



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



# Ricerca di decadimenti rari del bosone di Higgs in un mesone $J/\psi$ , $\psi(2S)$ o $\Upsilon(nS)$ e un fotone

IFAE 2023

**R. Ardino**<sup>1,2,3</sup> per la collaborazione CMS

<sup>1</sup>Università degli Studi di Padova

<sup>2</sup>INFN Sezione di Padova

<sup>3</sup>CERN, Geneva, Switzerland

14 Aprile, 2023

# Introduzione

# Introduzione: accoppiamento $Hc\bar{c}$

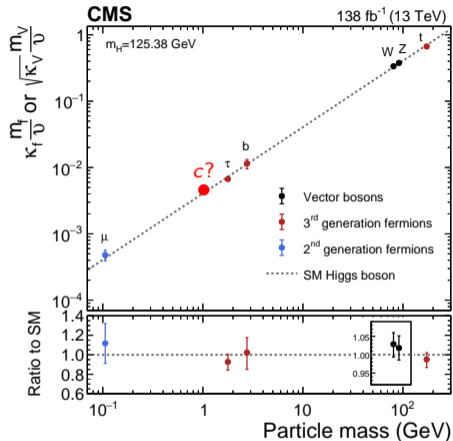


Figure: Modificatori di accoppiamento dell'Higgs a fermioni/bosoni di gauge, in funzione della massa del fermione/bosone di gauge [1]

## Coupling di Yukawa tra Higgs e fermioni nel Standard Model

$$\mathcal{L}_f = - \underbrace{\frac{y_f v}{\sqrt{2}} \cdot \bar{\psi}\psi}_{\text{Termine di massa}} - \underbrace{\frac{y_f}{\sqrt{2}} \cdot h\bar{\psi}\psi}_{\text{Termine di accoppiamento}}$$

## Misure di CMS e ATLAS degli accoppiamenti con l'Higgs:

- Accoppiamenti alla terza generazione di fermioni misurati e consistenti con lo SM
- **Focus sugli accoppiamenti con la seconda generazione**
- Discrepanze?  $\Rightarrow$  Fisica oltre lo SM e informazioni sul meccanismo dietro la gerarchia di masse dei fermioni

# Introduzione: accoppiamento $Hc\bar{c}$

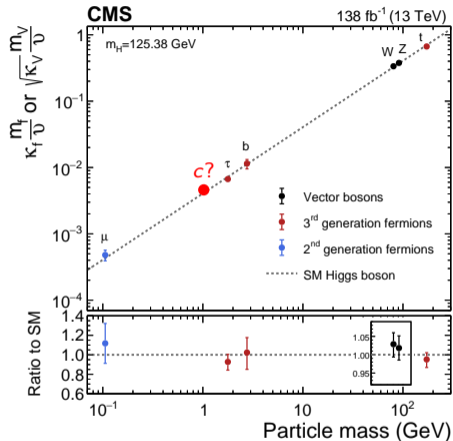


Figure: Modificatori di accoppiamento dell'Higgs a fermioni/bosoni di gauge, in funzione della massa del fermione/bosone di gauge [1]

## Coupling di Yukawa tra Higgs e fermioni nel Standard Model

$$\mathcal{L}_f = - \underbrace{\frac{y_f v}{\sqrt{2}} \cdot \bar{\psi}\psi}_{\text{Termine di massa}} - \underbrace{\frac{y_f}{\sqrt{2}} \cdot h\bar{\psi}\psi}_{\text{Termine di accoppiamento}}$$

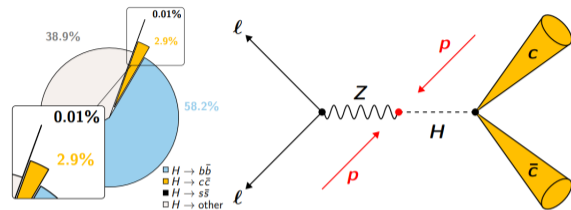
## Misure di CMS e ATLAS degli accoppiamenti con l'Higgs:

- Accoppiamenti alla terza generazione di fermioni misurati e consistenti con lo SM
- **Focus sugli accoppiamenti con la seconda generazione**
- Discrepanze?  $\Rightarrow$  Fisica oltre lo SM e informazioni sul meccanismo dietro la gerarchia di masse dei fermioni

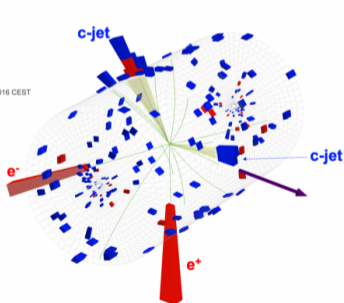
## Sonde per l'accoppiamento $H\bar{c}c$ :

- 1  $H \rightarrow \bar{c}c$ : "frequente", ma alto background e richiede charm-jet tagging
- 2  $H \rightarrow \Psi(nS)\gamma$ : decadimento estremamente raro ma molto "pulito"

# Misura dell'accoppiamento $H\bar{c}c$ : $H \rightarrow \bar{c}c$



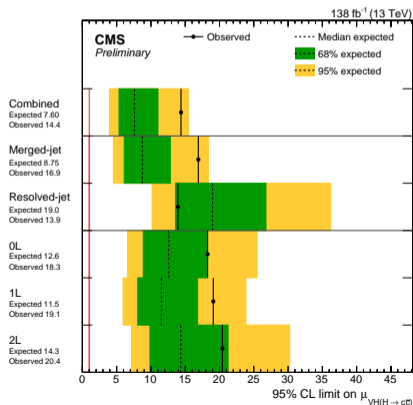
CMS Experiment at LHC, CERN  
 Data recorded: Tue May 31 11:26:24 2016 CEST  
 Run/Event: 274250 / 1058807020  
 Lumi section: 543  
 OrbitCrossing: 142305803 / 593



## Decadimenti inclusivi $H \rightarrow \bar{c}c$

- ✓ Frazione di decadimento  $H \rightarrow \bar{c}c$ : 2.9%!
- ✗ Background più grandi e charm-tagging

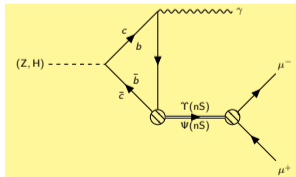
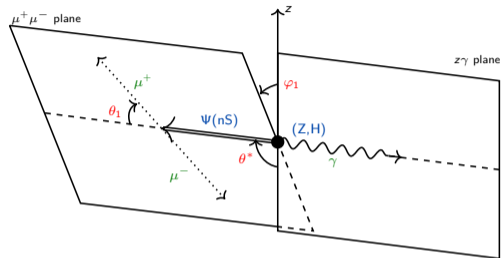
## Canale principale considerato $pp \rightarrow VH(H \rightarrow \bar{c}c)$ [2]



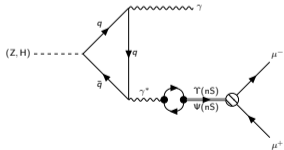
# Misura dell'accoppiamento $H\bar{c}c$ : $H \rightarrow \Psi(nS)\gamma$

Decadimento estremamente raro dell'Higgs (e della Z):

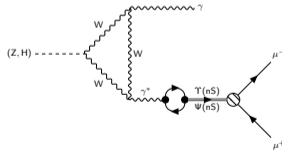
- Predetto dallo SM, processi diretto+indiretto
- **Canale della Z benchmark per la predizione sul Br**
- $\mathcal{B}(H \rightarrow \Psi(nS)\gamma) \sim 10^{-6}$ ,  $\mathcal{B}(Z \rightarrow \Psi(nS)\gamma) \sim 10^{-8}$  [3]



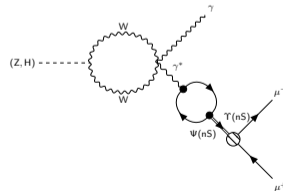
(a) Processo diretto con  $c/b$  loop



(b) Processo indiretto con  $qqq$



(c) Processo indiretto con  $WWW$

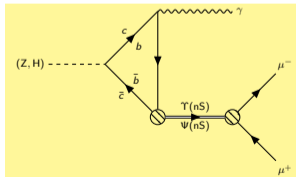
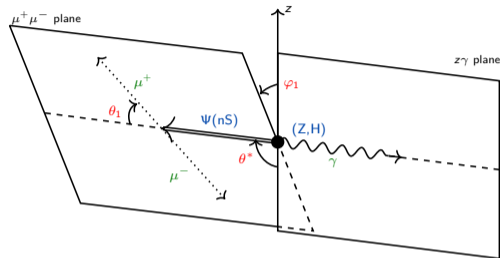


(d) Processo indiretto con  $WW$

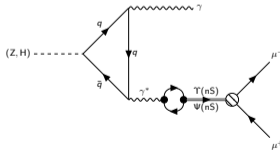
# Misura dell'accoppiamento $H\bar{c}c$ : $H \rightarrow \Psi(nS)\gamma$

## Decadimento estremamente raro dell'Higgs (e della Z):

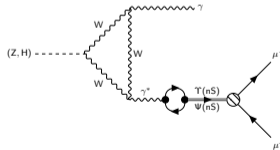
- Predetto dallo SM, processi diretto+indiretto
- **Canale della Z benchmark per la predizione sul Br**
- $\mathcal{B}(H \rightarrow \Psi(nS)\gamma) \sim 10^{-6}$ ,  $\mathcal{B}(Z \rightarrow \Psi(nS)\gamma) \sim 10^{-8}$  [3]
- $(Z, H) \rightarrow \Psi(nS)\gamma$ : loop di **c quark**
  - $\Rightarrow$  sonda per l'accoppiamento  $H\bar{c}c$
- $(Z, H) \rightarrow \Upsilon(nS)\gamma$ : loop di **b quark**
  - Info su parte reale e immaginaria dell'accoppiamento  $H\bar{b}b$



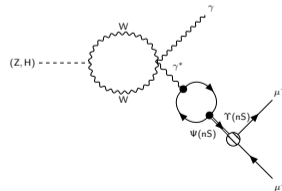
(a) Processo diretto con c/b loop



(b) Processo indiretto con qq gamma



(c) Processo indiretto con WWWW

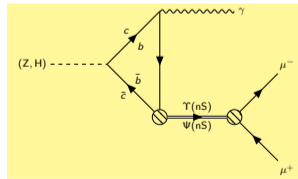
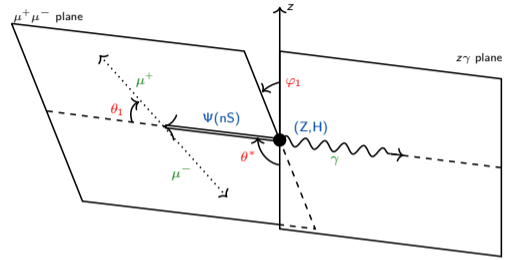


(d) Processo indiretto con WW

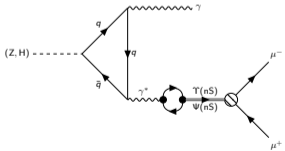
# Misura dell'accoppiamento $H\bar{c}c$ : $H \rightarrow \Psi(nS)\gamma$

## Decadimento estremamente raro dell'Higgs (e della Z):

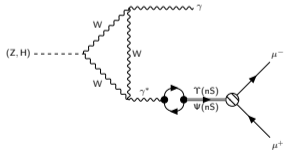
- Predetto dallo SM, processi diretto+indiretto
- **Canale della Z benchmark per la predizione sul Br**
- $\mathcal{B}(H \rightarrow \Psi(nS)\gamma) \sim 10^{-6}$ ,  $\mathcal{B}(Z \rightarrow \Psi(nS)\gamma) \sim 10^{-8}$  [3]
- $(Z, H) \rightarrow \Psi(nS)\gamma$ : loop di **c quark**
  - $\Rightarrow$  sonda per l'accoppiamento  $H\bar{c}c$
- $(Z, H) \rightarrow \Upsilon(nS)\gamma$ : loop di **b quark**
  - Info su parte reale e immaginaria dell'accoppiamento  $H\bar{b}b$
- Mesone osservato dal decadimento in una coppia  $\mu$
- **Topologia "back-to-back"** (coppia di  $\mu$  opposta a  $\gamma$ )



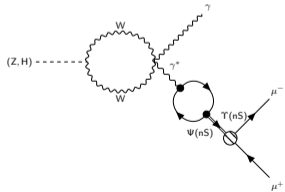
(a) Processo diretto con c/b loop



(b) Processo indiretto con qq̄



(c) Processo indiretto con WWW

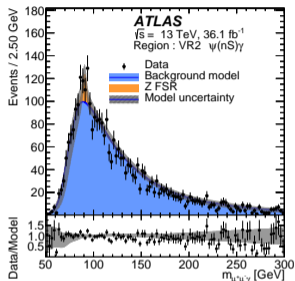


(d) Processo indiretto con WW



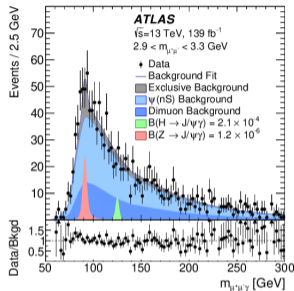
# Risultati pubblici fino a ora (in aggiornamento!)

## ATLAS [7]



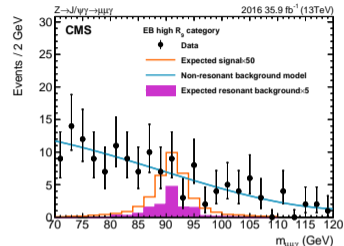
Branching fraction limit (95% CL)	Expected	Observed
$\mathcal{B}(H \rightarrow J/\psi \gamma) [10^{-4}]$	$3.0^{+1.4}_{-0.8}$	3.5
$\mathcal{B}(H \rightarrow \psi(2S) \gamma) [10^{-4}]$	$15.6^{+7.7}_{-4.4}$	19.8
$\mathcal{B}(Z \rightarrow J/\psi \gamma) [10^{-6}]$	$1.1^{+0.5}_{-0.3}$	2.3
$\mathcal{B}(Z \rightarrow \psi(2S) \gamma) [10^{-6}]$	$6.0^{+2.7}_{-1.7}$	4.5
$\mathcal{B}(H \rightarrow \Upsilon(1S) \gamma) [10^{-4}]$	$5.0^{+2.4}_{-1.4}$	4.9
$\mathcal{B}(H \rightarrow \Upsilon(2S) \gamma) [10^{-4}]$	$6.2^{+3.0}_{-1.7}$	5.9
$\mathcal{B}(H \rightarrow \Upsilon(3S) \gamma) [10^{-4}]$	$5.0^{+2.5}_{-1.4}$	5.7
$\mathcal{B}(Z \rightarrow \Upsilon(1S) \gamma) [10^{-6}]$	$2.8^{+1.2}_{-0.8}$	2.8
$\mathcal{B}(Z \rightarrow \Upsilon(2S) \gamma) [10^{-6}]$	$3.8^{+1.6}_{-1.1}$	1.7
$\mathcal{B}(Z \rightarrow \Upsilon(3S) \gamma) [10^{-6}]$	$3.0^{+1.3}_{-0.8}$	4.8

## ATLAS [8]



Decay channel	95% CL, upper limits				$\sigma \times \mathcal{B}$	
	Branching fraction		Branching fraction		Higgs boson [fb]	Z boson [fb]
	Expected	Observed	Expected	Observed	Observed	Observed
$J/\psi \gamma$	$1.9^{+0.8}_{-0.5}$	2.1	$0.6^{+0.3}_{-0.2}$	1.2	12	71
$\psi(2S) \gamma$	$8.5^{+3.8}_{-2.4}$	10.9	$2.9^{+1.3}_{-0.8}$	2.3	61	135
$\Upsilon(1S) \gamma$	$2.8^{+1.3}_{-0.8}$	2.6	$1.5^{+0.6}_{-0.4}$	1.0	14	59
$\Upsilon(2S) \gamma$	$3.5^{+1.6}_{-1.0}$	4.4	$2.0^{+0.8}_{-0.6}$	1.2	24	71
$\Upsilon(3S) \gamma$	$3.1^{+1.4}_{-0.9}$	3.5	$1.9^{+0.8}_{-0.5}$	2.3	19	135

## CMS [9]



Channel	Polarization	$\sigma$ [fb] at 95% CL	$\mathcal{B}(Z(H) \rightarrow J/\psi \gamma)$ at 95% CL	$\frac{\mathcal{B}(Z(H) \rightarrow J/\psi \gamma)}{\mathcal{B}(Z(H) \rightarrow \mu^+\mu^-)}$
$Z \rightarrow J/\psi \gamma$	Unpolarized	4.6 ( $5.3^{+2.5}_{-1.6}$ )	$1.4 (1.6^{+0.5}_{-0.3}) \times 10^{-6}$	15 (18)
	Transverse	5.0 ( $5.9^{+2.3}_{-1.6}$ )	$1.5 (1.7^{+0.7}_{-0.5}) \times 10^{-6}$	16 (19)
	Longitudinal	3.9 ( $4.6^{+2.0}_{-1.4}$ )	$1.2 (1.4^{+0.5}_{-0.4}) \times 10^{-6}$	13 (15)
$H \rightarrow J/\psi \gamma$	Transverse	2.5 ( $1.7^{+0.8}_{-0.5}$ )	$7.6 (5.2^{+2.4}_{-1.6}) \times 10^{-4}$	260 (170)

### Note:

- Analisi solo per  $Z/H \rightarrow J/\Psi \gamma$  con dati del 2016 di CMS
- **Lavori in corso con il dataset di Run 2 di CMS**
- Analisi per  $Z/H \rightarrow \Psi(nS) \gamma$  verso l'approvazione
- Analisi per  $Z/H \rightarrow \Upsilon(nS) \gamma$  in corso

**Analisi di CMS  
con i dati del  
2016**

## Strategia di analisi per $(Z/H) \rightarrow Q\gamma$

Canale	$N_{\text{ev}} (H)$	$N_{\text{ev}} (Z)$
$\rightarrow J/\Psi\gamma$	$\sim 1.4$	$\sim 44$
$\rightarrow \Psi(2S)\gamma$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 3.1$
$\rightarrow \Upsilon(1S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow \Upsilon(2S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow \Upsilon(3S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$

Table: Eventi attesi per i vari canali con  $138 \text{ fb}^{-1}$ . Accettanze ed efficienze non incluse.

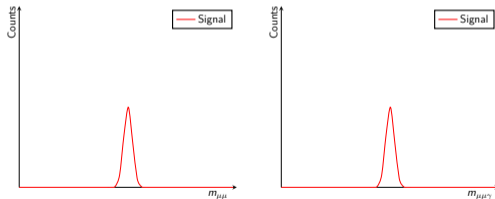
$\sim 138 \text{ fb}^{-1}$  acquisiti e certificati da CMS durante Run 2:

- Più luminosità integrata necessaria per eventuale osservazione
- **Obiettivo per High-Luminosity LHC!**
- Per adesso, **limiti superiori sulla sezione d'urto**  
 $\mu = \sigma/\sigma_{\text{SM}}$

# Strategia di analisi per (Z/H) $\rightarrow$ $Q\gamma$

Canale	$N_{ev}$ (H)	$N_{ev}$ (Z)
$\rightarrow$ J/ $\Psi\gamma$	$\sim 1.4$	$\sim 44$
$\rightarrow$ $\Psi(2S)\gamma$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 3.1$
$\rightarrow$ $\Upsilon(1S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow$ $\Upsilon(2S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow$ $\Upsilon(3S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$

Table: Eventi attesi per i vari canali con  $138 \text{ fb}^{-1}$ . Accettanze ed efficienze non incluse.



$\sim 138 \text{ fb}^{-1}$  acquisiti e certificati da CMS durante Run 2:

- Più luminosità integrata necessaria per eventuale osservazione
- **Obiettivo per High-Luminosity LHC!**
- Per adesso, **limiti superiori sulla sezione d'urto**  
 $\mu = \sigma/\sigma_{SM}$

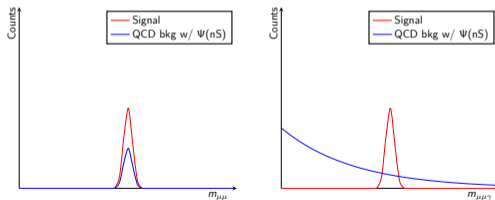
## Strategia di analisi:

- 1 Stato finale:
  - Coppia di muoni isolati
  - Fotone isolato ed energetico
- 2 Ricostruire le particelle dello stato finale . . .
- 3 . . . ricostruire le distribuzioni di massa invariante  $m_{\mu\mu}$  e  $m_{\mu\mu\gamma}$
- 4 Segnale: **2 risonanze** (Z o H;  $\Psi(nS)$  o  $\Upsilon(nS)$ )
- 5 **Il segnale atteso picca su  $m_{\mu\mu}$  e  $m_{\mu\mu\gamma}$  a differenza dei fondi di SM** (QCD con e senza mesone, Z FSR, H Dalitz)

# Strategia di analisi per (Z/H) $\rightarrow$ $Q\gamma$

Canale	$N_{ev}$ (H)	$N_{ev}$ (Z)
$\rightarrow J/\Psi\gamma$	$\sim 1.4$	$\sim 44$
$\rightarrow \Psi(2S)\gamma$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 3.1$
$\rightarrow \Upsilon(1S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow \Upsilon(2S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow \Upsilon(3S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$

Table: Eventi attesi per i vari canali con  $138 \text{ fb}^{-1}$ . Accettanze ed efficienze non incluse.



$\sim 138 \text{ fb}^{-1}$  acquisiti e certificati da CMS durante Run 2:

- Più luminosità integrata necessaria per eventuale osservazione
- **Obiettivo per High-Luminosity LHC!**
- Per adesso, **limiti superiori sulla sezione d'urto**  
 $\mu = \sigma/\sigma_{SM}$

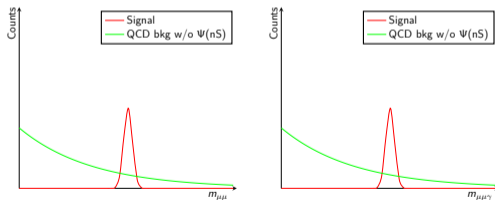
## Strategia di analisi:

- 1 Stato finale:
  - Coppia di muoni isolati
  - Fotone isolato ed energetico
- 2 Ricostruire le particelle dello stato finale . . .
- 3 . . . ricostruire le distribuzioni di massa invariante  $m_{\mu\mu}$  e  $m_{\mu\mu\gamma}$
- 4 Segnale: **2 risonanze** (Z o H;  $\Psi(nS)$  o  $\Upsilon(nS)$ )
- 5 Il segnale atteso **picca su  $m_{\mu\mu}$  e  $m_{\mu\mu\gamma}$  a differenza dei fondi di SM** (QCD con e senza mesone, Z FSR, H Dalitz)

# Strategia di analisi per (Z/H) $\rightarrow$ $Q\gamma$

Canale	$N_{ev}$ (H)	$N_{ev}$ (Z)
$\rightarrow J/\Psi\gamma$	$\sim 1.4$	$\sim 44$
$\rightarrow \Psi(2S)\gamma$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 3.1$
$\rightarrow \Upsilon(1S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow \Upsilon(2S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow \Upsilon(3S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$

Table: Eventi attesi per i vari canali con  $138 \text{ fb}^{-1}$ . Accettanze ed efficienze non incluse.



$\sim 138 \text{ fb}^{-1}$  acquisiti e certificati da CMS durante Run 2:

- Più luminosità integrata necessaria per eventuale osservazione
- **Obiettivo per High-Luminosity LHC!**
- Per adesso, **limiti superiori sulla sezione d'urto**  
 $\mu = \sigma/\sigma_{SM}$

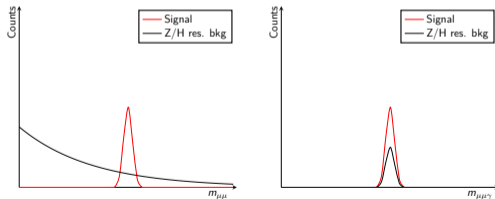
## Strategia di analisi:

- 1 Stato finale:
  - Coppia di muoni isolati
  - Fotone isolato ed energetico
- 2 Ricostruire le particelle dello stato finale . . .
- 3 . . . ricostruire le distribuzioni di massa invariante  $m_{\mu\mu}$  e  $m_{\mu\mu\gamma}$
- 4 Segnale: **2 risonanze** (Z o H;  $\Psi(nS)$  o  $\Upsilon(nS)$ )
- 5 Il segnale atteso **picca su  $m_{\mu\mu}$  e  $m_{\mu\mu\gamma}$  a differenza dei fondi di SM** (QCD con e senza mesone, Z FSR, H Dalitz)

# Strategia di analisi per (Z/H) $\rightarrow$ $Q\gamma$

Canale	$N_{ev}$ (H)	$N_{ev}$ (Z)
$\rightarrow$ J/ $\Psi\gamma$	$\sim 1.4$	$\sim 44$
$\rightarrow$ $\Psi(2S)\gamma$	$\sim 10^{-2}$	$\sim 3.1$
$\rightarrow$ $\Upsilon(1S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow$ $\Upsilon(2S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$
$\rightarrow$ $\Upsilon(3S)\gamma$	$\sim 10^{-3}$	$\sim 10^{-1}$

Table: Eventi attesi per i vari canali con  $138 \text{ fb}^{-1}$ . Accettanze ed efficienze non incluse.



$\sim 138 \text{ fb}^{-1}$  acquisiti e certificati da CMS durante Run 2:

- Più luminosità integrata necessaria per eventuale osservazione
- **Obiettivo per High-Luminosity LHC!**
- Per adesso, **limiti superiori sulla sezione d'urto**  
 $\mu = \sigma/\sigma_{SM}$

## Strategia di analisi:

- 1 Stato finale:
  - Coppia di muoni isolati
  - Fotone isolato ed energetico
- 2 Ricostruire le particelle dello stato finale . . .
- 3 . . . ricostruire le distribuzioni di massa invariante  $m_{\mu\mu}$  e  $m_{\mu\mu\gamma}$
- 4 Segnale: **2 risonanze** (Z o H;  $\Psi(nS)$  o  $\Upsilon(nS)$ )
- 5 Il segnale atteso picca su  $m_{\mu\mu}$  e  $m_{\mu\mu\gamma}$  a differenza dei fondi di SM (QCD con e senza mesone, Z FSR, H Dalitz)

# Oggetti e selezione degli eventi

## High-Level-Trigger

- Single Muon + Photon  
(Mu17\_Photon30\*)



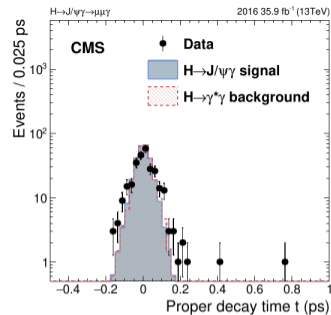
# Oggetti e selezione degli eventi

## High-Level-Trigger

- Single Muon + Photon  
(Mu17\_Photon30\*)

## Muoni

- Coppia di segno opposto
- $p_{T1,2} > 20,4$  GeV
- Accettazione geometrica
- Ricostruzione vertice  $\Psi(nS)$
- Prompt
- Isolati da altra attività adronica



# Oggetti e selezione degli eventi

## High-Level-Trigger

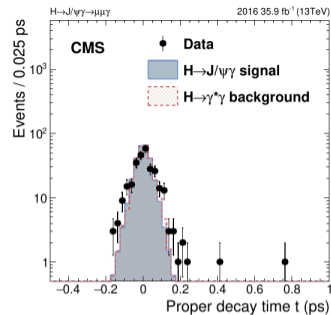
- Single Muon + Photon  
(Mu17\_Photon30\*)

## Muoni

- Coppia di segno opposto
- $p_{T1,2} > 20,4$  GeV
- Accettazione geometrica
- Ricostruzione vertice  $\Psi(nS)$
- Prompt
- Isolati da altra attività adronica

## Fotone

- $\geq 1$  fotone nell'evento
- $E_T > 33$  GeV
- Accettazione geometrica
- Isolato da altra attività adronica



# Oggetti e selezione degli eventi

## High-Level-Trigger

- Single Muon + Photon (Mu17\_Photon30\*)

## Muoni

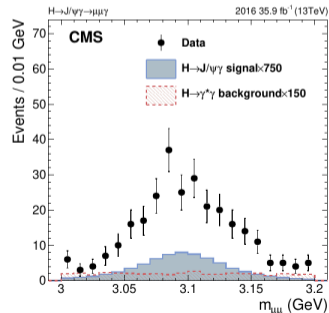
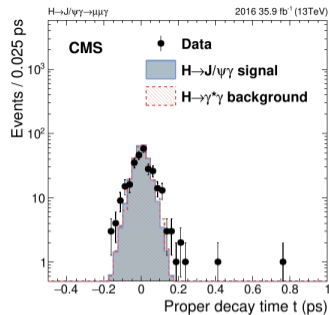
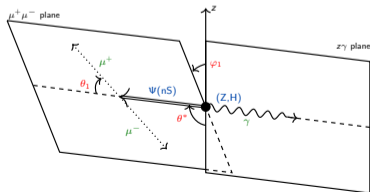
- Coppia di segno opposto
- $p_{T1,2} > 20, 4$  GeV
- Accettazione geometrica
- Ricostruzione vertice  $\Psi(nS)$
- Prompt
- Isolati da altra attività adronica

## Fotone

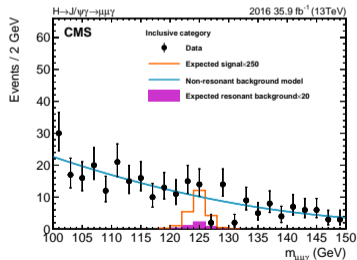
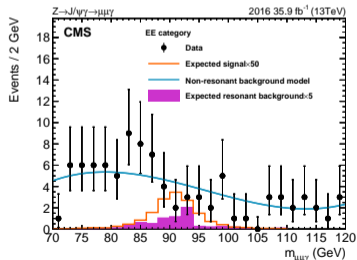
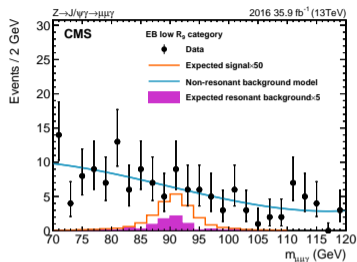
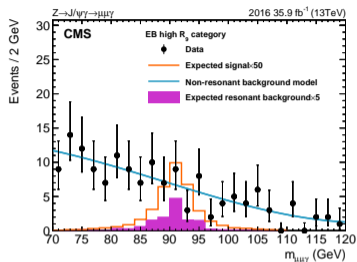
- $\geq 1$  fotone nell'evento
- $E_T > 33$  GeV
- Accettazione geometrica
- Isolato da altra attività adronica

## Set di ulteriori selezioni

- Topologia "back-to-back"
  - $\Delta R(\mu\mu, \gamma) > 2$
  - $\Delta\varphi(\mu\mu, \gamma) > 1.5$
- Taglio finestra di massa della J/ $\Psi$ 
  - $m_{\mu\mu} \in [3.0, 3.2]$  GeV (J/ $\Psi$ )
  - Riduce background da Z FSR e Dalitz
- ✗ Fondo risonante stimato con la simulazione (no regione di controllo)



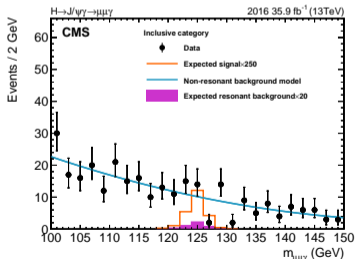
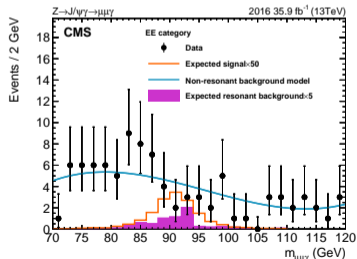
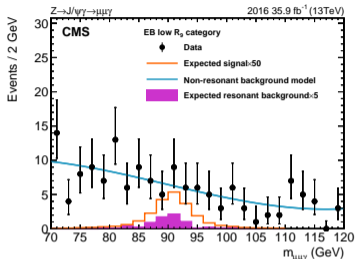
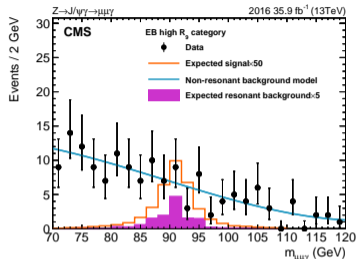
# Modellizzazione degli eventi



## Categorizzazione:

- Per la Z
  - Fotone nel barrel (EB), ECAL cluster di energia del fotone concentrato (alto  $R_9$ ) o meno (basso  $R_9$ )
  - Fotone nell'endcap (EE)
- × Higgs: Bassa statistica impedisce di categorizzare per processo di produzione

# Modellizzazione degli eventi



## Categorizzazione:

- Per la Z
  - Fotone nel barrel (EB), ECAL cluster di energia del fotone concentrato (alto  $R_9$ ) o meno (basso  $R_9$ )
  - Fotone nell'endcap (EE)
- × Higgs: Bassa statistica impedisce di categorizzare per processo di produzione

## Modellizzazione dei fondi:

- Fondo decrescente di QCD ⇒ data-driven, fit con più famiglie di funzioni
- Background risonante ⇒ Monte Carlo

## Modellizzazione del segnale:

- Dal Monte Carlo, fit con Double-Sided Crystall Ball

# Incertezze sistematiche e risultati

Source	Z $\rightarrow$ J/ $\psi$ $\gamma$ channel		H $\rightarrow$ J/ $\psi$ $\gamma$ channel	
	Signal	Resonant background	Signal	Resonant background
Integrated luminosity	2.5%			
Theoretical uncertainties				
Signal cross section (scale)	3.5%	5.0%	+4.6%	-6.7%
Signal cross section (PDF)	1.7%	5.0%	3.2%	
Branching fraction	—	5.0%	—	6.0%
Detector simulation, reconstruction				
Pileup weight	0.8%	1.8%	0.7%	1.6%
Trigger	4.0%	4.0%	3.9%	4.0%
Muon ident./Isolation	3.0%	3.4%	2.0%	2.5%
Photon identification	1.1%	1.1%	1.2%	1.2%
Electron veto	1.1%	1.1%	1.0%	1.0%
Signal model				
$m_{\mu\mu\gamma}$ scale	0.06%	—	0.1%	—
$m_{\mu\mu\gamma}$ resolution	1.0%	—	4.8%	—

## Luminosità integrata:

- Full Run 2: 2.5%  $\rightarrow$  1.6%

# Incertezze sistematiche e risultati

Source	$Z \rightarrow J/\psi\gamma$ channel		$H \rightarrow J/\psi\gamma$ channel	
	Signal	Resonant background	Signal	Resonant background
Integrated luminosity	2.5%			
Theoretical uncertainties				
Signal cross section (scale)	3.5%	5.0%	+4.6%	-6.7%
Signal cross section (PDF)	1.7%	5.0%	3.2%	
Branching fraction	—	5.0%	—	6.0%
Detector simulation, reconstruction				
Pileup weight	0.8%	1.8%	0.7%	1.6%
Trigger	4.0%	4.0%	3.9%	4.0%
Muon ident./Isolation	3.0%	3.4%	2.0%	2.5%
Photon identification	1.1%	1.1%	1.2%	1.2%
Electron veto	1.1%	1.1%	1.0%	1.0%
Signal model				
$m_{\mu\mu\gamma}$ scale	0.06%	—	0.1%	—
$m_{\mu\mu\gamma}$ resolution	1.0%	—	4.8%	—

## Luminosità integrata:

- Full Run 2: 2.5%  $\rightarrow$  1.6%

## Incertezze teoriche dominanti:

- ✗ In particolare PDF e predizione Br
- $\Rightarrow$  Entrambe possono essere ridotte in futuro

# Incertezze sistematiche e risultati

Source	$Z \rightarrow J/\psi\gamma$ channel		$H \rightarrow J/\psi\gamma$ channel	
	Signal	Resonant background	Signal	Resonant background
Integrated luminosity	2.5%			
Theoretical uncertainties				
Signal cross section (scale)	3.5%	5.0%	+4.6%	-6.7%
Signal cross section (PDF)	1.7%	5.0%	3.2%	
Branching fraction	—	5.0%	—	6.0%
Detector simulation, reconstruction				
Pileup weight	0.8%	1.8%	0.7%	1.6%
Trigger	4.0%	4.0%	3.9%	4.0%
Muon ident./Isolation	3.0%	3.4%	2.0%	2.5%
Photon identification	1.1%	1.1%	1.2%	1.2%
Electron veto	1.1%	1.1%	1.0%	1.0%
Signal model				
$m_{\mu\mu\gamma}$ scale	0.06%	—	0.1%	—
$m_{\mu\mu\gamma}$ resolution	1.0%	—	4.8%	—

## Luminosità integrata:

- Full Run 2: 2.5%  $\rightarrow$  1.6%

## Incertezze teoriche dominanti:

- × In particolare PDF e predizione Br
- $\Rightarrow$  Entrambe possono essere ridotte in futuro

## Incertezze su simulazione e ricostruzione:

- × Efficienza di trigger dominante
- Bassa statistica del dataset ausiliario per la determinazione dell'incertezza



# Incertezze sistematiche e risultati

Source	Z $\rightarrow$ J/ $\psi$ $\gamma$ channel		H $\rightarrow$ J/ $\psi$ $\gamma$ channel	
	Signal	Resonant background	Signal	Resonant background
Integrated luminosity	2.5%			
Theoretical uncertainties				
Signal cross section (scale)	3.5%	5.0%	+4.6%	-6.7%
Signal cross section (PDF)	1.7%	5.0%	3.2%	
Branching fraction	—	5.0%	—	6.0%
Detector simulation, reconstruction				
Pileup weight	0.8%	1.8%	0.7%	1.6%
Trigger	4.0%	4.0%	3.9%	4.0%
Muon ident./Isolation	3.0%	3.4%	2.0%	2.5%
Photon identification	1.1%	1.1%	1.2%	1.2%
Electron veto	1.1%	1.1%	1.0%	1.0%
Signal model				
$m_{\mu\mu\gamma}$ scale	0.06%	—	0.1%	—
$m_{\mu\mu\gamma}$ resolution	1.0%	—	4.8%	—

Channel	Polarization	$\sigma$ (fb) at 95% CL	$\mathcal{B}(Z(H) \rightarrow J/\psi\gamma)$ at 95% CL	$\frac{\mathcal{B}(Z(H) \rightarrow J/\psi\gamma)}{\mathcal{B}_{SM}(Z(H) \rightarrow J/\psi\gamma)}$
Z $\rightarrow$ J/ $\psi$ $\gamma$	Unpolarized			
	Transverse			
H $\rightarrow$ J/ $\psi$ $\gamma$	Longitudinal	3.9 (4.6 $^{+2.0}_{-1.4}$ )	1.2 (1.4 $^{+0.6}_{-0.4}$ ) $\times 10^{-6}$	13 (15)
	Transverse	2.5 (1.7 $^{+0.8}_{-0.5}$ )	7.6 (5.2 $^{+2.4}_{-1.6}$ ) $\times 10^{-4}$	260 (170)

## Luminosità integrata:

- Full Run 2: 2.5%  $\rightarrow$  1.6%

## Incertezze teoriche dominanti:

- × In particolare PDF e predizione Br
- $\Rightarrow$  Entrambe possono essere ridotte in futuro

## Incertezze su simulazione e ricostruzione:

- × Efficienza di trigger dominante
- Bassa statistica del dataset ausiliario per la determinazione dell'incertezza

## Limiti superiori al 95% C.L. sulla signal strenght $\sigma \times \mathcal{B}$

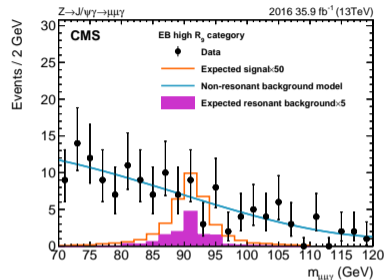
- Test statistico basato su Likelihood ratio
- Metodo CLs utilizzato con approssimazione asintotica
- Nessun eccesso/discrepanza con lo SM osservata

**Conclusione**

# Sommario e Prospettiva

## Quanto visto oggi:

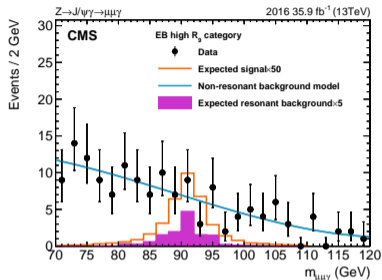
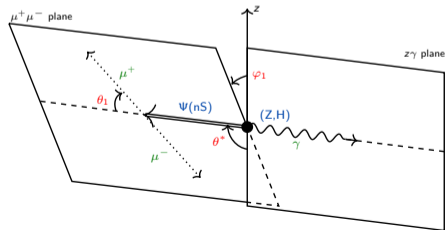
- Misura del coupling  $H\bar{c}c$  nuova frontiera e banco di prova per lo Standard Model
- Possibile misura con ricerca diretta  $H \rightarrow \bar{c}c$
- **Alternativa rara ma basso background:  $H \rightarrow \Psi(nS)\gamma$**
- $Z \rightarrow \Psi(nS)\gamma$  come benchmark di validazione della predizione del Br del processo
- **Nessun eccesso e/o discrepanze con lo SM nei risultati pubblici**



# Sommario e Prospettiva

## Quanto visto oggi:

- Misura del coupling  $H\bar{c}c$  nuova frontiera e banco di prova per lo Standard Model
- Possibile misura con ricerca diretta  $H \rightarrow \bar{c}c$
- **Alternativa rara ma basso background:  $H \rightarrow \Psi(nS)\gamma$**
- $Z \rightarrow \Psi(nS)\gamma$  come benchmark di validazione della predizione del Br del processo
- **Nessun eccesso e/o discrepanze con lo SM nei risultati pubblici**



## Prospettive per l'analisi con i dati del Run 2:

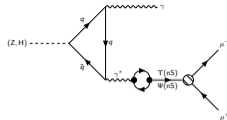
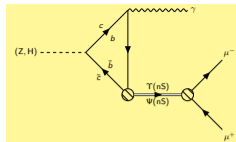
- **Simulazione segnale con Madgraph5:** corrette correlazioni di spin
- Nessun reweight su distribuzioni angolari attese necessario
- **Categorizzazione su modo di produzione dell'H**
- Selezioni ottimizzate
- **Regione di Controllo per background risonanti**
- Sistematiche ridotte e analisi statistica migliorata

**Back-Up  
slides**

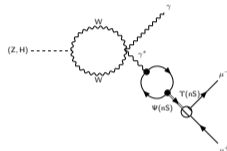
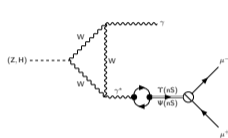
# Decadimenti rari dell'Higgs (e della Z)

## Decadimenti rari dell'Higgs (e Z) per sondare lo SM:

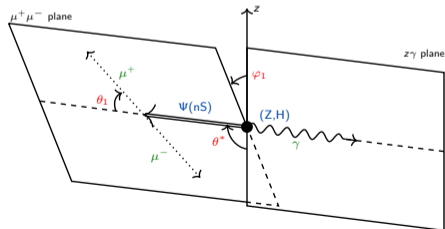
- Decadimenti rari  $(Z, H) \rightarrow (J/\Psi, \Psi(2S), \Upsilon(nS))\gamma$  predetti
- Non ancora osservati [3]
  - $\mathcal{B}(H \rightarrow \Psi(nS)\gamma) = (3.01_{-0.15}^{+0.15}, 1.03_{-0.06}^{+0.06}) \times 10^{-6}$
  - $\mathcal{B}(Z \rightarrow \Psi(nS)\gamma) = (8.96_{-1.38}^{+1.51}, 4.83_{-0.91}^{+1.02}) \times 10^{-8}$
  - $\mathcal{B}(H \rightarrow \Upsilon(nS)\gamma) = (9.97_{-3.03}^{+4.04}, 2.62_{-0.91}^{+1.39}, 1.87_{-0.69}^{+1.05}) \times 10^{-9}$
  - $\mathcal{B}(Z \rightarrow \Upsilon(nS)\gamma) = (4.80_{-0.25}^{+0.26}, 2.44_{-0.13}^{+0.14}, 1.88_{-0.10}^{+0.11}) \times 10^{-9}$
- $(Z, H) \rightarrow \Psi(nS)\gamma$  anche attraverso **c quark loop**
  - Permette misura dell'accoppiamento  $H\bar{c}c$
  - Canale della Z benchmark per calcoli teorici
- $(Z, H) \rightarrow \Upsilon(nS)\gamma$  anche attraverso **b quark loop**
  - Info su parte reale e immaginaria dell'accoppiamento  $H\bar{b}b$
- Mesone osservato dal successivo decadimento in coppia di  $\mu$ 
  - $\mathcal{B}(J/\Psi \rightarrow \mu\mu) = (5.961 \pm 0.033) \times 10^{-2}$  [4]
  - $\mathcal{B}(\Psi(2S) \rightarrow \mu\mu) = (8.0 \pm 0.6) \times 10^{-3}$  [5]
  - $\mathcal{B}(\Upsilon(nS) \rightarrow \mu\mu) = (2.48_{-0.05}^{+0.05}, 1.93_{-0.17}^{+0.17}, 2.18_{-0.21}^{+0.21}) \times 10^{-2}$  [6]
- Processo molto "pulito", bassi background di SM



(a) Processo diretto con c/b loop (b) Processo indiretto con qqq



(c) Processo indiretto con WWW (d) Processo indiretto con WW



# Oggetti e selezione degli eventi

## HLT Trigger

- Single Muon + Photon (Mu17\_Photon30\*)

## Muons

- $p_{T1,2} > 20, 4 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.4$
- $|d_{xy}| < 0.5 \text{ cm}, |d|_z < 1 \text{ cm}$
- Quality: Particle Flow medium ID
- Isolati da altra attività adronica

## Photons

- $E_T > 33 \text{ GeV}$
- $|\eta| < 2.5$
- Qualità: ID multivariato
- Isolato da altra attività adronica

## $\Psi(nS)$ vertex reconstruction

- Un candidato  $\Psi(2S)$  composto da due muoni isolati con  $p_T > 24 \text{ GeV}$

## Selection sets

- $\Delta R(\mu, \gamma) > 1$
- $\Delta R(\mu\mu, \gamma) > 2$
- $\Delta\varphi(\mu\mu, \gamma) > 1.5$
- Tagli in range di massa invariante:
  - $3.0 \leq m_{\mu\mu} \leq 3.2 \text{ GeV}$  (J/ $\Psi$ )
  - $70 \leq m_{\mu\mu\gamma} \leq 120 \text{ GeV}$  (Z)
  - $100 \leq m_{\mu\mu\gamma} \leq 150 \text{ GeV}$  (H)
- $p_T(\mu\mu)/m_{\mu\mu\gamma}$  ratio cut
- $E_T(\mu\mu)/m_{\mu\mu\gamma}$  ratio cut

## Categorization

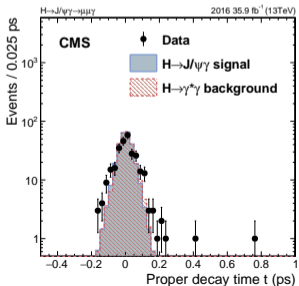
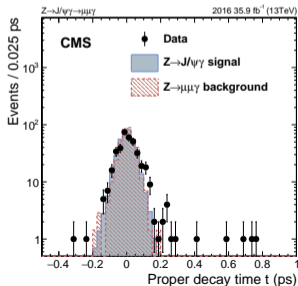
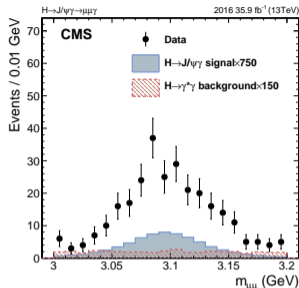
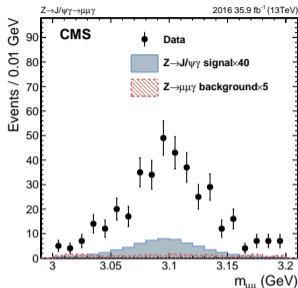
### Pseudorapidità fotone:

- Barrel:  $|\eta_\gamma| < 1.479$
- Endcap:  $|\eta_\gamma| > 1.653$

### $R_9$ :

- “Centered energy sum of  $3 \times 3$  ECAL crystals in supercluster associated with the photon, divided by the energy of the supercluster”
- Alto:  $R_9 > 0.94$  (fotoni con alta risoluzione)
- Basso:  $R_9 < 0.94$  (fotoni con risoluzione più degradata)

# Oggetti e selezione degli eventi



## Efficienza di segnale complessiva:

- Canale Z: 14% degli eventi dopo selezioni
- Canale H: 22% degli eventi dopo selezioni
- Picco sulla massa della J/ψ nei dati mostra che un vero candidato J/ψ è ricostruito e selezionato
- Eventi che vengono da produzione inclusiva di quarkonio

## Distribuzione del tempo di decadimento proprio

$$\frac{m_{\mu\mu}}{p_T^{\mu\mu}} L_{xy}$$

- Dove  $L_{xy}$  è la distanza tra
  - Vertice primario dell'evento (Z/H)
  - Vertice comune della coppia di muoni nel piano trasverso
- Suggerimento che i candidati J/ψ ricostruiti nei dati (come per il segnale) sono prodotti in modo **prompt** al punto di interazione pp