

CMS-TOTEM PROTON PRECISION SPECTROMETER

DAL PROGETTO AI PRIMI RISULTATI DI FISICA

Roberto Mulargia - roberto.mulargia@cern.ch
in rappresentanza delle collaborazioni CMS e TOTEM

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Genova

Università degli studi di Genova

INCONTRI DI FISICA DELLE ALTE ENERGIE,
Milano 4-6 Aprile 2018



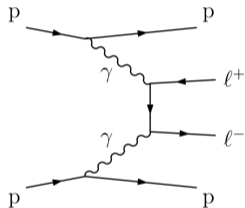
FISICA *pp* IN AVANTI AD ALTA LUMINOSITÀ

ESPERIMENTO
CT-PPS

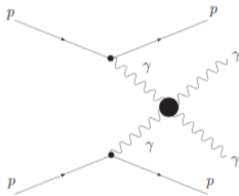
ROBERTO
MULARGIA

Misura di protoni diffusi a piccoli angoli nel punto di interazione di CMS a LHC¹:

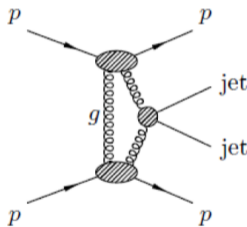
Processi di produzione centrale (semi)esclusiva: $pp \rightarrow pX(p)$



Produzione
Centrale Esclusiva
 $pp \rightarrow ppl^+l^-$



Accoppiamenti
quartici anomali
 $\gamma\gamma\gamma\gamma$ ($ZZ\gamma\gamma$)



Collider
gluone-gluone

Diagrammi per produzione di coppie di leptoni l^+l^- ma anche W^+W^- , ...

FISICA *PP* IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONI
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

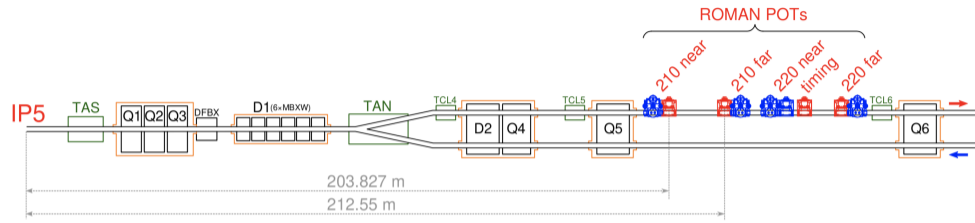
BIBLIOGRAFIA

¹CMS: Compact Muon Solenoid - LHC: Large Hadron Collider, CERN

CMS-TOTEM PRECISION PROTON SPECTROMETER

ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA



FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONE
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

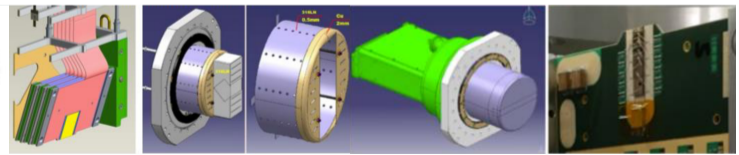
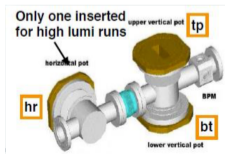
STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

BIBLIOGRAFIA

Rivelatori posizionati nelle immediate vicinanze del fascio di LHC: *Roman Pot*.
Spettrometro grazie agli stessi magneti di LHC.

Rivelatori di posizione (*3D pixel e strip*) per la misura dell'impulso;
Rivelatori di tempo (*a diamante e UFSD*) per la misura del tempo di volo.



CT-PPS: TRACCIATORE A PIXEL 3D

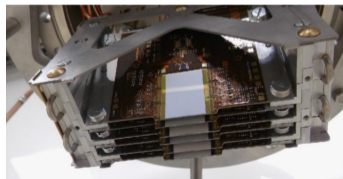
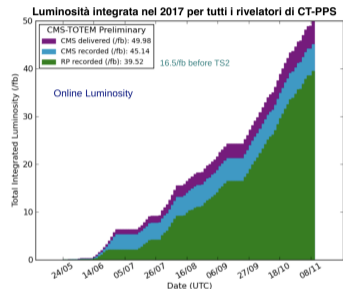
Rivelatori installati a Marzo 2017 e in presa dati dall'inizio dei run 2017.

Hardware contenuto in ogni Roman Pot:

- ▶ 6 piani di sensori 3D con chip di lettura sottostante (psi46dig ROC)
- ▶ chip collegati a circuiti flessibili (flex) a loro volta collegati a una Portcard che gestisce il fan-out dei segnali ottici
- ▶ stessa elettronica di back-end del pixel tracker di CMS di fase I

Software:

- ▶ Online: sviluppato a partire da quello dei pixel di CMS di fase I
- ▶ Offline: codice di ricostruzione completo nel software ufficiale CMSSW



ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA

FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONE
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

BIBLIOGRAFIA

CT-PPS: TRACCIATORE A PIXEL 3D

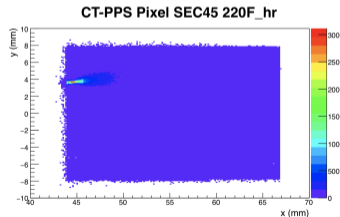
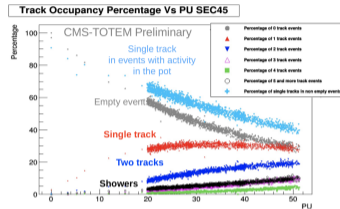
PRESTAZIONI, EFFICIENZA E RESISTENZA ALLA RADIAZIONE.

I detector hanno acquisito dati durante tutti i run in cui le Roman Pot erano inserite. Le tracce ricostruite sono disponibili per l'analisi. La risoluzione spaziale è consistente con i risultati dei test su fascio di prova.

Irraggiamento altamente non uniforme:
segnale concentrato in pochi pixel:

Ritardo temporale del segnale nei pixel più irraggiati
rispetto a quelli meno esposti:
dopo $\sim 10 fb^{-1}$ i chips più irraggiati sono sincroni
con il bunch crossing successivo

Sistema di micro spostamento del pacchetto
rivelatori sviluppato per installazioni future.



ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA

FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONE
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

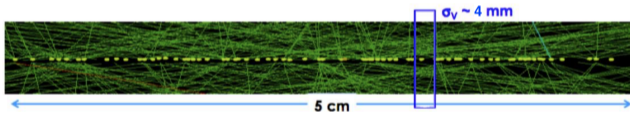
BIBLIOGRAFIA

CT-PPS: RIVELATORI DI TEMPO

MISURA DEL TEMPO DI VOLO (TOF) DEI PROTONI.

Ricostruzione della coordinata lungo il fascio tramite il tempo di volo: riduzione dell'effetto della sovrapposizione di tracce (pile-up).

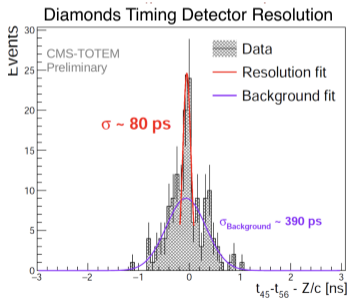
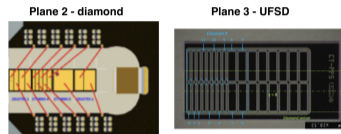
$$Z_{vertex} = c \frac{t_1 - t_2}{2}$$



Risoluzioni desiderate: $\sigma_t \simeq 20 \text{ ps} \rightarrow \sigma_z \simeq 4 \text{ mm}$

DIAMANTI : $\sim 80 \text{ ps}$ per piano (presa dati)

UFSD² : $\sim 30 \text{ ps}$ per piano (beam test)



ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA

FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONI
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

BIBLIOGRAFIA

²UFSD: Ultra-Fast Silicon Detectors

CINEMATICA DEL PROTONE

Misura della posizione d'impatto del protone e ricostruzione della cinematica del protone tramite inversione delle equazioni di trasporto.

Grandezza registrata da CT-PPS:

POSIZIONE TRACCIA : (x_{RP}, y_{RP})

Grandezze ricostruite:

POSIZIONE DEL VERTICE : (x^*, y^*) (da CMS)

ANGOLI DI SCATTERING : (Θ_x^*, Θ_y^*)

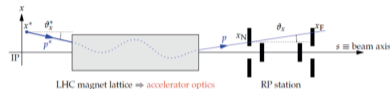
PERDITA RELATIVA DI IMPULSO : $\xi = \frac{\Delta p}{p}$

Parametri sperimentali:

L_x, L_y **LUNGHEZZA EFFICACE** : sensibilità all'angolo di scattering ($L_x \simeq 0$)

v_x, v_y **INGRANDIMENTO** : sensibilità alla posizione del vertice

D_x, D_y **DISPERSIONE** : sensibilità alla perdita di impulso ($D_y \simeq 0$)



RELAZIONI

$$x_{RP} = L_x \Theta_x^* + v_x x^* + D_x \xi$$

$$y_{RP} = L_y \Theta_y^* + v_y y^* + D_y \xi$$

ACCETTANZA

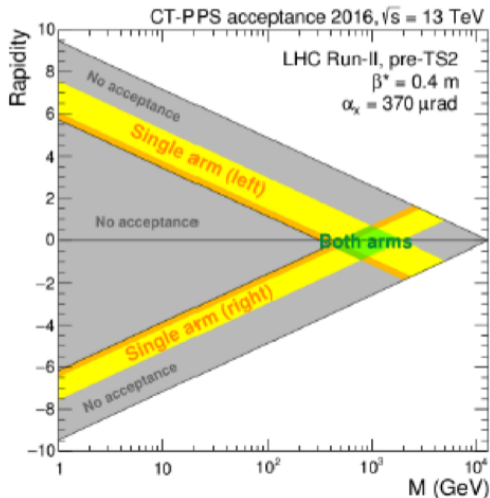
Sistema completamente vincolato dalla misura nel rivelatore centrale di CMS e dalla misura della cinematica di uno o entrambi i protoni in avanti.

M : massa, y : rapidità

Del sistema centrale prodotto, misurate dal rivelatore centrale di CMS.

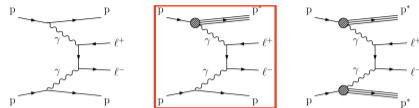
$$M = \xi_1 \xi_2 s \quad y = \frac{1}{2} \ln \frac{\xi_1}{\xi_2}$$

- ▶ Accettazione per masse tra i ~ 300 e i ~ 1900 GeV per rapidità centrali
- ▶ Taglio a basse masse dovuto alla dispersione D_x
- ▶ Taglio ad alte masse dovuto al taglio dei collimatori.

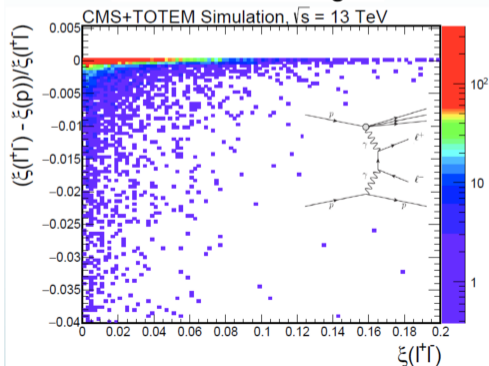


PRODUZIONE CENTRALE SEMI ESCLUSIVA DI DI-LEPTONI

Osservazione della fusione di $\gamma\gamma$ alla scala elettrodebole con uno o con entrambi i protoni identificati. Soltanto gli eventi di produzione centrale esclusiva o singola dissociazione costituiscono segnale.



Dissociazione singola



Indagine sulla correlazione cinematica tra il sistema di-leptonico, misurato dal rivelatore centrale di CMS, e i protoni. In produzione centrale esclusiva la relazione è sempre esatta:

$$\xi_{CEP}(l^+l^-) = \frac{1}{\sqrt{s}} [p_T(l^+)e^{\pm\eta(l^+)} + p_T(l^-)e^{\pm\eta(l^-)}]$$

cfr: arXiv:1803.04496 [hep-ex]

ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA

FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONE
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

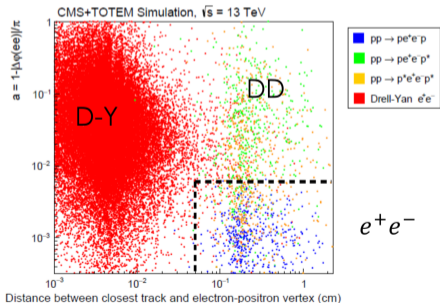
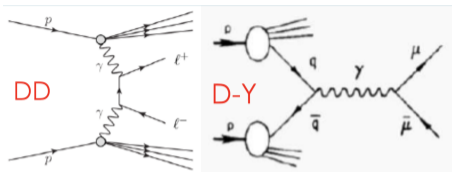
STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

BIBLIOGRAFIA

STRATEGIA NELL'ANALISI DATI

Nel caso di singolo protone ricostruito nello stato finale (*singola dissociazione*) i fondi principali sono le coppie di leptoni prodotte per eventi *Drell-Yan* (D-Y) o *doppia dissociazione* (DD), associati a un protone scorrelato.



CMS+TOTEM Simulation, $\sqrt{s} = 13$ TeV

cfr: arXiv:1803.04496 [hep-ex]

È possibile selezionare eventi di-leptonici misurati dal rivelatore centrale di CMS effettuando tagli opportuni sull'acoplanarità dei leptoni in Φ e sull'isolamento del vertice.

$$|\xi_{CEP}(l^+l^-) - \xi(p_i)| < 2\sigma$$

Si impone la compatibilità delle misure di perdita di impulso

CORRELAZIONE NEL SEGNALE

ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA

FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONE
ACCETTAZZA

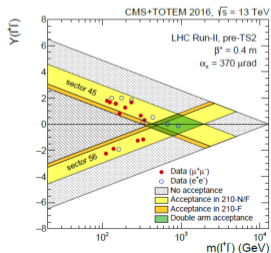
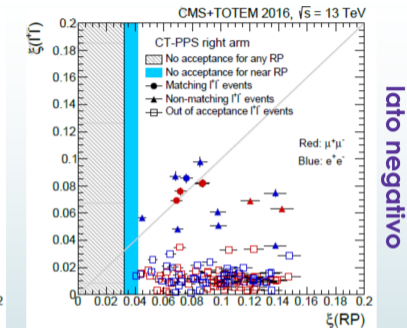
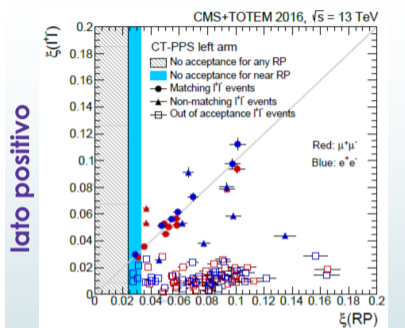
PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

STRATEGIA NELL'ANALISI

CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

BIBLIOGRAFIA



$\mu^+\mu^-$: 12 eventi selezionati.
Significatività $\simeq 4.3\sigma$

e^+e^- : 8 eventi selezionati.
Significatività $\simeq 2.6\sigma$

Significatività
combinata:
 $\simeq 5.1\sigma$

SVILUPPI FUTURI

RIVELATORI E HARDWARE

PIXEL 3D : installazione di un meccanismo di movimento del pacchetto di sensori per evitare il danno da radiazione;

TIMING : utilizzo di rivelatori a doppi piani di diamanti e sviluppo di UFSD più resistenti alla radiazione.

ANALISI DATI

$\gamma\gamma \rightarrow l^+l^-$: *pubblicato (PPS-17-001, dati 2016)*, arXiv:1803.04496 [hep-ex]

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma\gamma$: *in corso (PPS-17-002, dati 2016-17-18)*, primi limiti sull'accoppiamento $\gamma\gamma\gamma\gamma$ anomalo;

$\gamma\gamma \rightarrow WW$: *in corso (dati 2016-17-18)*;

$\gamma\gamma \rightarrow ZZ$: *da iniziare*;

$\gamma\gamma \rightarrow \gamma Z$: *in corso (dati 2016-17-18)*;

$\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$: produzione esclusiva di quark top. *in corso studi di fattibilità*;

ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA

FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONE
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

BIBLIOGRAFIA

1. CMS and TOTEM Collaborations, *Observation of proton-tagged, central (semi)exclusive production of high-mass lepton pairs in pp collisions at 13 TeV with the CMS-TOTEM precision proton spectrometer*, Submitted to the *Journal of High Energy Physics* (2018) - [LINK]
2. F. Ravera, *The CT-PPS tracking system with 3D pixel detectors*, *Journal of Instrumentation*, Volume 11, November 2016, LINK
3. TOTEM Collaboration, *Diamond detectors for the TOTEM timing upgrade*, *Journal of Instrumentation*, Volume 12, March 2017, LINK
4. CMS and TOTEM Collaborations, *CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer, CERN-LHCC-2014-021 ; TOTEM-TDR-003 ; CMS-TDR-13, 2014* - LINK
5. Cartiglia, N et al., *4-dimensional tracking with Ultra-Fast Silicon Detectors*, 2017 - LINK

BACK-UP

ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA

FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONE
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

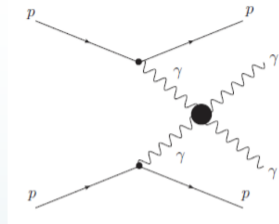
STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

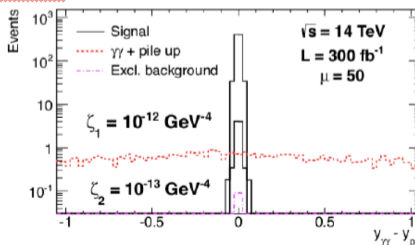
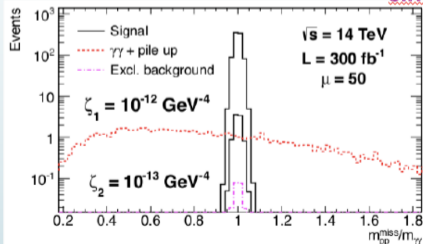
BIBLIOGRAFIA

ACCOPPIAMENTI QUARTICI ANOMALI

- Accoppiamenti $\gamma\gamma$ previsto in modelli extra-dimensions e composite Higgs
- Coppia esclusiva di fotoni nello stato finale
- Coppia di protoni taggati nello stato finale
- Background atteso ~ 0 con $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$
- Timing non necessario



Simulazione



ESPERIMENTO
CT-PPS

ROBERTO
MULARGIA

FISICA PP IN
AVANTI AD ALTA
LUMINOSITÀ

APPARATO
SPERIMENTALE

TRACCIATORE
RIVELATORI DI TEMPO

FISICA CON
PROTONI
RICOSTRUITI

CINEMATICA DEL PROTONE
ACCETTAZZA

PRODUZIONE
CENTRALE
ESCLUSIVA DI
DI-LEPTONI

STRATEGIA NELL'ANALISI
CORRELAZIONE NEL
SEGNALE

SVILUPPI FUTURI

BIBLIOGRAFIA

STIMA DEL FONDO A PARTIRE DAI DATI

- Dai dati vengono selezionati protoni di background da eventi del picco della Z
- Stima del contributo D-Y
 - conteggio degli eventi nel picco della Z in cui $|\xi(l^+l^-) - \xi_i(p_i)| < 2\sigma$
 - estrapolazione tramite MC nella regione di massa del segnale
- Stima del contributo Doppio diffrattivo
 - eventi DD simulati da LPAIR vengono sovrapposti a protoni presi dai dati e si contano il numero di eventi in cui $|\xi(l^+l^-) - \xi_i(p_i)| < 2\sigma$
- Inoltre, il numero di eventi attesi doppio diffrattivi con protone taggato e' <1

Complessivamente

Background atteso per i di-muoni: $1.49 \pm 0.07(\text{stat}) \pm 0.53(\text{syst})$ eventi

Background atteso per i di-elettroni: $2.36 \pm 0.09(\text{stat}) \pm 0.47(\text{syst})$ eventi