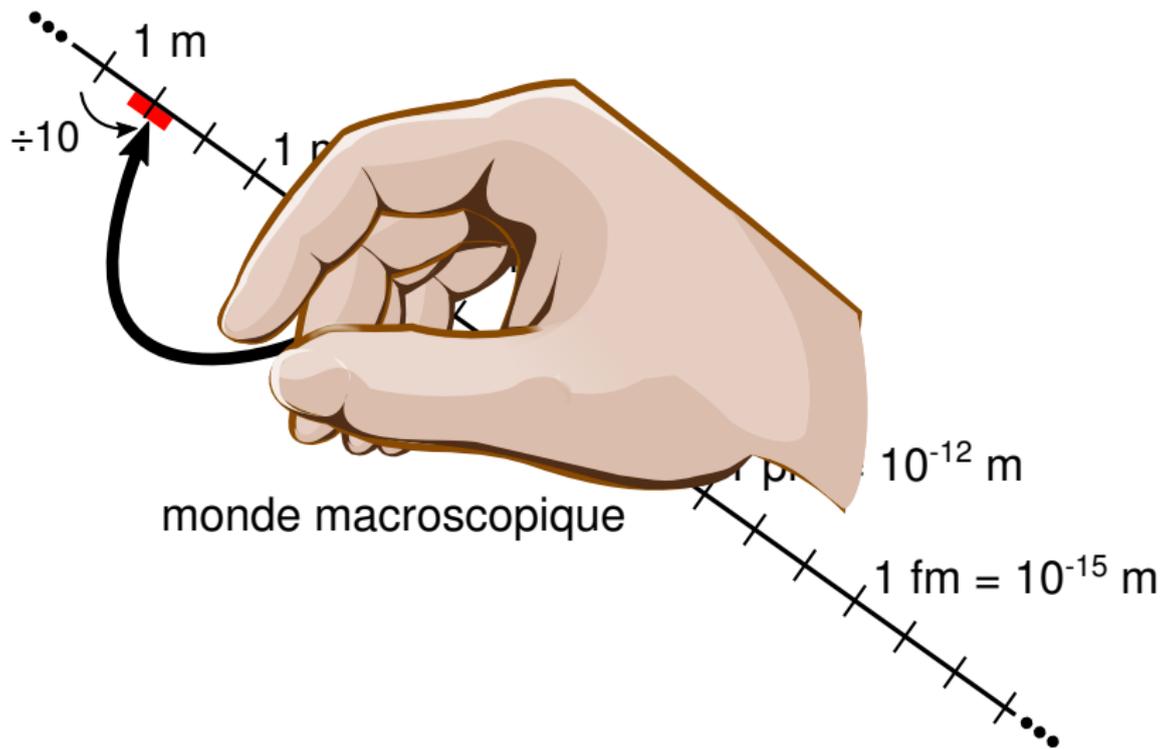
Défense publique de thèse

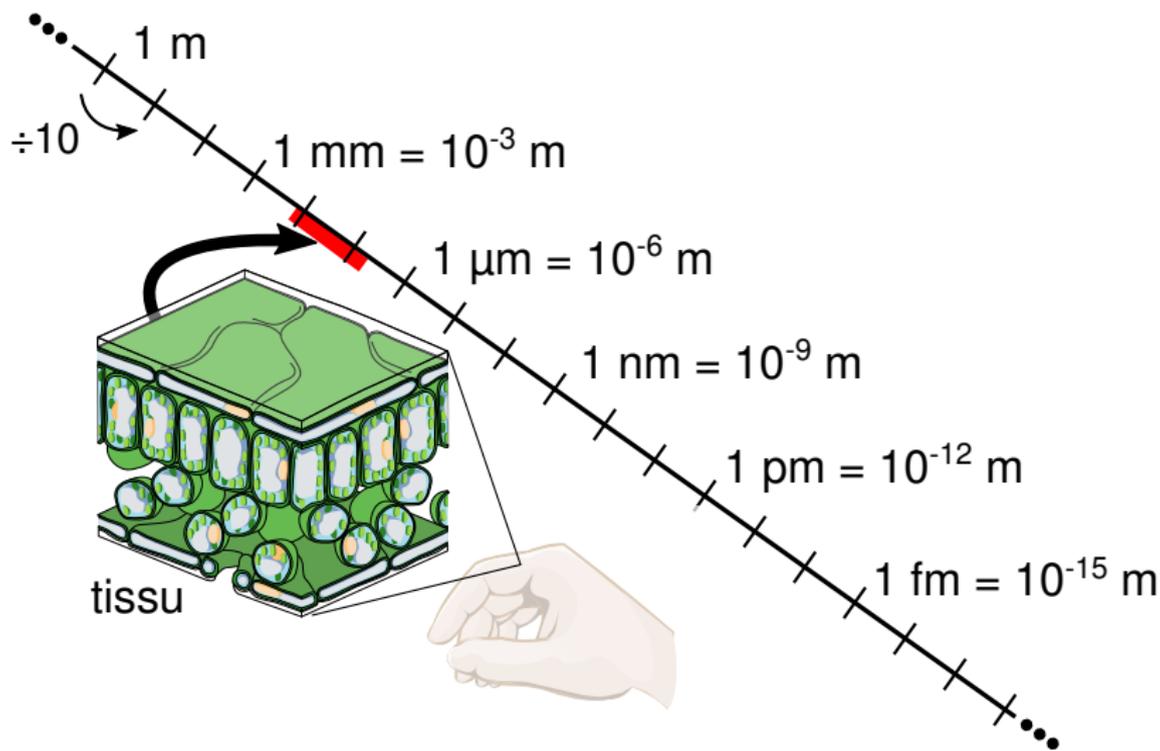
Laurent Forthomme

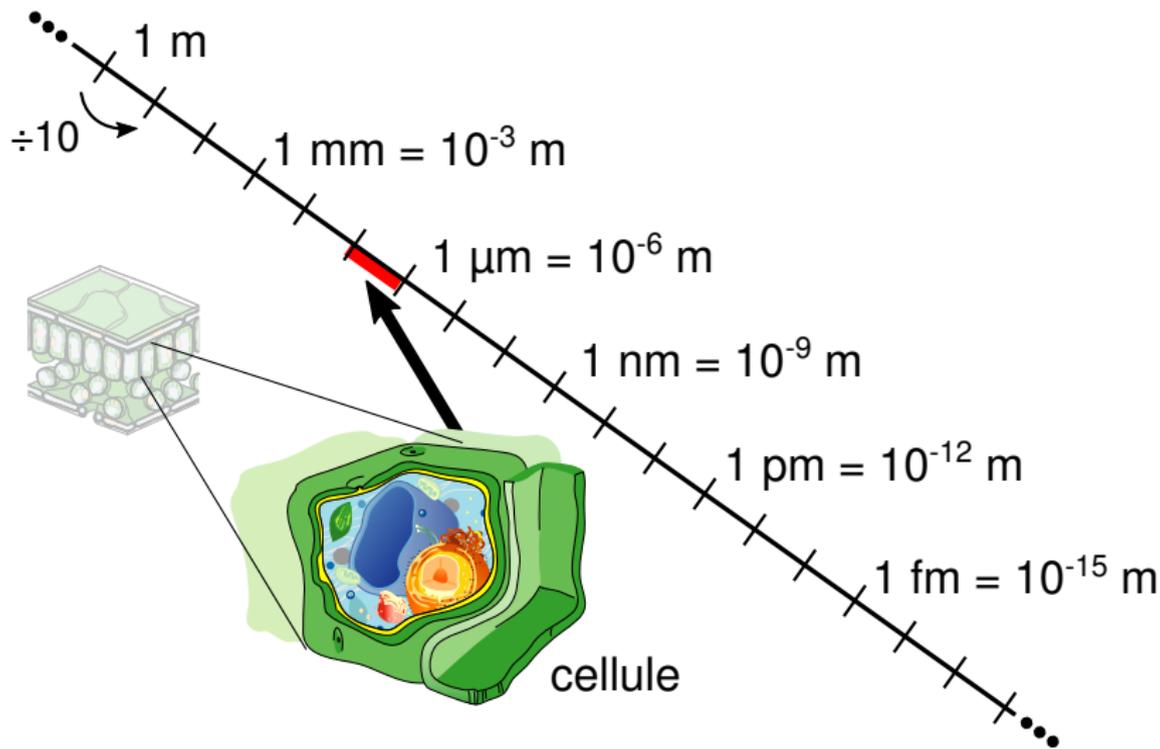
CP3, UCLouvain

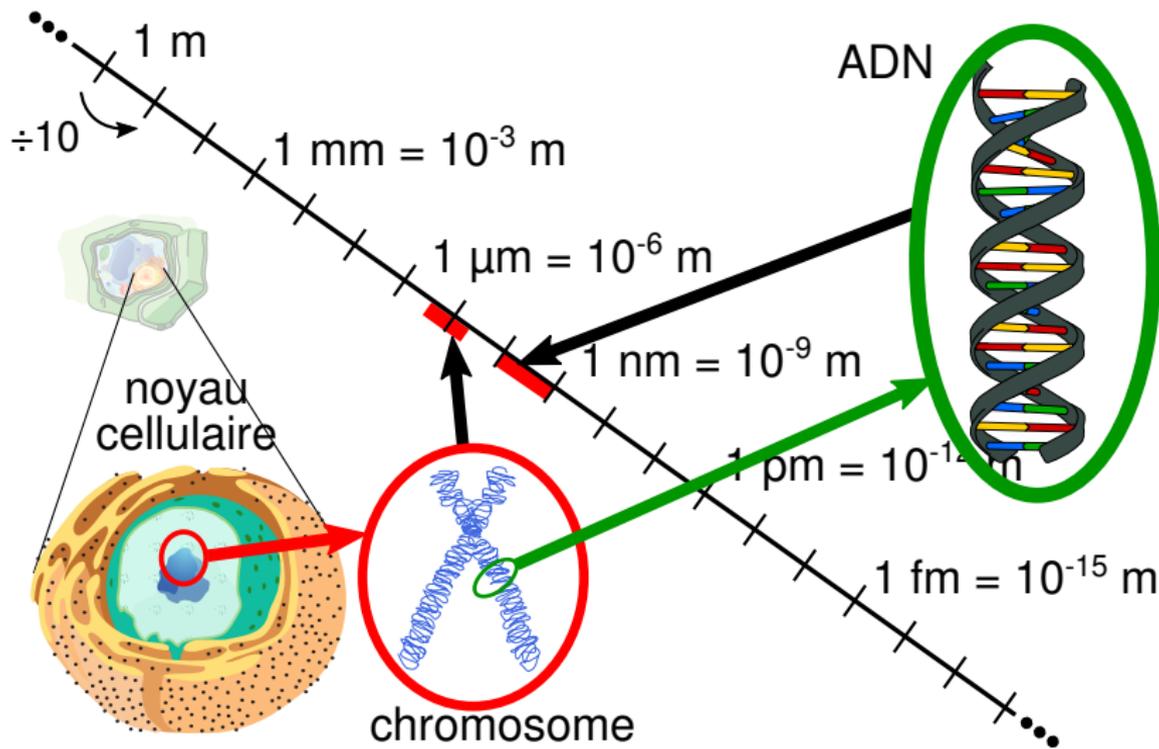
25 avril 2016

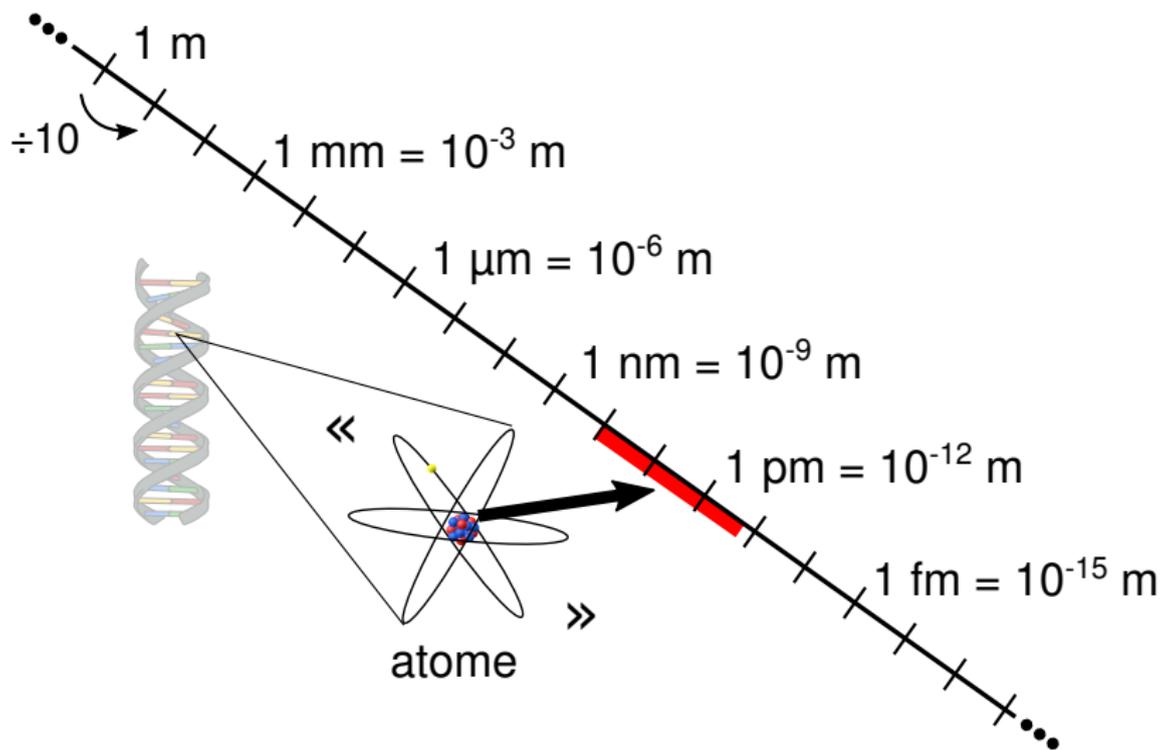


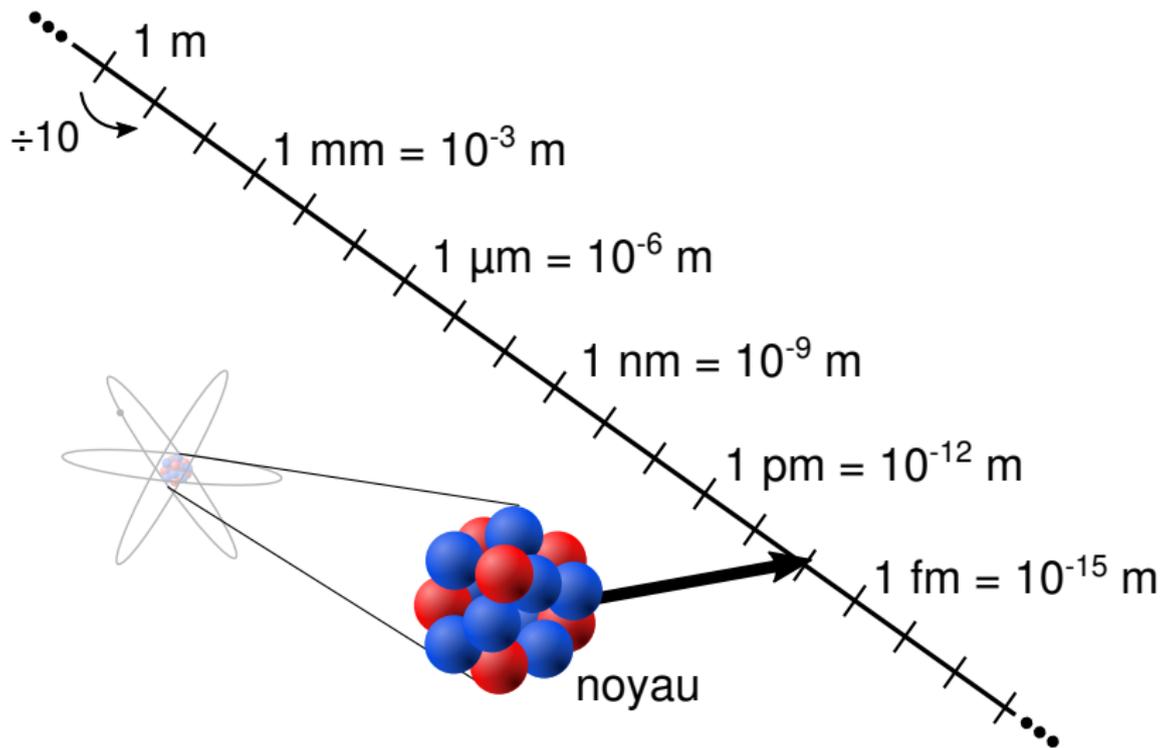


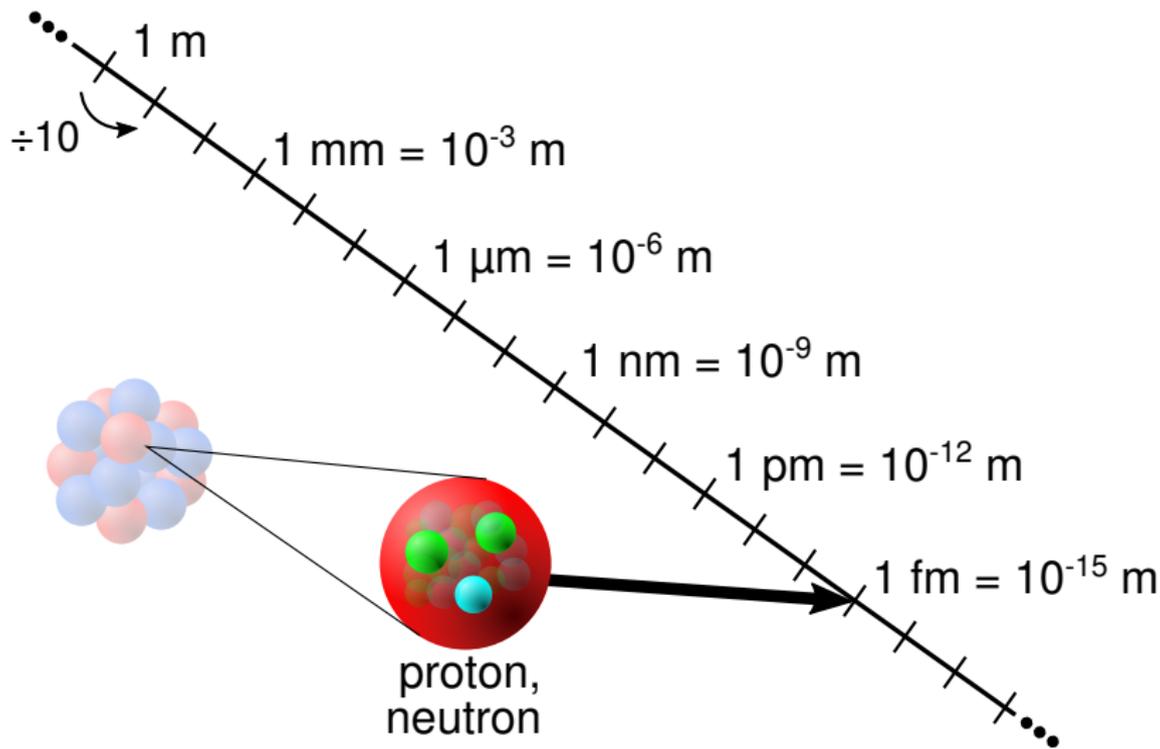












Quarks et leptons forment la matière ordinaire

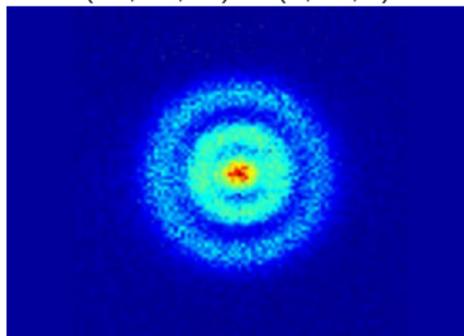
Atome d'hydrogène,
 $(n_1, n_2, m) = (1, 28, 0)$

Leptons

e^\pm électron

0.511 ÷ 1000		← masse (GeV)
1/2	±1	

← spin ← charge électrique
 ($\times e \equiv 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)



Phys. Rev. Lett. 110, 213001

Quarks

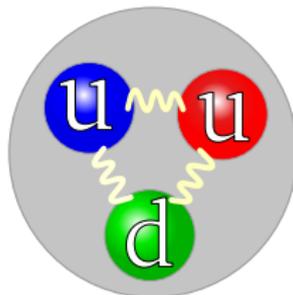
u quark up

0.0023	
1/2	±2/3

d quark down

0.0048	
1/2	∓1/3

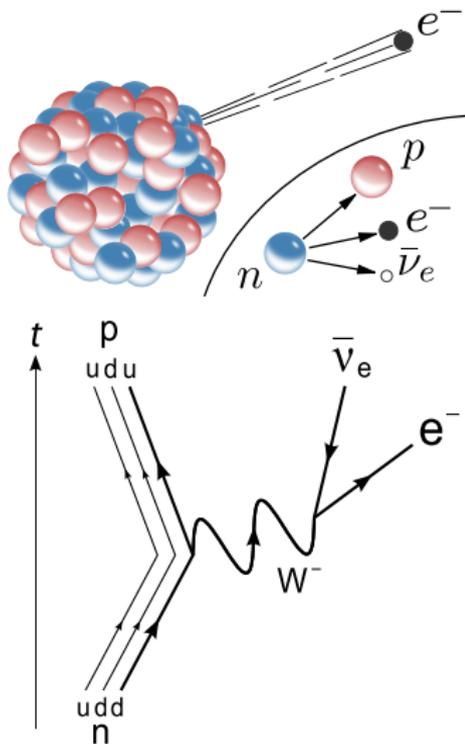
Fermions



Quarks et leptons forment la matière ordinaire

Leptons	
e^\pm électron	
0.511 ÷ 1000	
1/2	±1
ν_e neutrino électronique	
< 0.45 ÷ 10 ⁶	
1/2	0
Quarks	
u quark up	
0.0023	
1/2	±2/3
d quark down	
0.0048	
1/2	∓1/3

Fermions



Quarks et leptons forment la matière ordinaire

	e^\pm électron	μ^\pm muon	τ^\pm tau
Leptons	0.511 ÷ 1000	0.106	1.777
	1/2 ±1	1/2 ±1	1/2 ±1
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tau
	< 0.45 ÷ 10 ⁶	< 0.19 ÷ 1000	< 0.018
	1/2 0	1/2 0	1/2 0
Quarks	u quark up	c quark charm	t quark top
	0.0023	1.275	173.21
	1/2 ±2/3	1/2 ±2/3	1/2 ±2/3
	d quark down	s quark strange	b quark bottom
	0.0048	0.095	4.18
	1/2 ∓1/3	1/2 ∓1/3	1/2 ∓1/3
Fermions			
masse de la génération			

Quarks et leptons forment la matière ordinaire

Interactions entre ces particules médiées par des bosons de jauge

	e^\pm électron	μ^\pm muon	τ^\pm tau	γ photon
Leptons	0.511 ÷ 1000	0.106	1.777	0
	1/2 ±1	1/2 ±1	1/2 ±1	1 0
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tau	W^\pm boson W
	< 0.45 ÷ 10 ⁶	< 0.19 ÷ 1000	< 0.018	80.835
	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1 ±1
Quarks	u quark up	c quark charm	t quark top	Z boson Z
	0.0023	1.275	173.21	91.1876
	1/2 ±2/3	1/2 ±2/3	1/2 ±2/3	1 0
	d quark down	s quark strange	b quark bottom	
	0.0048	0.095	4.18	
	1/2 ∓1/3	1/2 ∓1/3	1/2 ∓1/3	
	Fermions			Bosons

Quarks et leptons forment la matière ordinaire

Interactions entre ces particules médiées par des bosons de jauge

	e^\pm électron	μ^\pm muon	τ^\pm tau	γ photon
Leptons	0.511 ÷ 1000	0.106	1.777	0
	1/2 ±1	1/2 ±1	1/2 ±1	1 0
	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tau	W^\pm boson W
	< 0.45 ÷ 10 ⁶	< 0.19 ÷ 1000	< 0.018	80.835
	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1 ±1
Quarks	u quark up	c quark charm	t quark top	Z boson Z
	0.0023	1.275	173.21	91.1876
	1/2 ±2/3	1/2 ±2/3	1/2 ±2/3	1 0
	d quark down	s quark strange	b quark bottom	H boson de Higgs
	0.0048	0.095	4.18	125.7
	1/2 ∓1/3	1/2 ∓1/3	1/2 ∓1/3	0 0
	Fermions			Bosons

Grand nombre de processus physiques rendus possibles par la diffusion de deux photons de grande énergie l'un sur l'autre.



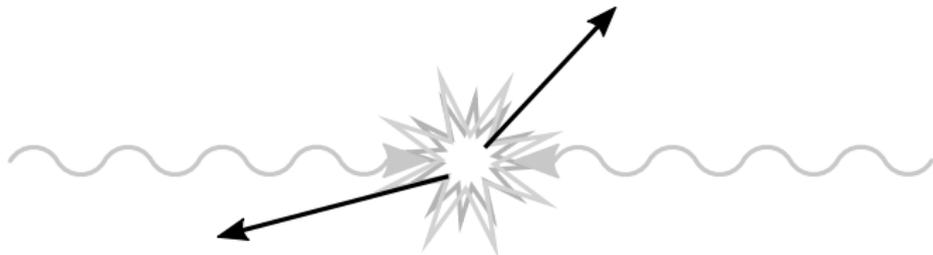
L'énergie disponible lors de la collision donne lieu à de multiples canaux de désintégration ($E_{\text{repos}} = mc^2$) :

Grand nombre de processus physiques rendus possibles par la diffusion de deux photons de grande énergie l'un sur l'autre.



L'énergie disponible lors de la collision donne lieu à de multiples canaux de désintégration ($E_{\text{repos}} = mc^2$) :

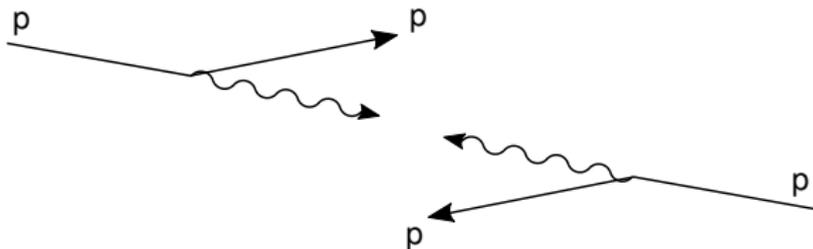
- des particules légères (électrons, muons, quarks "légers", ...)
- des particules plus lourdes (bosons "faibles" W^\pm ou Z^0 , boson de Higgs, quarks t , ...)



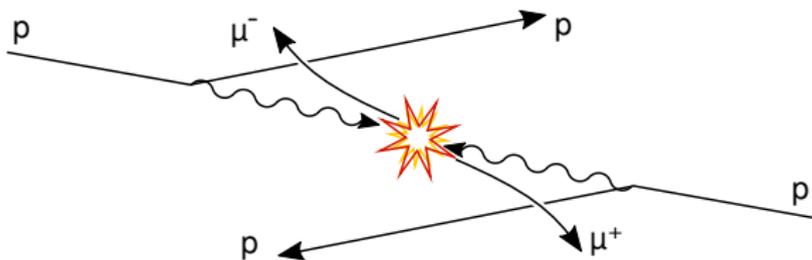
Principales étapes dans la création de tels processus (ici par ex.,
 $pp \rightarrow p^{(*)}(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)p^{(*)}$) :



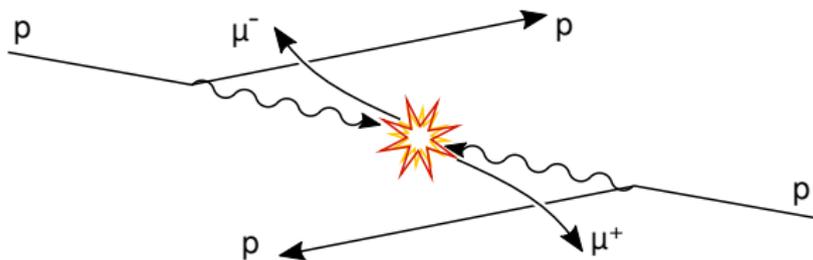
Principales étapes dans la création de tels processus (ici par ex.,
 $pp \rightarrow p^{(*)}(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)p^{(*)}$) :



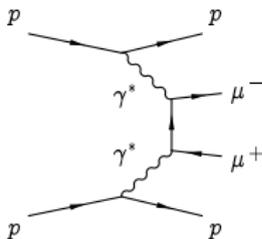
Principales étapes dans la création de tels processus (ici par ex.,
 $pp \rightarrow p^{(*)}(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)p^{(*)}$) :



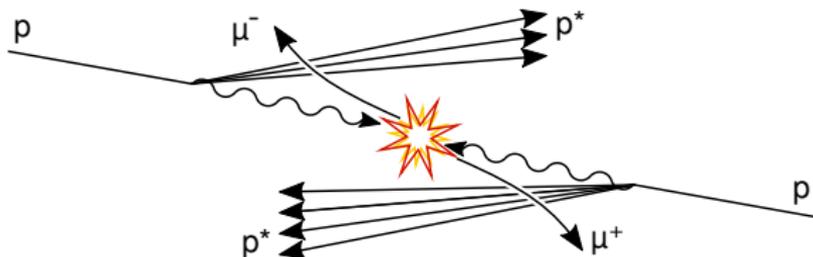
Principales étapes dans la création de tels processus (ici par ex.,
 $pp \rightarrow p^{(*)}(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)p^{(*)}$) :



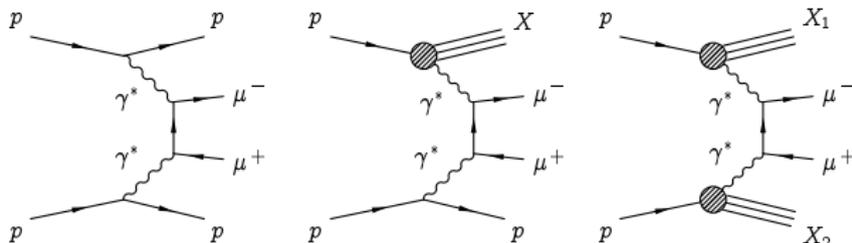
Qu'on peut écrire sous la forme d'un **diagramme de Feynman** :



Principales étapes dans la création de tels processus (ici par ex.,
 $pp \rightarrow p^{(*)}(\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-)p^{(*)}$) :



Qu'on peut écrire sous la forme d'un **diagramme de Feynman** :



3 cas de figure possibles : **diffusion élastique** des deux protons, ou **collision inélastique** de l'un des deux, ou des deux protons incidents

Comment simuler des processus à deux photons ?



Pour prédire le comportement de telles interactions, soit :

- on calcule la probabilité d'observer chaque processus



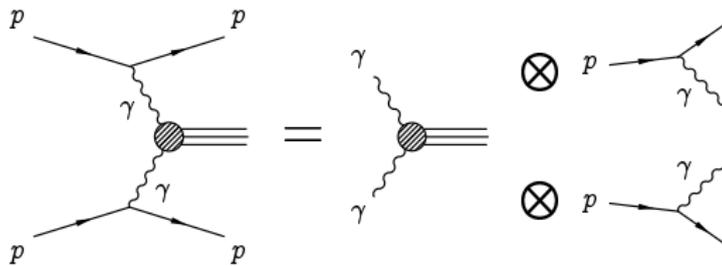
Pour prédire le comportement de telles interactions, soit :

- on calcule la probabilité d'observer chaque processus
 - fonctionne pour des cas "simples" ($\gamma\gamma \rightarrow \mu^+ \mu^-, \dots$)
 - difficile pour des cas plus complexes

Pour prédire le comportement de telles interactions, soit :

- on calcule la probabilité d'observer chaque processus
- on "coupe" le problème en plus petites parties :

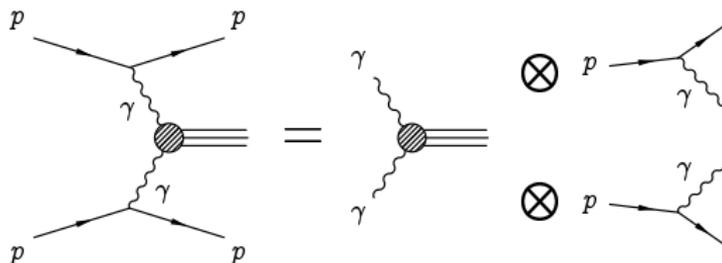
système central généré par la paire de photons
⊕ diffusions des photons par les protons incidents



Pour prédire le comportement de telles interactions, soit :

- on calcule la probabilité d'observer chaque processus
- on "coupe" le problème en plus petites parties :

 système central généré par la paire de photons
 ⊕ diffusions des photons par les protons incidents



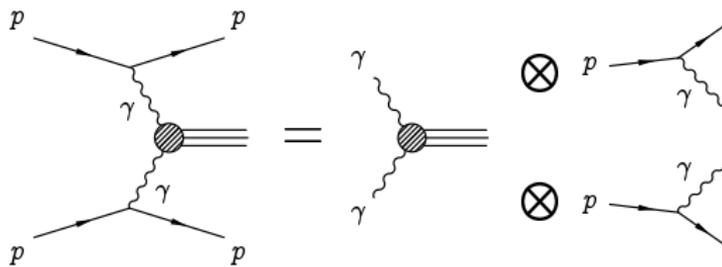
Dans cette approche :

- Approximations : EPA (*equivalent photon approximation*)
 - flux de photons intégrés sur tous les transfert d'énergie Q^2 possibles
 - cas élastique correctement simulé, plus délicat pour les autres !

Pour prédire le comportement de telles interactions, soit :

- on calcule la probabilité d'observer chaque processus
- on "coupe" le problème en plus petites parties :

 système central généré par la paire de photons
 ⊕ diffusions des photons par les protons incidents



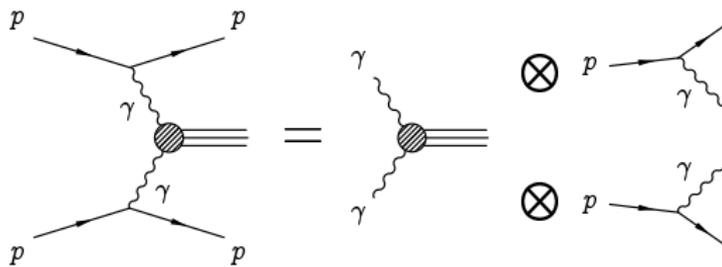
Dans cette approche :

- Approximations : EPA (*equivalent photon approximation*)
- Factorisation k_T
 → plus d'information (flux de photons non-intégrés)

Pour prédire le comportement de telles interactions, soit :

- on calcule la probabilité d'observer chaque processus
- on "coupe" le problème en plus petites parties :

 système central généré par la paire de photons
 ⊕ diffusions des photons par les protons incidents



Dans cette approche :

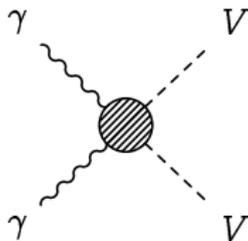
- Approximations : EPA (*equivalent photon approximation*)
- Factorisation k_T
 - plus d'information (flux de photons non-intégrés)
 - seul le cas $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$ développé durant cette thèse
 - résultats comparables à une approche "classique" (élément de matrice complet)

Avec des énergies de collision plus grandes, de nouveaux canaux de productions sont accessibles kinématiquement.

Exemple : production de paires de bosons V (W^\pm ou Z) beaucoup plus lourds !

Principal intérêt : tester expérimentalement la prédiction théorique du modèle standard !

- Processus **jamais observés expérimentalement**
- Précédentes limites sur les prédictions anormales datant du début des années '2000 et du LEP



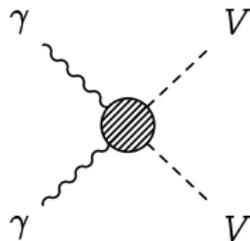
Modèles anormaux utilisés pour tester une éventuelle déviation par rapport au SM : opérateurs effectifs de **dimensions 6 et 8**

Avec des énergies de collision plus grandes, de nouveaux canaux de productions sont accessibles kinématiquement.

Exemple : production de paires de bosons V (W^\pm ou Z) beaucoup plus lourds!

Principal intérêt : tester expérimentalement la prédiction théorique du modèle standard!

- Processus **jamais observés expérimentalement**
- Précédentes limites sur les prédictions anormales datant du début des années '2000 et du LEP

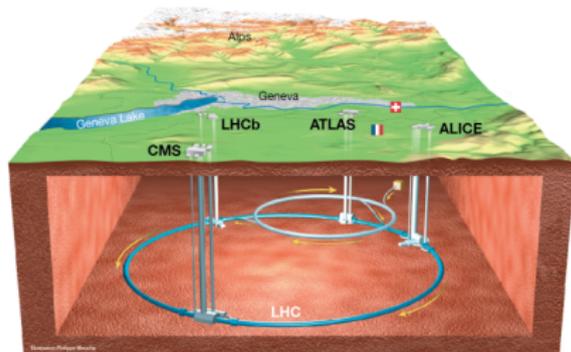


Modèles anormaux utilisés pour tester une éventuelle déviation par rapport au SM : opérateurs effectifs de **dimensions 6 et 8**

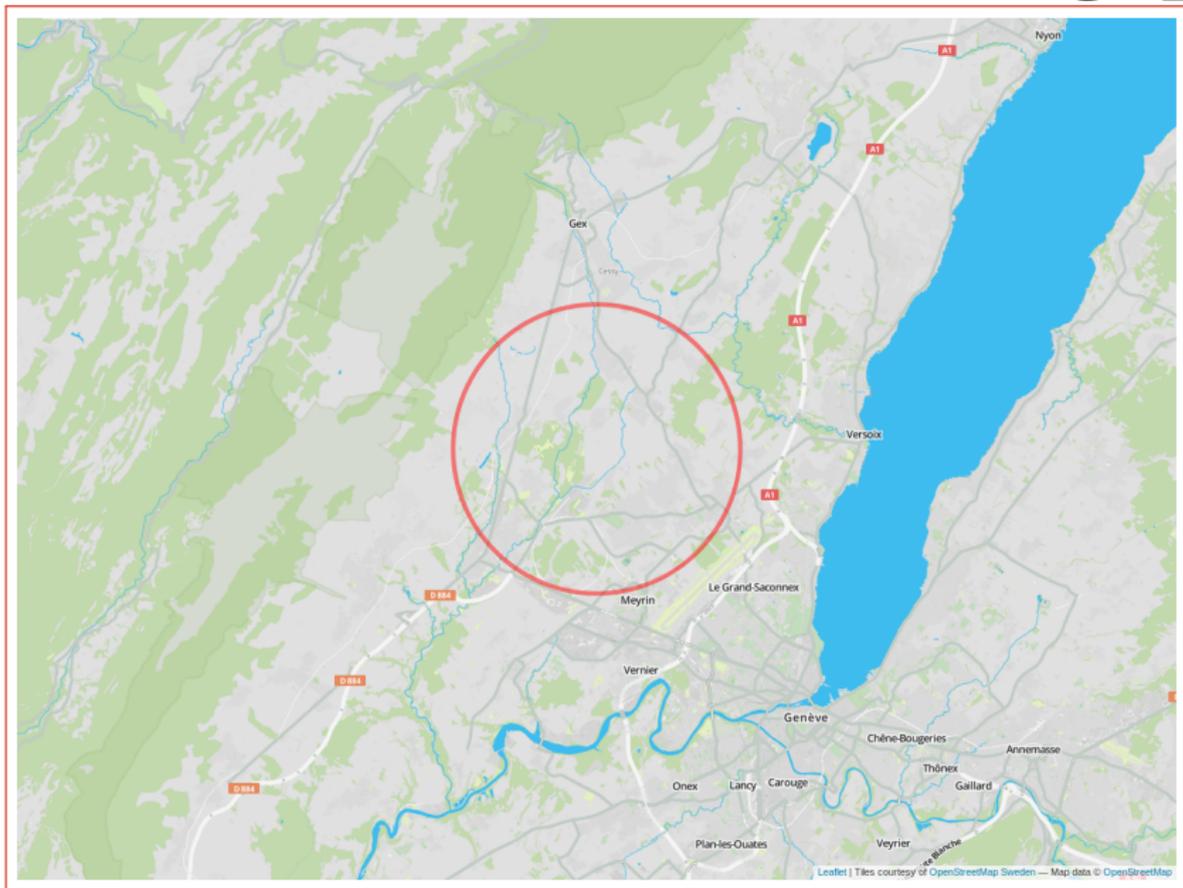
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_6^0 &= -\frac{e^2}{8} \left\{ \frac{a_0^W}{\Lambda^2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} W^{+\alpha} W_\alpha^- + \frac{1}{2 \cos^2 \Theta_W} \frac{a_0^Z}{\Lambda^2} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} Z^\alpha Z_\alpha \right\} \\ \mathcal{L}_6^C &= -\frac{e^2}{16} \left\{ \frac{a_C^W}{\Lambda^2} F_{\mu\alpha} F^{\mu\beta} (W^{+\alpha} W_\beta^- - W^{-\alpha} W_\beta^+) + \frac{1}{\cos^2 \Theta_W} \frac{a_C^Z}{\Lambda^2} F_{\mu\alpha} F^{\mu\beta} Z^\alpha Z_\beta \right\} \\ \mathcal{L}_6^n &= -i \frac{e^2}{16 \cos \Theta_W} \frac{a_n}{\Lambda^2} \left\{ F_{\mu\nu} \left[Z^{\mu\alpha} (W_\alpha^+ W_\nu^- - W_\alpha^- W_\nu^+) + W^{+\mu\alpha} (W_\nu^- Z_\alpha - Z_\nu W_\alpha^-) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - W^{-\mu\alpha} (W_\nu^+ Z_\alpha - Z_\nu W_\alpha^+) \right] \right\} \end{aligned}$$

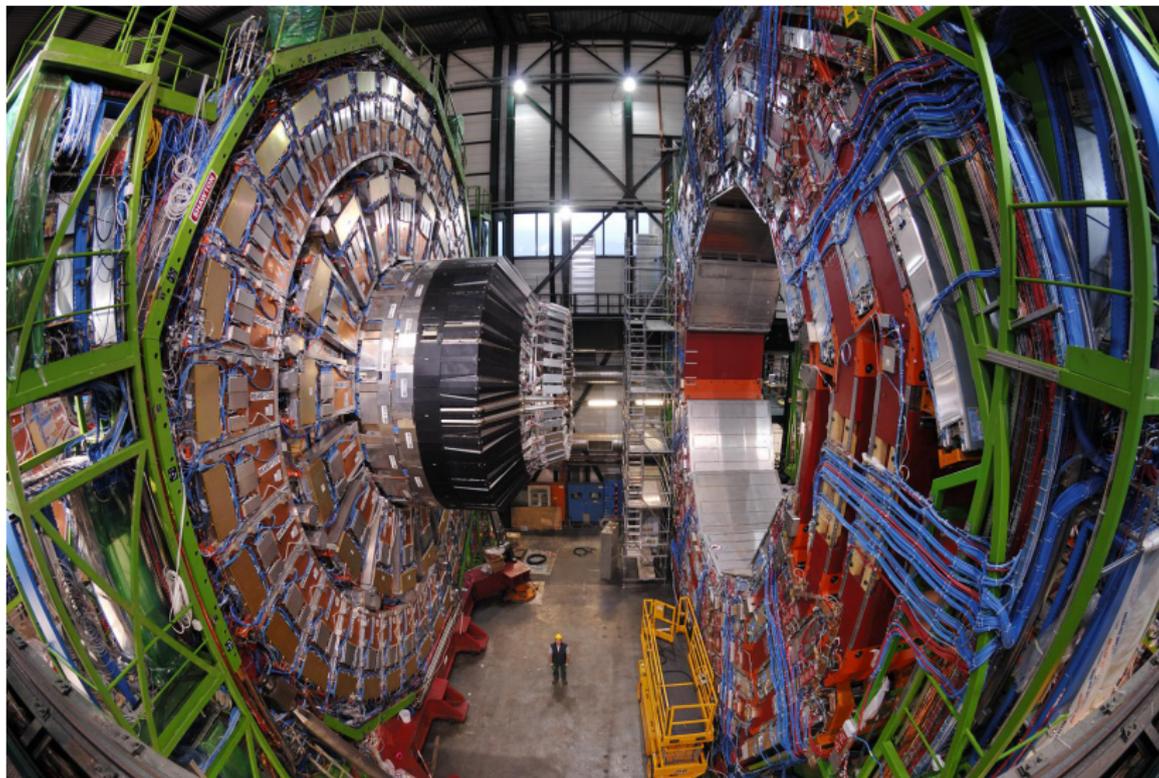
Le *Large Hadron Collider* (LHC) en quelques chiffres :

- Accélérateur de ~ 27 km de circonférence
- Plongé entre 75 et 175 m sous terre
- > 1600 aimants supraconducteurs, dont :
 - 1232 dipôles
 - 392 quadripôles
 - ...
 - 600 GWh par an pour les aimants
(5% de )
- 2 faisceaux circulant en sens opposés
- 4 points de collisions (20 ou 40 MHz) où sont installées 4 expériences principales



27 km ?





Le détecteur CMS (*Compact Muon Solenoid*)



Masse totale : 14 000 tonnes
Diamètre : 15.0 m
Longueur maximale : 28.7 m
Champ magnétique : 3.8 T

TRAJECTOGRAPHE SILICIUM

Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}^2$) ~ 16 m² ~ 66M canaux de lecture
Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}^2$) ~ 200 m² ~ 9.6M canaux de lecture

AIMANT SUPRACONDUCTEUR

Aimant en niobium-titane parcouru d'un courant électrique de ~ 18 kA

CHAMBRES À MUONS

Tonneau : 250 chambres à dérive
480 RPCs
Bouchons : 468 cathodes
432 RPCs

PRESHOWER

Silicon strips ~ 16 m²
~ 137k canaux de lecture

CALORIMÈTRE "FORWARD"

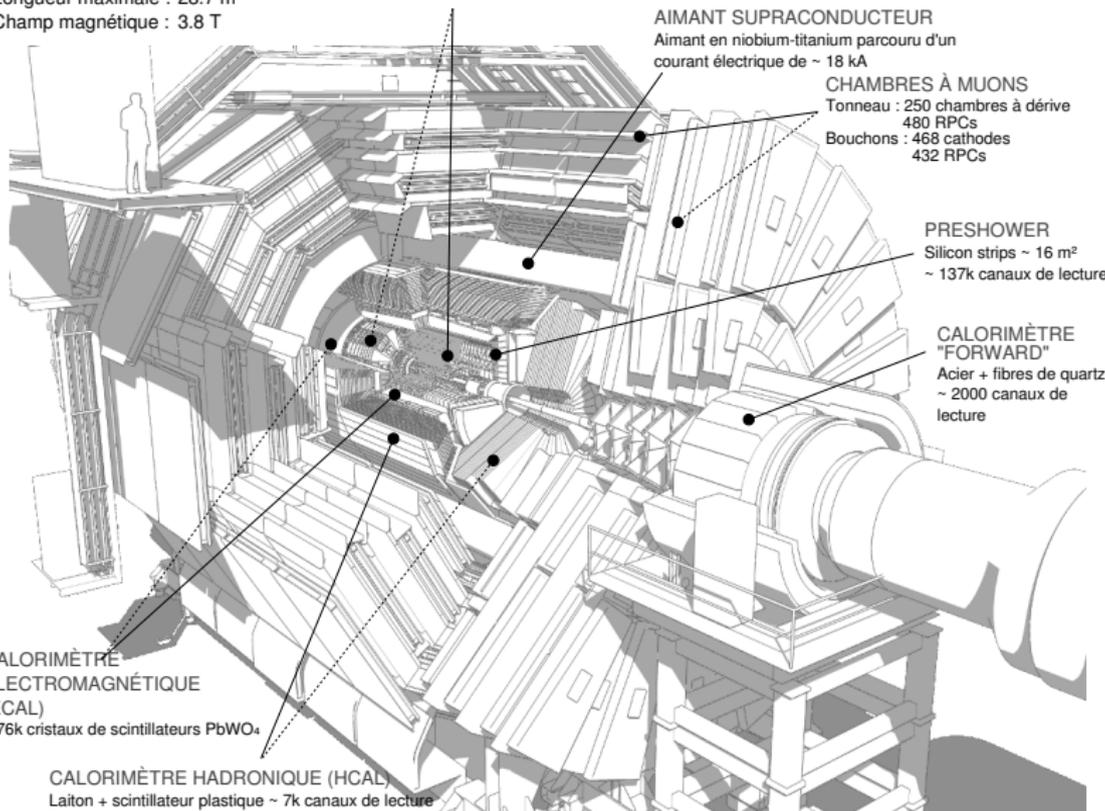
Acier + fibres de quartz
~ 2000 canaux de lecture

CALORIMÈTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE (ECAL)

~ 76k cristaux de scintillateurs PbWO₃

CALORIMÈTRE HADRONIQUE (HCAL)

Laiton + scintillateur plastique ~ 7k canaux de lecture

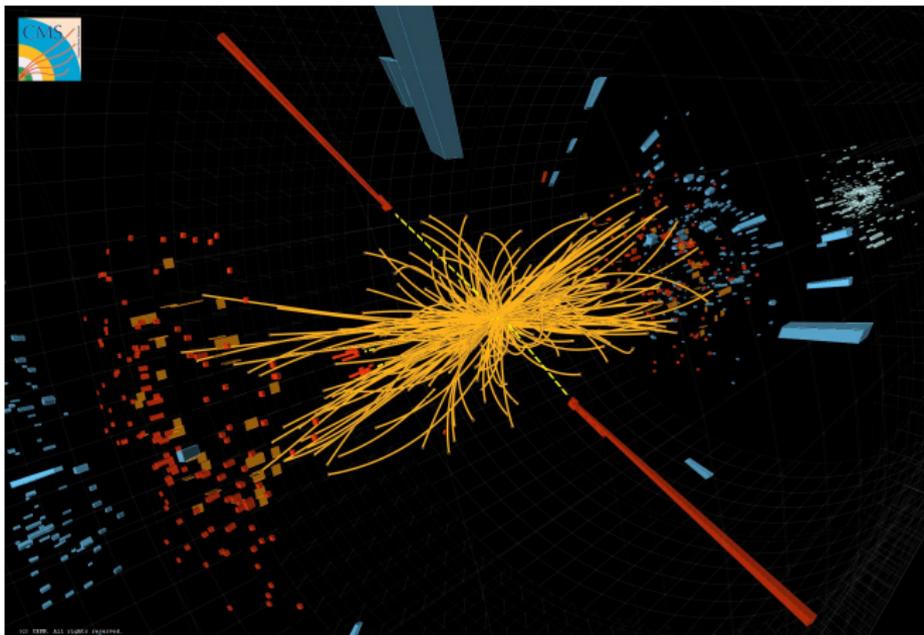


Mesure de processus exclusifs à deux photons au moyen
d'états finaux dileptoniques pour des collisions proton-
proton au LHC

Collision proton-proton au LHC

- généralement, interaction forte (gluons, quarks ...)
- grand nombre de particles produites dans le détecteur

Exemple : Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$ observé en 2011 par CMS



Collision proton-proton au LHC

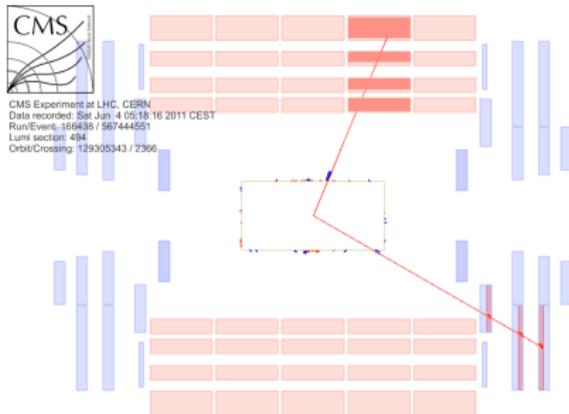
- généralement, interaction forte (gluons, quarks ...)
- grand nombre de particules produites dans le détecteur

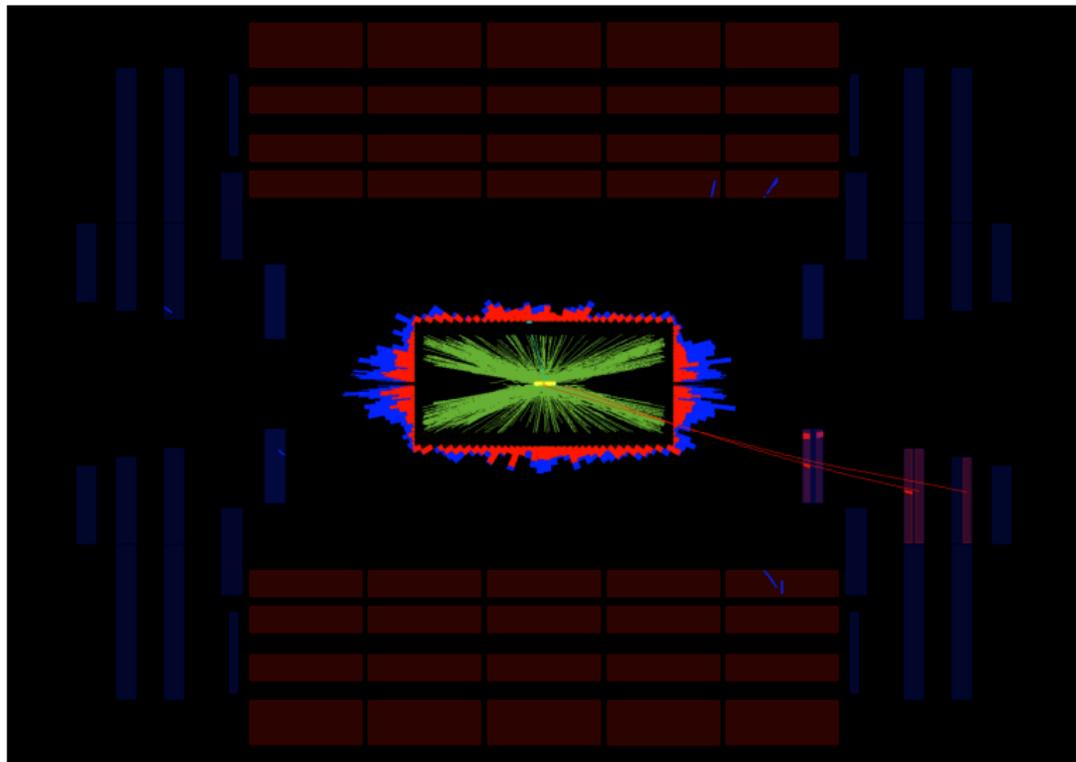
Mais, si **diffusion photon-photon**, bonne probabilité de garder **deux protons intacts**

- système 2-photons "isolé" (centre du détecteur)
- protons dans l'état final

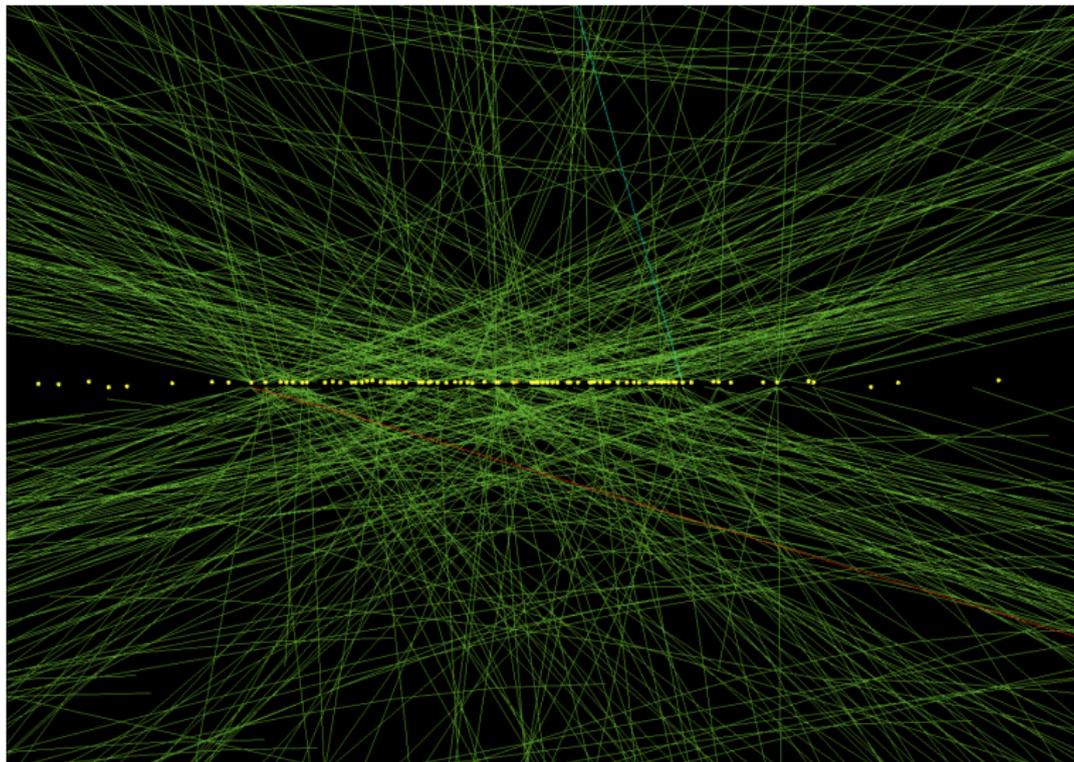
Ex. : production à deux photons d'une paire de muon-antimuon ($\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$)

- "Signature" expérimentale : deux muons, et **aucune autre particule** produite au même endroit





En 2012, un évènement avec **78 collisions** proton-proton reconstruites !

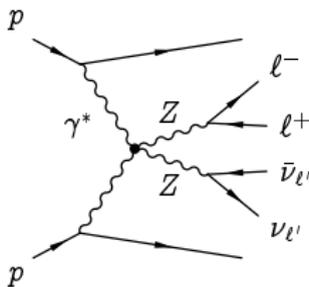
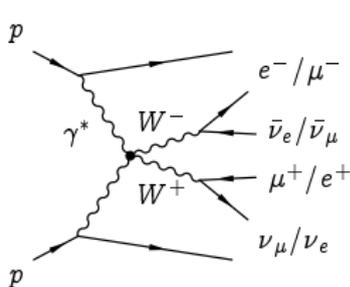


En 2012, un évènement avec **78 collisions** proton-proton reconstruites !

Deux processus étudiés dans cette thèse : production à deux photons d'une paire de bosons W^\pm , ou Z

Canaux de désintégration : **dileptoniques**

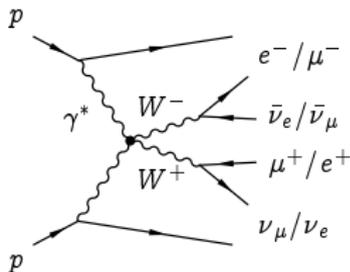
- $W^+ W^- \rightarrow (\mu^\pm \nu_\mu)(e^\mp \nu_e)$
- $ZZ \rightarrow (\mu^+ \mu^-)(\nu \bar{\nu})$



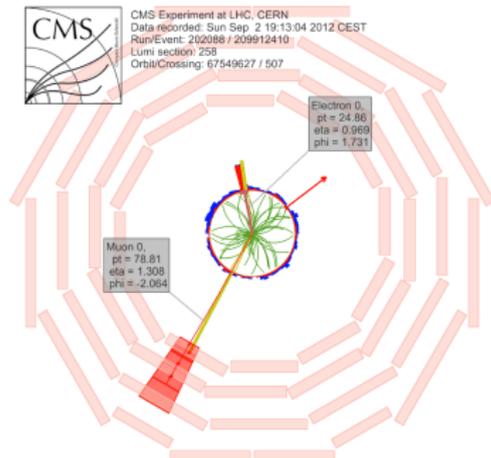
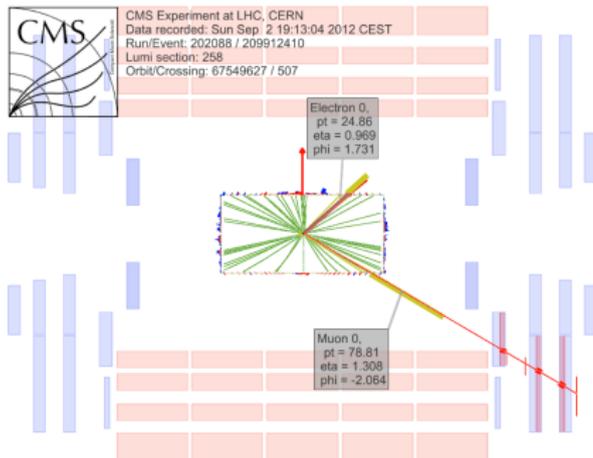
Deux processus étudiés dans cette thèse : production à deux photons d'une paire de bosons W^\pm , ou Z

Canaux de désintégration : dileptoniques

- $W^+ W^- \rightarrow (\mu^\pm \nu_\mu)(e^\mp \nu_e)$
- $ZZ \rightarrow (\mu^+ \mu^-)(\nu \bar{\nu}) \rightarrow$ lire la thèse! (ou CMS-AN-2015/337 (FSQ-16-001))



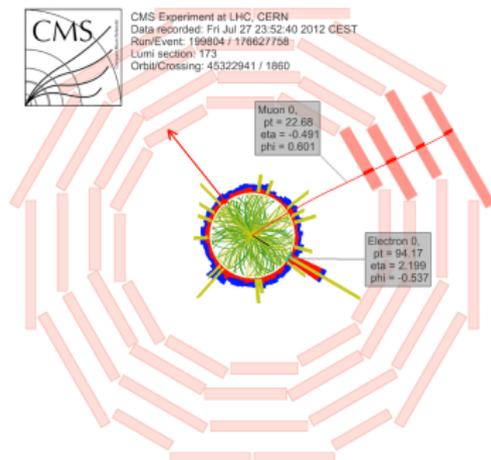
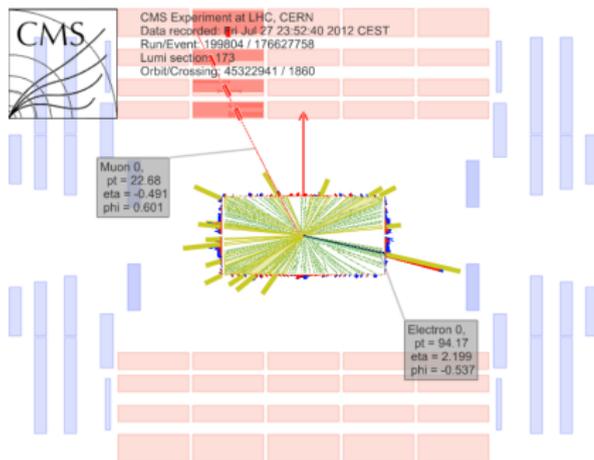
Sélection d'évènements : une paire électron-muon¹ reconstruits sur un vertex sans aucune trace associée, et suffisamment énergétiques²



Pileup : **10 diffusions** proton-proton reconstruites dans l'évènement

1. $p_T(\mu), E_T(e) > 20 \text{ GeV}, |\eta(e, \mu)| < 2.4$
2. $m(e\mu) > 20 \text{ GeV}, p_T(e\mu) > 30 \text{ GeV}$

Sélection d'évènements : une paire électron-muon¹ reconstruits sur un vertex sans aucune trace associée, et suffisamment énergétiques²



Pileup : 26 diffusions proton-proton reconstruites dans l'évènement

1. $p_T(\mu), E_T(e) > 20 \text{ GeV}, |\eta(e, \mu)| < 2.4$
2. $m(e\mu) > 20 \text{ GeV}, p_T(e\mu) > 30 \text{ GeV}$



Prédictions théoriques :

- **Bruits de fond** multiples pour cet état final (DY, VV incl., $t\bar{t}$, QCD, ...)
- **Signal** : $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ (comme prédit par le modèle standard, ou anormal)

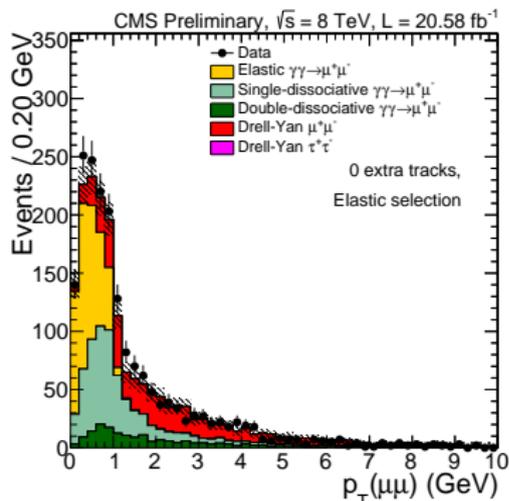
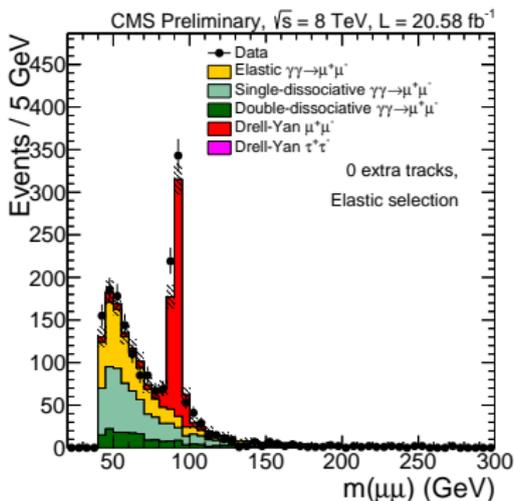


Prédictions théoriques :

- **Bruits de fond** multiples pour cet état final (DY, VV incl., $t\bar{t}$, QCD, ...)
- **Signal** : $\gamma\gamma \rightarrow W^+ W^-$ (comme prédit par le modèle standard, ou anormal)
 - cas pp en utilisant l'EPA
 - extraction des cas inélastiques en utilisant $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+ \mu^-$ et $\gamma\gamma \rightarrow e^+ e^-$

Prédictions théoriques :

- **Bruits de fond** multiples pour cet état final (DY, VV incl., $t\bar{t}$, QCD, ...)
- **Signal** : $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ (comme prédit par le modèle standard, ou anormal)
 - cas pp en utilisant l'EPA
 - extraction des cas inélastiques en utilisant $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ et $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$



Prédictions théoriques :

- **Bruits de fond** multiples pour cet état final (DY, VV incl., $t\bar{t}$, QCD, ...)
- **Signal** : $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ (comme prédit par le modèle standard, ou anormal)
 - cas pp en utilisant l'EPA
 - extraction des cas inélastiques en utilisant $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ et $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$

$$F = \frac{\text{Diagram 1} + \text{Diagram 2} + \text{Diagram 3}}{\text{Diagram 4}}$$

région cinématique du signal

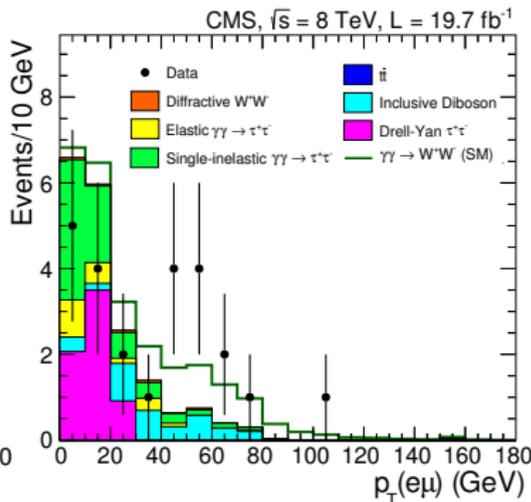
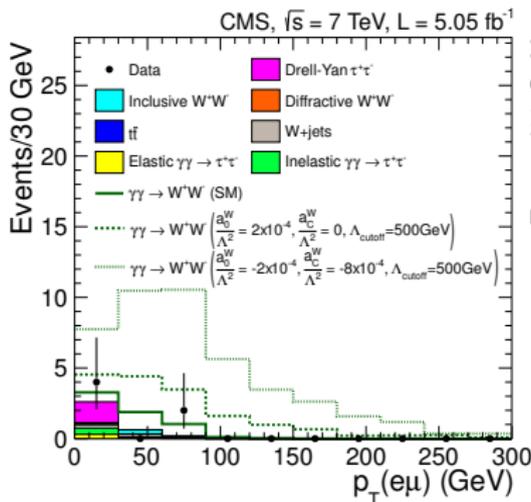
ou, expérimentalement

$$F = \frac{n_{\text{total}}^{\text{observé}} - n_{\text{bruit, incl}}^{\text{simulé}}}{n_{\text{élastique}}^{\text{simulé}}} \simeq \frac{n_{\text{élastique} \oplus \text{inélastique}}}{n_{\text{élastique}}^{\text{simulé}}}$$

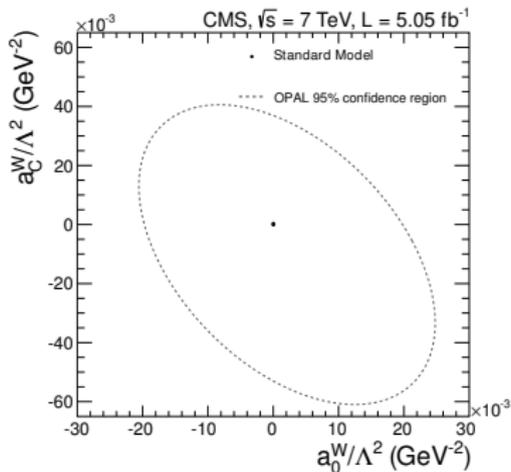
$$= \begin{cases} 3.23 \pm 0.5 \text{ (stat.)} & \sqrt{s} = 7 \text{ TeV} \\ 4.10 \pm 0.43 \text{ (stat.)} & \sqrt{s} = 8 \text{ TeV} \end{cases}$$

Prédictions théoriques :

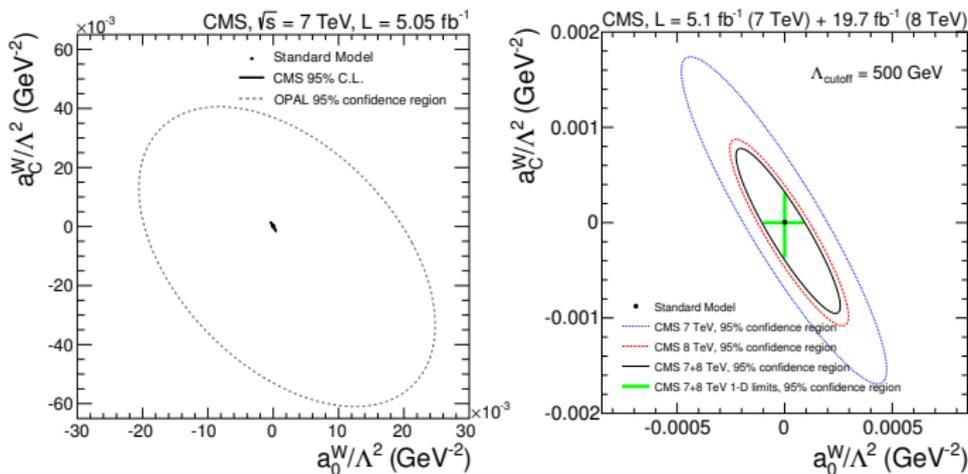
- **Bruits de fond** multiples pour cet état final (DY, VV incl., $t\bar{t}$, QCD, ...)
- **Signal** : $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$ (comme prédit par le modèle standard, ou anormal)
 - cas pp en utilisant l'EPA
 - extraction des cas inélastiques en utilisant $\gamma\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-$ et $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$



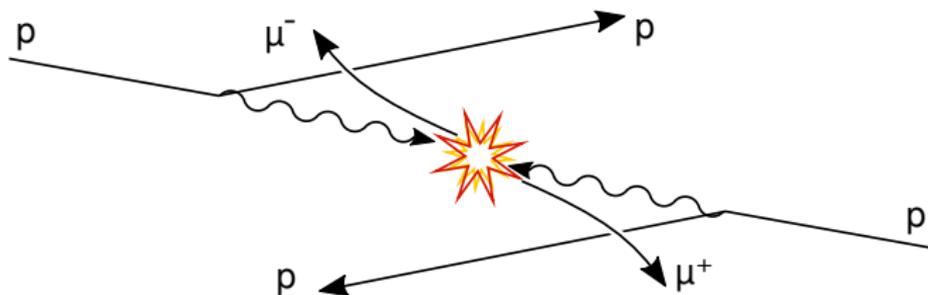
Limites sur les comportements anormaux du couplage $\gamma\gamma W^+ W^-$:

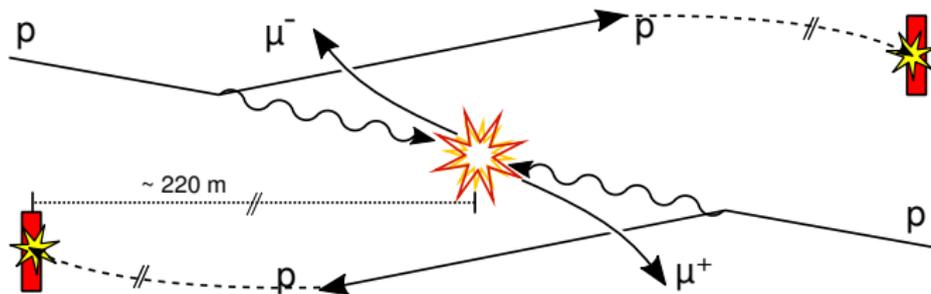


Limites sur les comportements anormaux du couplage $\gamma\gamma W^+ W^-$:



Limites sur a_0^W/Λ^2 $10.000 \times$ plus précises qu'au LEP!
 a_C^W/Λ^2 $1000 \times$



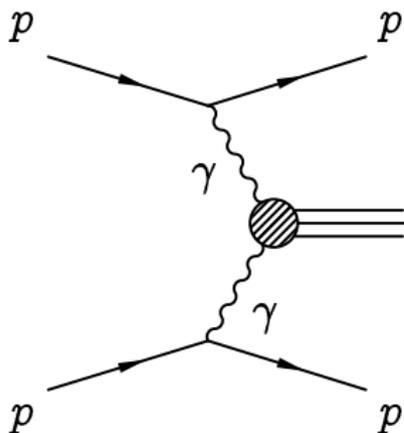


Détection des protons sortant

→ sélection expérimentale des processus élastiques ou quasi-élastiques

Double intérêt dans la physique à deux photons :

- Détermination de l'énergie de la collision $\gamma\gamma$ au moyen de l'énergie et de l'impulsion des protons sortant \rightarrow détecteurs "tracking" :



$$p_1^{\text{proton entrant}} + p_2^{\text{proton entrant}} = p_1^{\text{proton sortant}} + p^{\text{système central}} + p_2^{\text{proton sortant}}$$

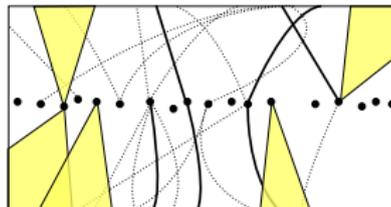
$$\text{donc, } p^{\text{système central}} = \Delta p_1 + \Delta p_2$$

Double intérêt dans la physique à deux photons :

- Détermination de l'énergie de la collision $\gamma\gamma$ au moyen de l'énergie et de l'impulsion des protons sortant \rightarrow détecteurs "tracking"
- Suppression du *pileup* au moyen de la reconstruction des protons diffusés dans la région "lointaine" \rightarrow détecteurs "timing"

localisation du point de collision
 \propto
résolution temporelle des détecteurs
timing

$$z_{pp} = \frac{c(t_F - t_B)}{2}$$



Double intérêt dans la physique à deux photons :

- Détermination de l'énergie de la collision $\gamma\gamma$ au moyen de l'énergie et de l'impulsion des protons sortant \rightarrow détecteurs "tracking"
- Suppression du *pileup* au moyen de la reconstruction des protons diffusés dans la région "lointaine" \rightarrow détecteurs "timing"

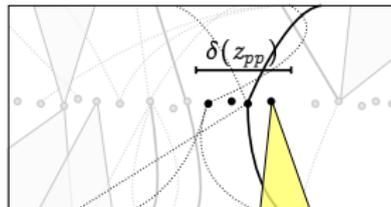
localisation du point de collision

\propto

résolution temporelle des détecteurs

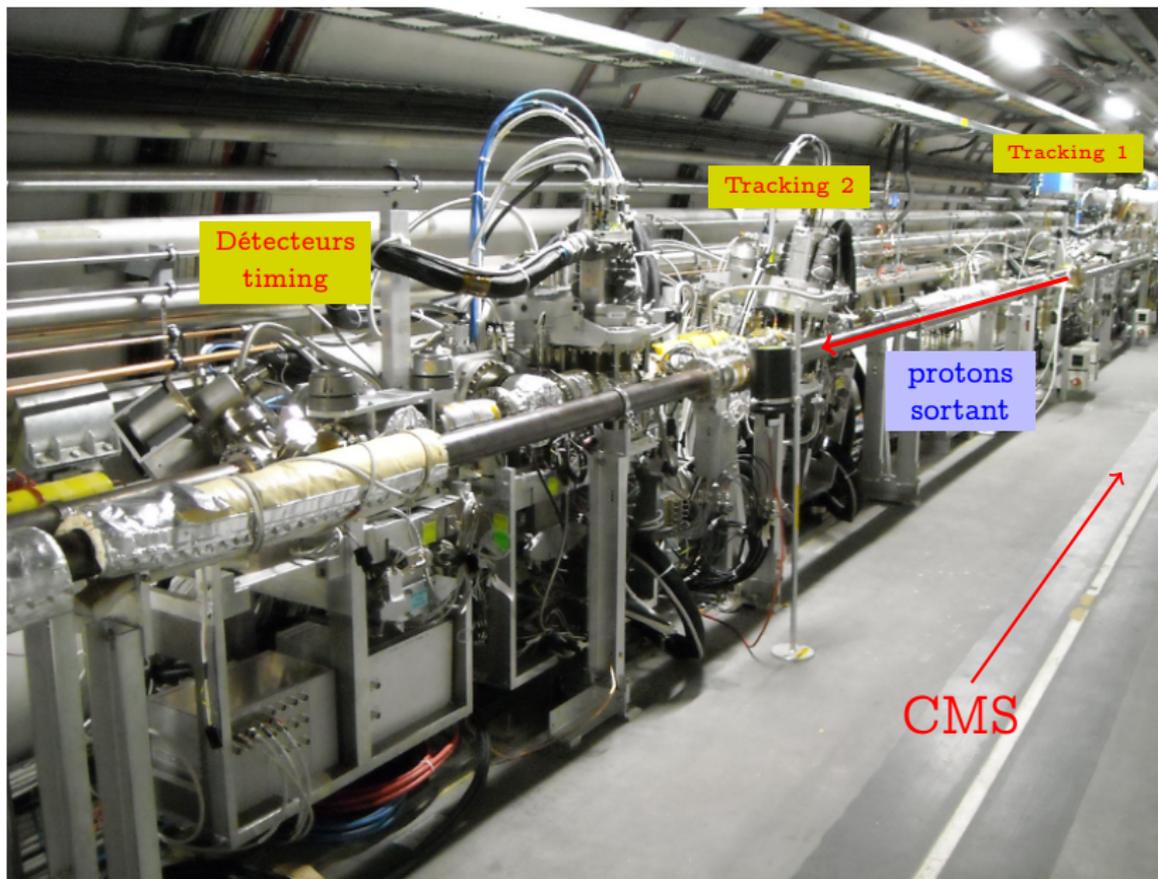
timing

$$z_{pp} = \frac{c(t_F - t_B)}{2} \Rightarrow \delta z_{pp} = \frac{c\delta t}{\sqrt{2}}$$

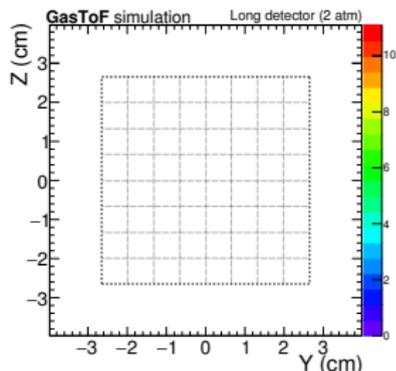
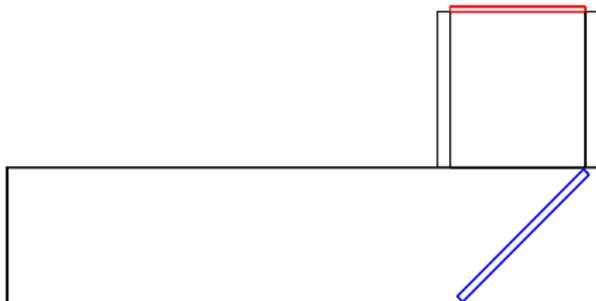


Exemple : pour une résolution de 2 mm sur le point d'interaction,

$$\delta t \sim 10 \text{ ps} = 0,000.000.000.01 \text{ s}$$



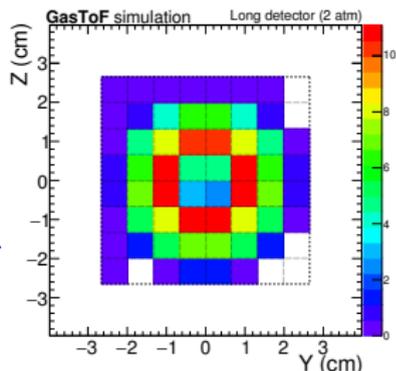
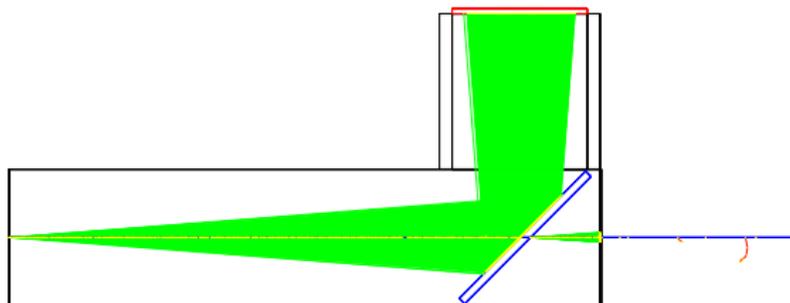
Volume de gaz "Cerenkov" (C_4F_{10}), et miroir à 45°



Détection à 90° du faisceau avec un détecteur MCP-PMT de 8×8 cellules

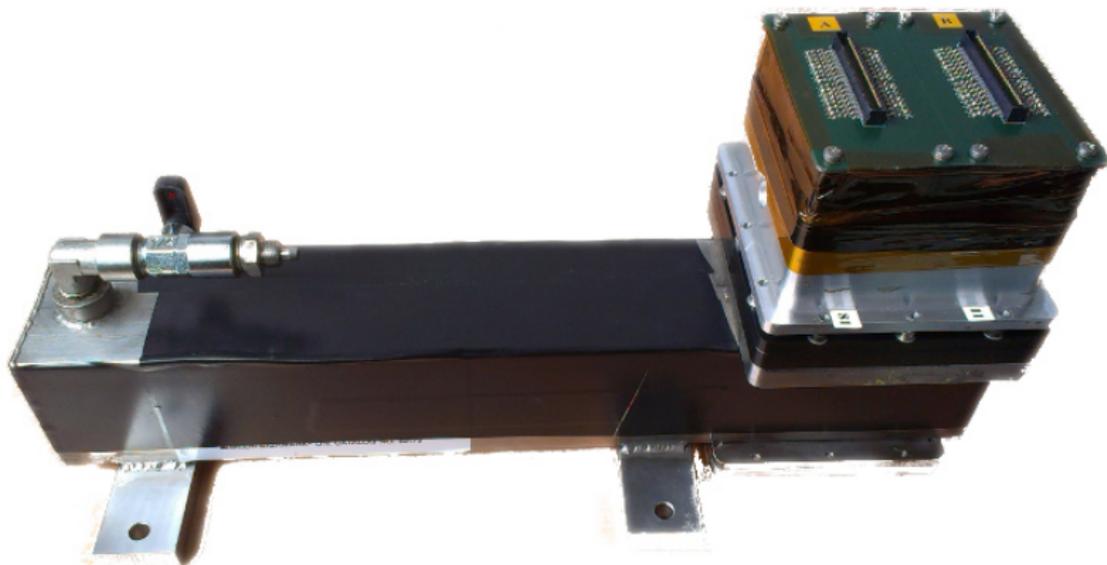
Plusieurs paramètres d'intérêt : longueur, pression du gaz, ...

Volume de gaz "Cerenkov" (C_4F_{10}), et miroir à 45°



Détection à 90° du faisceau avec un détecteur MCP-PMT de 8×8 cellules

Plusieurs paramètres d'intérêt : longueur, pression du gaz, ...

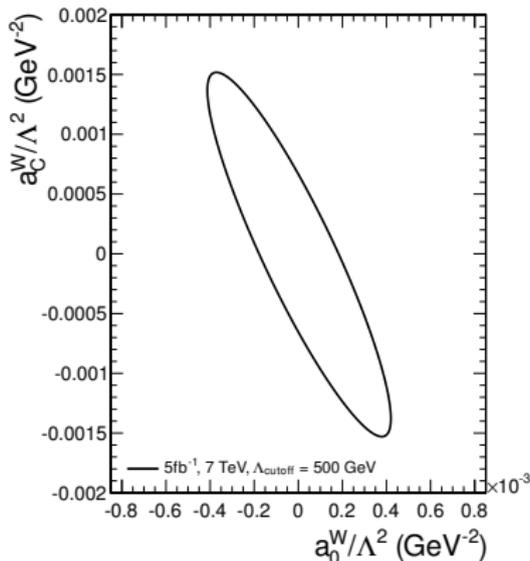


Test d'un premier prototype au SPS du CERN en automne 2015

- grand volume de données récoltées
- analyse toujours en cours !

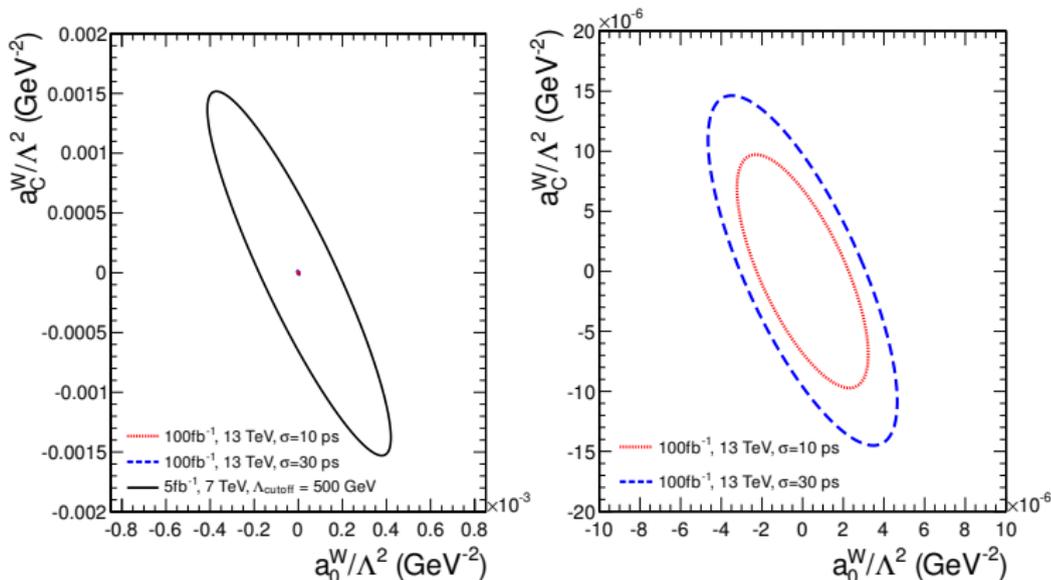
Sélection Identique aux analyses sans PPS, $\sqrt{s} = 13$ TeV

2 scénarios : détecteurs timing avec une résolution δt de **10 ps** et de **30 ps**



Sélection Identique aux analyses sans PPS, $\sqrt{s} = 13$ TeV

2 scénarios : détecteurs timing avec une résolution δt de **10 ps** et de **30 ps**



100 × plus sensible par rapport aux mesures actuelles !

Durant cette thèse :

- Factorisation k_T : Nouvelle approche pour la description théorique des processus $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$, extensible à d'autres processus à deux photons ($\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$, $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$, $\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$, ...)

Reference: [JHEP 02 \(2015\) 159](#) *G. Silveira, L.F., K. Piotrkowski, W. Schäfer, A. Szczurek*

- Première observation jamais réalisée d'un processus $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$!
 - Mise en évidence à 7 TeV
 - Observation à 8 TeV
 - Nouvelles limites sur les production "exotiques" : jusqu'à 1000 × plus précises que les précédentes !

Reference: [JHEP 07 \(2013\) 116](#), [arXiv:1604.04464 \[hep-ex\]](#) *CMS Collaboration*

- Évaluation de la sensibilité aux processus $\gamma\gamma \rightarrow ZZ$ au LHC

Reference: [CMS-AN-2015/337 \(FSQ-16-001\)](#) *L. Forthomme*

- Premiers test du détecteur GasToF en conditions "réelles" avec :
 - un capteur 64-canaux
 - une chaîne complète d'acquisition de données

Merci !

Given a central, two-photon process, extract a **total cross section** at the hadron level :

$$d\sigma\left(pp \rightarrow p(\gamma\gamma \rightarrow X)p\right) = d\hat{\sigma}(\gamma_{\omega_1}\gamma_{\omega_2} \rightarrow X) \otimes dn_{\omega_1} \otimes dn_{\omega_2}.$$

with photon fluxes,

$$dn_{\omega} = \frac{\alpha}{\pi} \frac{d\omega}{\omega} \frac{dQ^2}{Q^2} \left\{ \left(1 - \frac{\omega}{E_i}\right) \left(1 - \frac{Q_{\min}^2}{Q^2}\right) F_E(Q^2) + \frac{\omega^2}{2E_i^2} F_M(Q^2) \right\},$$

integrated over full Q^2 range to define a photon spectrum :

$$f_{\gamma}(x) = \int_{Q_{\min}^2}^{Q_{\max}^2} dQ^2 \frac{dn_{\omega}}{dQ^2 dx_{Bj}}$$

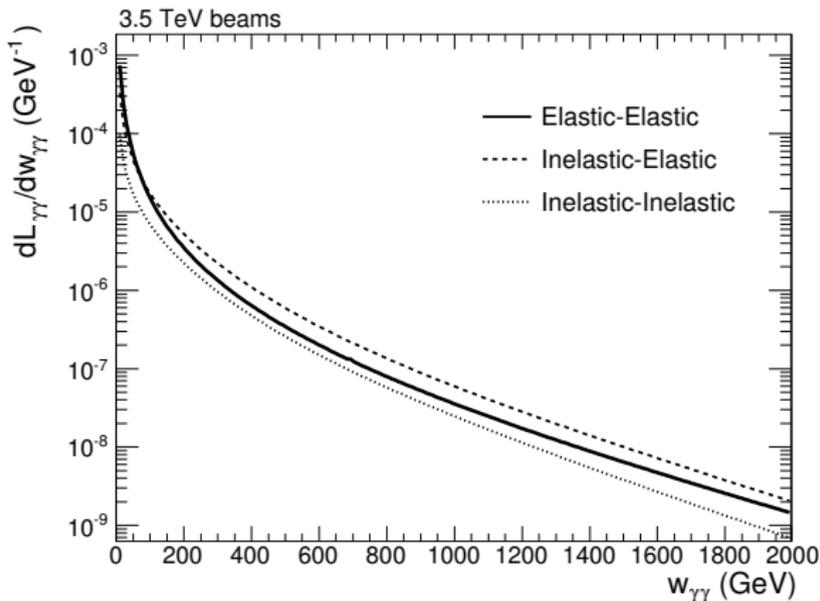
Then, define **equivalent luminosity** :

$$\frac{d\mathcal{L}_{\gamma\gamma}}{dw_{\gamma\gamma}} = \int_{w_{\gamma\gamma}/s}^1 dx \frac{2}{xs} w_{\gamma\gamma} f_{\gamma}(x) f_{\gamma}\left(\frac{w_{\gamma\gamma}}{xs}\right).$$

such that

$$\sigma\left(pp \rightarrow p(\gamma\gamma \rightarrow X)p\right) = \int_{w_0}^{\sqrt{s}} dw_{\gamma\gamma} \cdot \frac{d\mathcal{L}_{\gamma\gamma}}{dw_{\gamma\gamma}} \sigma_{\gamma\gamma \rightarrow X}(w_{\gamma\gamma})$$

Relative two-photon luminosity at $\sqrt{s} = 7$ TeV (picture from N.Schul's thesis)



Problem : integrated (real) photon spectrum : better handling of collinear approximation (barely any photon virtuality)

General idea : two-photon process cross section factoring out the transverse photon virtuality component

Both the elastic and inelastic (dissociative) contributions taken into account in the calculation : e.g. the $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$ process :

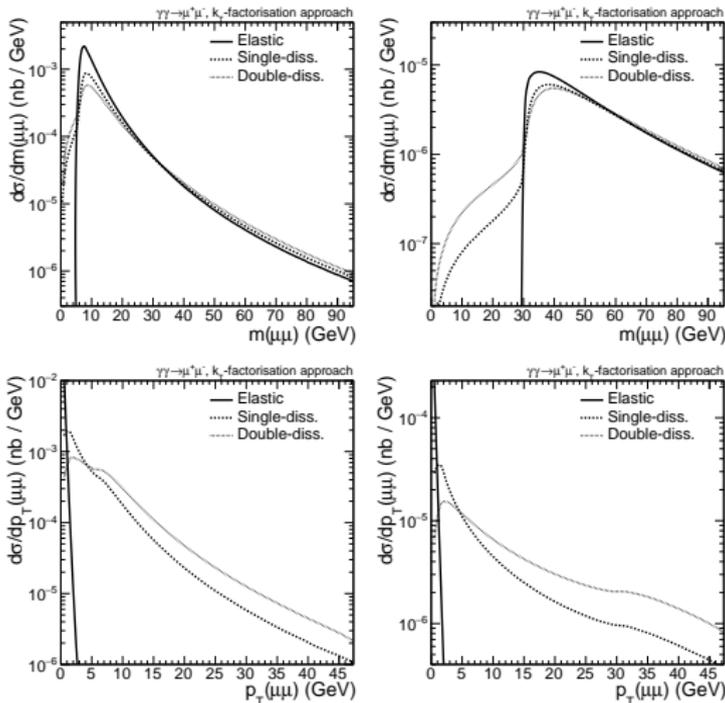
$$\begin{aligned} d\sigma(pp \rightarrow p(\gamma\gamma \rightarrow \ell\ell)p) &= \frac{1}{\pi^2} \int \frac{d^2\mathbf{q}_{T1}^2}{\mathbf{q}_{T1}^2} \frac{d^2\mathbf{q}_{T2}^2}{\mathbf{q}_{T2}^2} \times \\ &\times \mathcal{F}^{(\text{el,diss})}(x_{Bj1}, \mathbf{q}_{T1}^2) \cdot \mathcal{F}^{(\text{el,diss})}(x_{Bj2}, \mathbf{q}_{T2}^2) \times \\ &\times d\sigma^*(p_{\ell_1}, p_{\ell_2}, \mathbf{q}_{T1}, \mathbf{q}_{T2}) \end{aligned}$$

Benefits :

- **unintegrated** photon spectra used in the computation
- **higher photon virtualities** reachable!
- very close to LPAIR's formalism, but two-photon **process-independant** :

i.e. can replace $d\sigma^*$ above with any two-photon process!

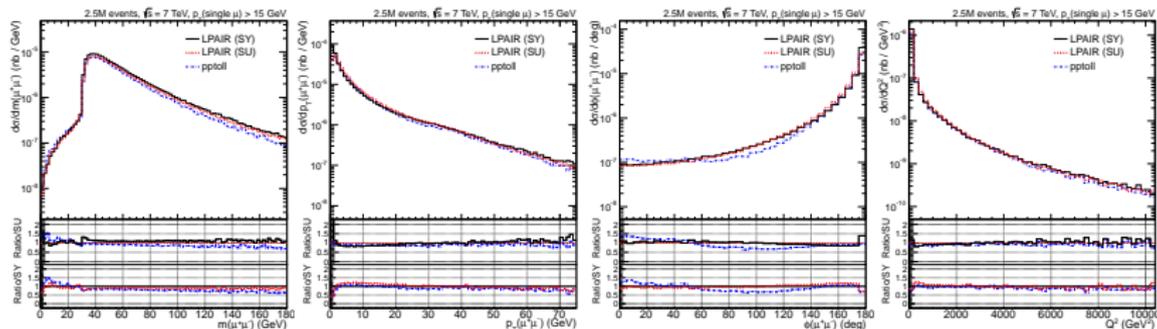
Some kinematic distributions with this formalism ($p_T(\text{single } \mu) > 3$ and 15 GeV) :



Proton structure functions for dissociation : “modern” Szczurek-Uleshchenko (SU)

New MC events generator developed to simulate $\gamma\gamma \rightarrow \ell^+\ell^-$ process with k_T factorisation : pptoll

Studies of single-dissociative case predictions between k_T and LPAIR (here, $p_T(\text{single } \mu) > 15 \text{ GeV}$) :



Overall agreement in yield and shapes, although some tensions in final two-lepton kinematics ($\text{high-}p_T(\ell\ell)$, $\Delta\phi(\ell\ell)$, ...)

Ready to extend this formalism to other two-photon processes (work ongoing for $\gamma\gamma \rightarrow W^+W^-$, ...)

Limits on anomalous quartic $\gamma\gamma W^+ W^-$ couplings



Reference: *JHEP* 07 (2013) 116, arXiv:1604.04464 [hep-ex] CMS Collaboration

(a_0^W, a_C^W) phase space scanned (10k events generated and simulated) to extract signal strength in the region of interest

95% C.L limits on anomalous couplings :

		Form factor					
Λ_{cutoff}		500 GeV			∞ (no FF)		
\sqrt{s}		7 TeV	8 TeV	Comb.	7 TeV	8 TeV	Comb.
Dim-6	a_0^W / Λ^2	± 1.5	$+1.0$ -1.1	0.9 -1.0	± 4.0	± 1.2	± 1.2
	a_C^W / Λ^2	± 5.0	$+3.4$ -4.2	3.1 -3.7	± 15	± 4.4	± 4.2
		$\times 10^{-4} \text{ GeV}^{-2}$			$\times 10^{-6} \text{ GeV}^{-2}$		
Dim-8	$f_{M,0} / \Lambda^4$	± 5.7	$+4.2$ -3.8	3.8 -3.4	± 15	± 4.6	± 4.6
	$f_{M,1} / \Lambda^4$	± 19	$+13$ -16	12 -14	± 57	± 17	± 16
	$f_{M,2} / \Lambda^4$	± 2.8	$+2.1$ -1.9	1.9 -1.7	± 7.6	± 2.3	± 2.3
	$f_{M,3} / \Lambda^4$	± 9.5	$+6.4$ -8.0	5.9 -7.0	± 28	± 8.3	± 8.0
		$\times 10^{-10} \text{ GeV}^{-4}$			$\times 10^{-12} \text{ GeV}^{-4}$		

Direct correspondance between dim-8 and dim-6 coupling limits :

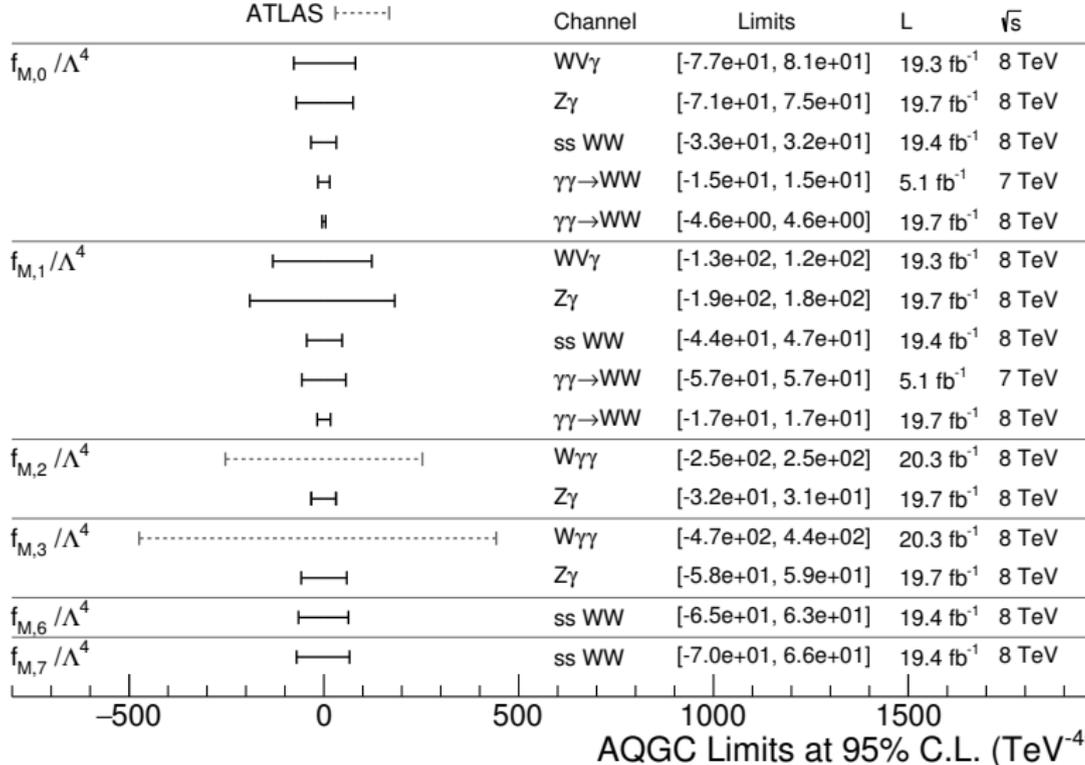
$$\frac{a_0^W}{\Lambda^2} = -\frac{4M_W^2}{g^2} \frac{f_{M,0}}{\Lambda^4} - \frac{8M_W^2}{g'^2} \frac{f_{M,2}}{\Lambda^4},$$
$$\frac{a_C^W}{\Lambda^2} = \frac{4M_W^2}{g^2} \frac{f_{M,1}}{\Lambda^4} + \frac{8M_W^2}{g'^2} \frac{f_{M,3}}{\Lambda^4}.$$

Summary of all (modern) AQGC searches



October 2015

CMS 
 ATLAS 



AQGC Limits at 95% C.L. (TeV⁻⁴)

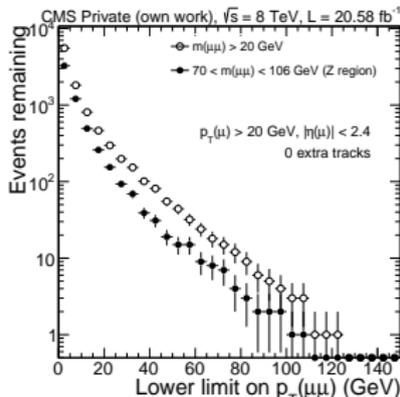
Plot from <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsSMPaTGC>

Limits on anomalous quartic $\gamma\gamma ZZ$ gauge couplings



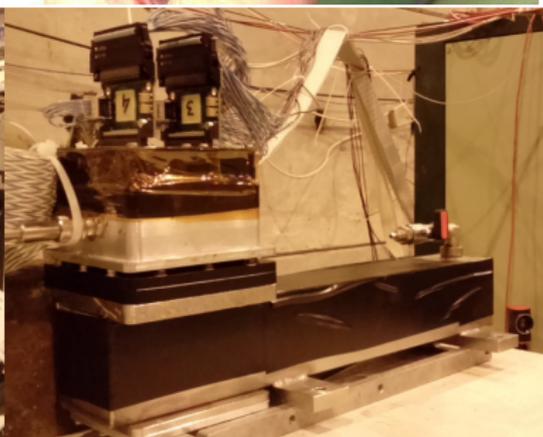
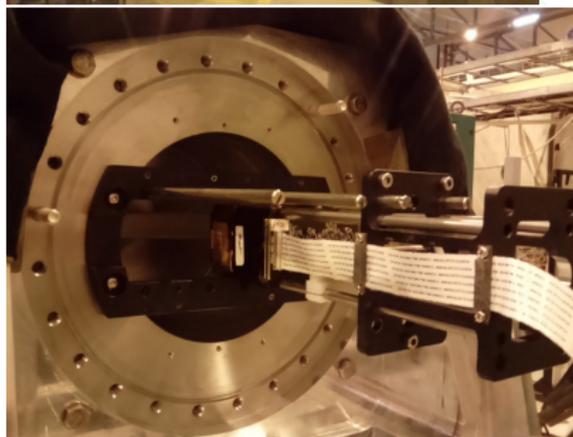
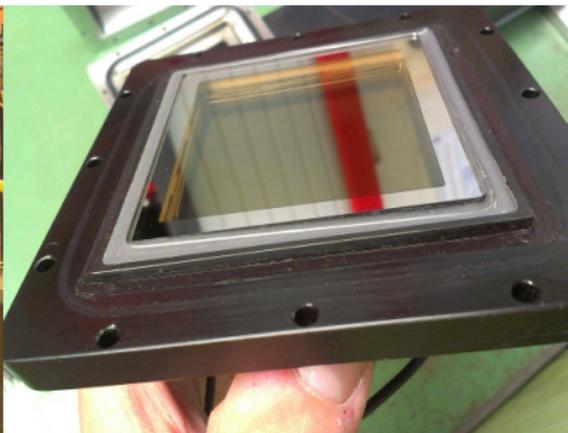
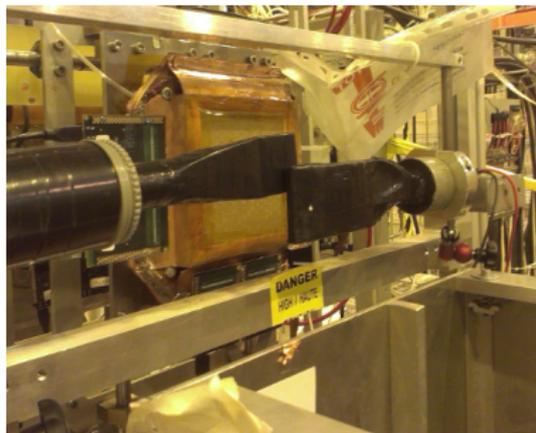
Reference: CMS-AN-2015/337 (FSQ-16-001) L. Forthomme

Cut	Background	$(0, 10^{-5} \text{ GeV}^{-2})$	$(5 \times 10^{-6} \text{ GeV}^{-2}, 0)$
$p_T > 100 \text{ GeV}$	1.15 ± 0.53	3.06 ± 0.13	0.83 ± 0.04
$p_T > 150 \text{ GeV}$	0.032 ± 0.015	3.053 ± 0.126	0.827 ± 0.035

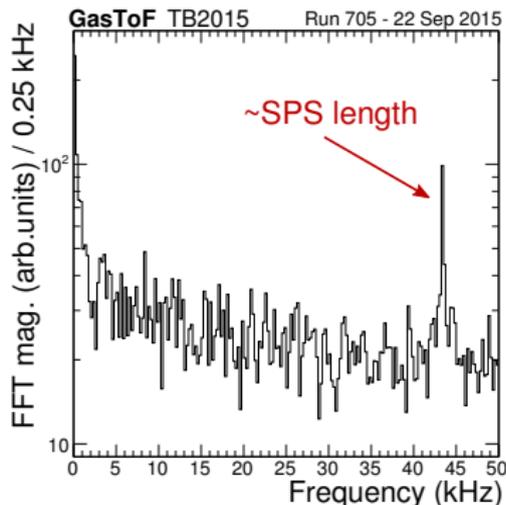
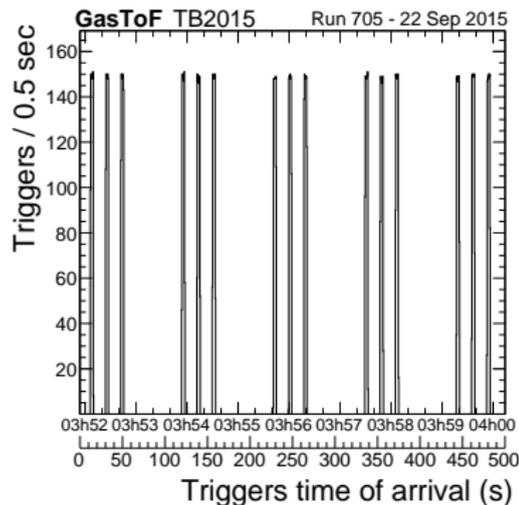


1-dimensional limits at 95% C.L. on anomalous $\gamma\gamma ZZ$ coupling :

Λ_{cutoff}	Form factor	
	500 GeV	∞ (no FF)
a_0^Z / Λ^2	$< 5 \times 10^{-2} \text{ GeV}^{-2}$	$< 5 \times 10^{-6} \text{ GeV}^{-2}$
a_C^Z / Λ^2	$< 5 \times 10^{-2} \text{ GeV}^{-2}$	$< 5 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$



Beam structure as observed by GasToF :



Data analysis still ongoing (1 PhD student working on GasToF), (hopefully) some preliminary results available at a short pace