

Misura della massa del bosone W all'esperimento CMS

CMS-SMP-23-002

Ruben Forti

Incontri di Fisica delle Alte Energie 2025, Cagliari, 10/04/2025



UNIVERSITÀ DI PISA



European Research Council
Established by the European Commission

Il settore elettrodebole del Modello Standard (SM)

Bosone W mediatore delle interazioni deboli cariche

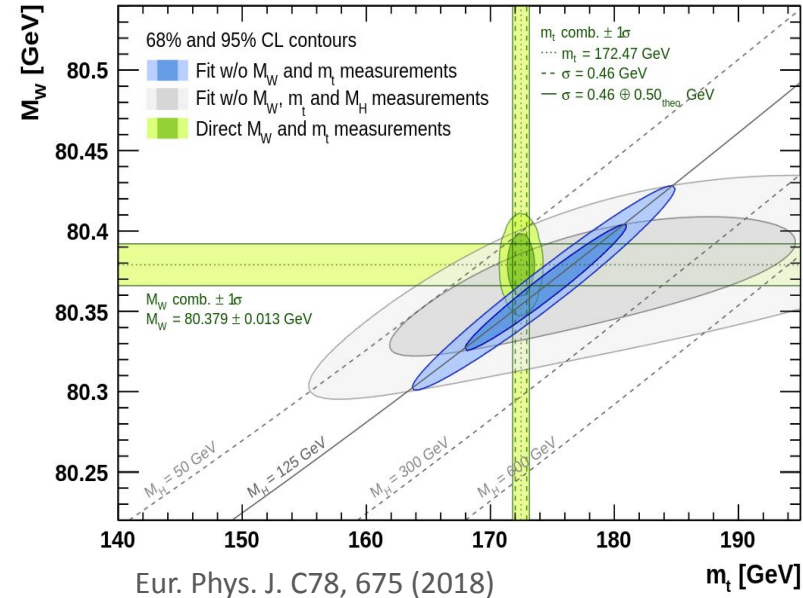
- meccanismo di Higgs → massa non nulla
- la teoria descrive la relazione di m_W con altre quantità, parametri liberi del SM

$$m_W^2 \left(1 - \frac{m_W^2}{m_Z^2} \right) = \frac{\pi \alpha(m_Z)}{\sqrt{2} G_\mu} (1 + \Delta r)$$

$$\Delta r = - \frac{3 G_F m_t^2}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{\cos^2 \theta_W}{\sin^2 \theta_W} + \frac{11 G_F m_W^2}{24\sqrt{2}\pi^2} \ln \frac{m_H^2}{m_W^2}$$



$$m_W (\text{SM fit}) = 80.353 \pm 0.006 \text{ GeV}/c^2$$



Il settore elettrodebole del Modello Standard (SM)

Bosone W mediatore delle interazioni deboli cariche

- meccanismo di Higgs → massa non nulla
- la teoria descrive la relazione di m_W con altre quantità, parametri liberi del SM

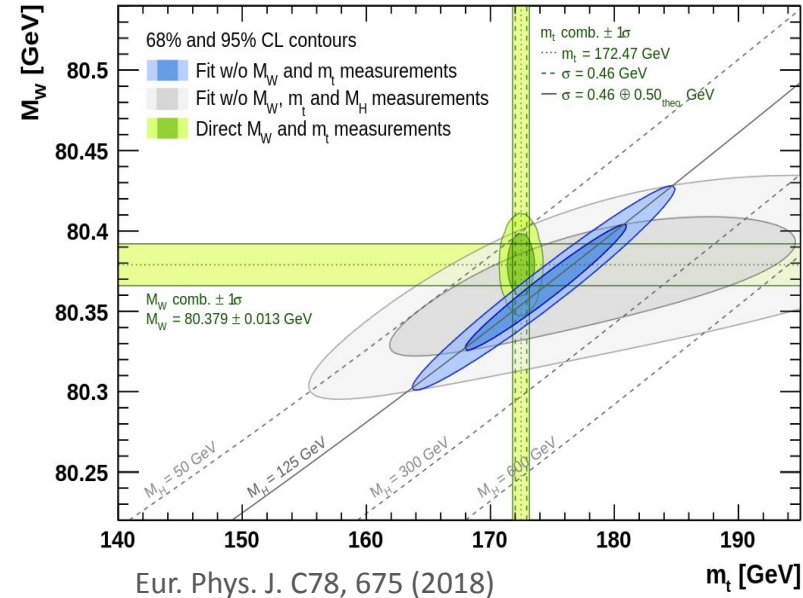
$$m_W^2 \left(1 - \frac{m_W^2}{m_Z^2} \right) = \frac{\pi \alpha(m_Z)}{\sqrt{2} G_\mu} (1 + \Delta r)$$

$$\Delta r = - \frac{3 G_F m_t^2}{8\sqrt{2}\pi^2} \frac{\cos^2 \theta_W}{\sin^2 \theta_W} + \frac{11 G_F m_W^2}{24\sqrt{2}\pi^2} \ln \frac{m_H^2}{m_W^2} + \Delta r_{other}$$



*Nuova
fisica?*

$$m_W \text{ (SM fit)} = 80.353 \pm 0.006 \text{ GeV}/c^2$$



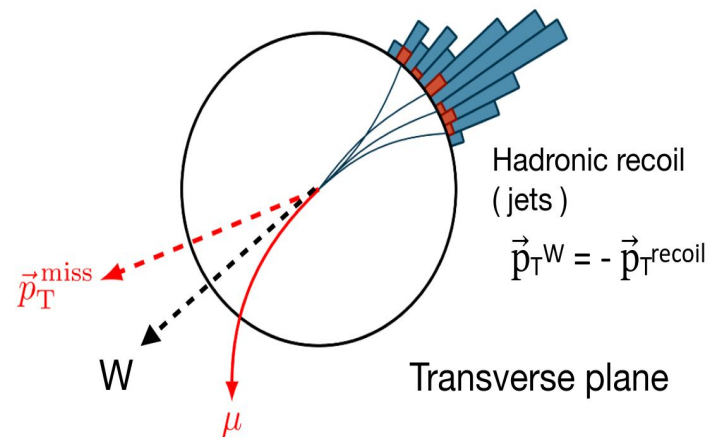
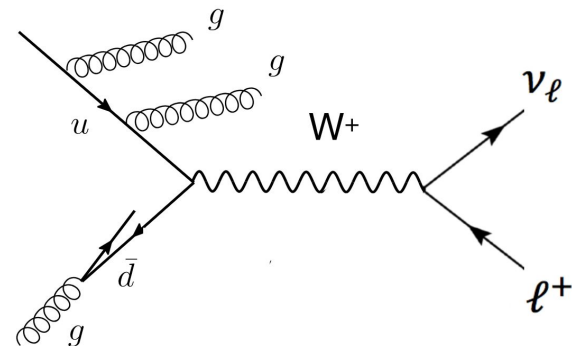
Produzione dei bosoni W ai collider adronici

Canale di decadimento leptonico (in μ):

- massa invariante dello stato finale non ricostruibile
- quantità cinematiche del leptone carico ben misurabili

Strategia: sfruttare osservabili sensibili a m_W

★ impulso trasverso $p_T^\ell = p^\ell \sin \theta$

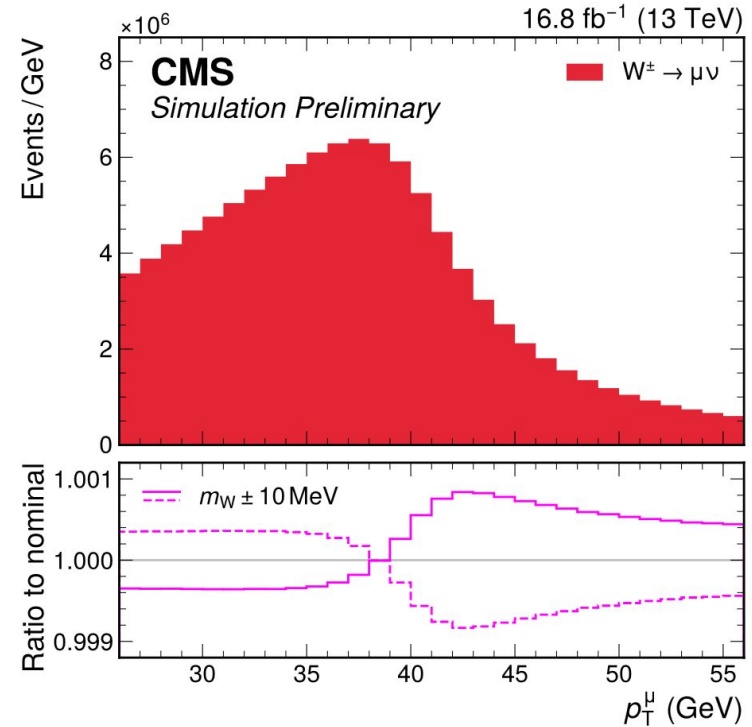


Impulso trasverso del leptone carico

- misurabile con alta accuratezza e risoluzione
- picco “jacobiano” della distribuzione a $m_W/2$
- distribuzione fortemente dipendente dalla cinematica e polarizzazione del W
 - effetti di QCD, PDFs

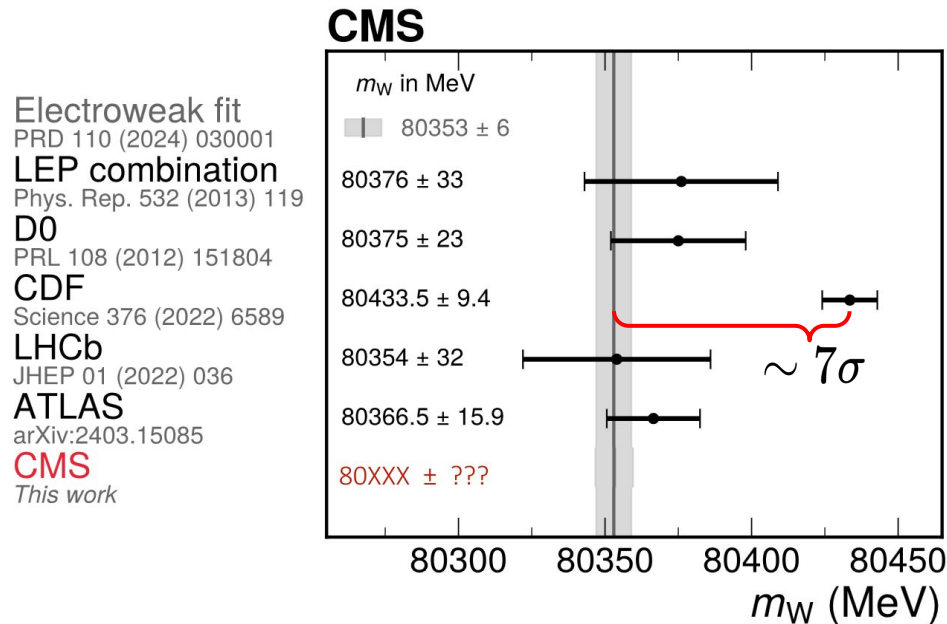
La dipendenza da m_W è racchiusa nella **shape** della distribuzione

- ❖ $\Delta m_W = 10 \text{ MeV} \Rightarrow$ variazione relativa ~ 0.001
- ❖ Necessario controllo eccezionale degli effetti che possono alterarne la forma

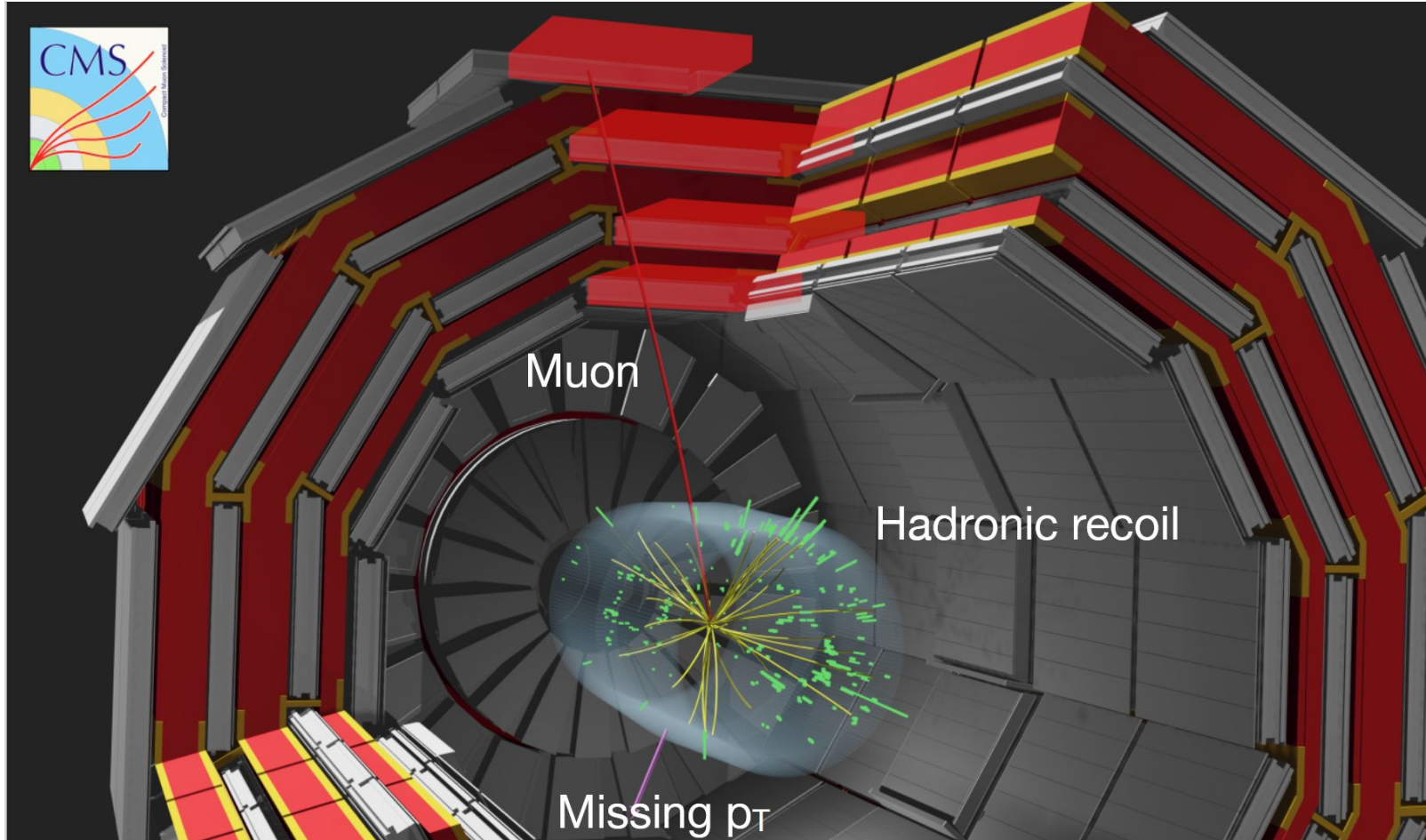


Stato dell'arte (... fino a autunno 2024)

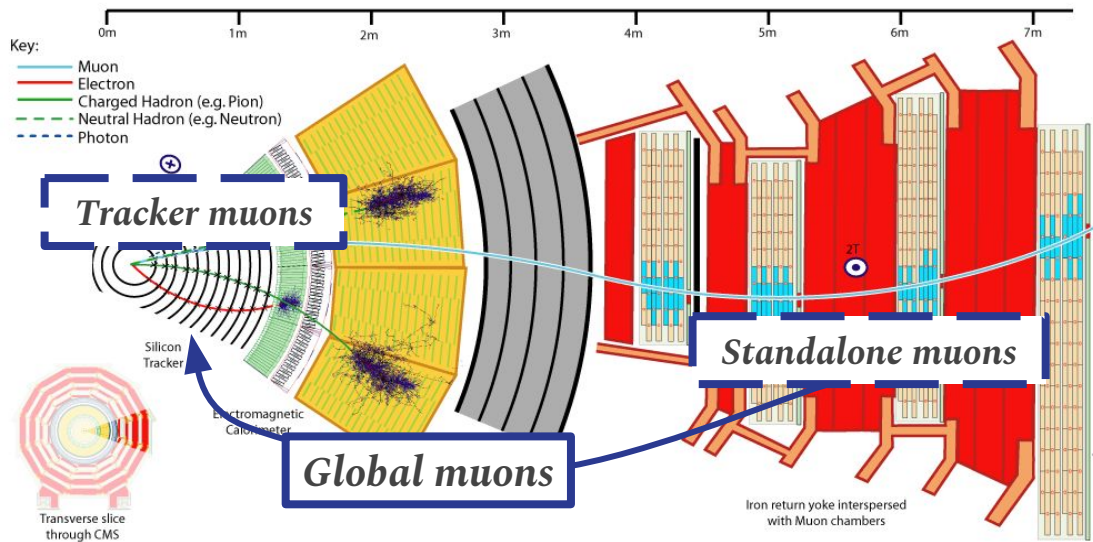
- Recente misura di CDF in tensione significativa col SM
- Media ponderata delle restanti misure: $m_W = 80369.2 \pm 13.3$ MeV



Un W nell'esperimento CMS



Ricostruzione degli eventi



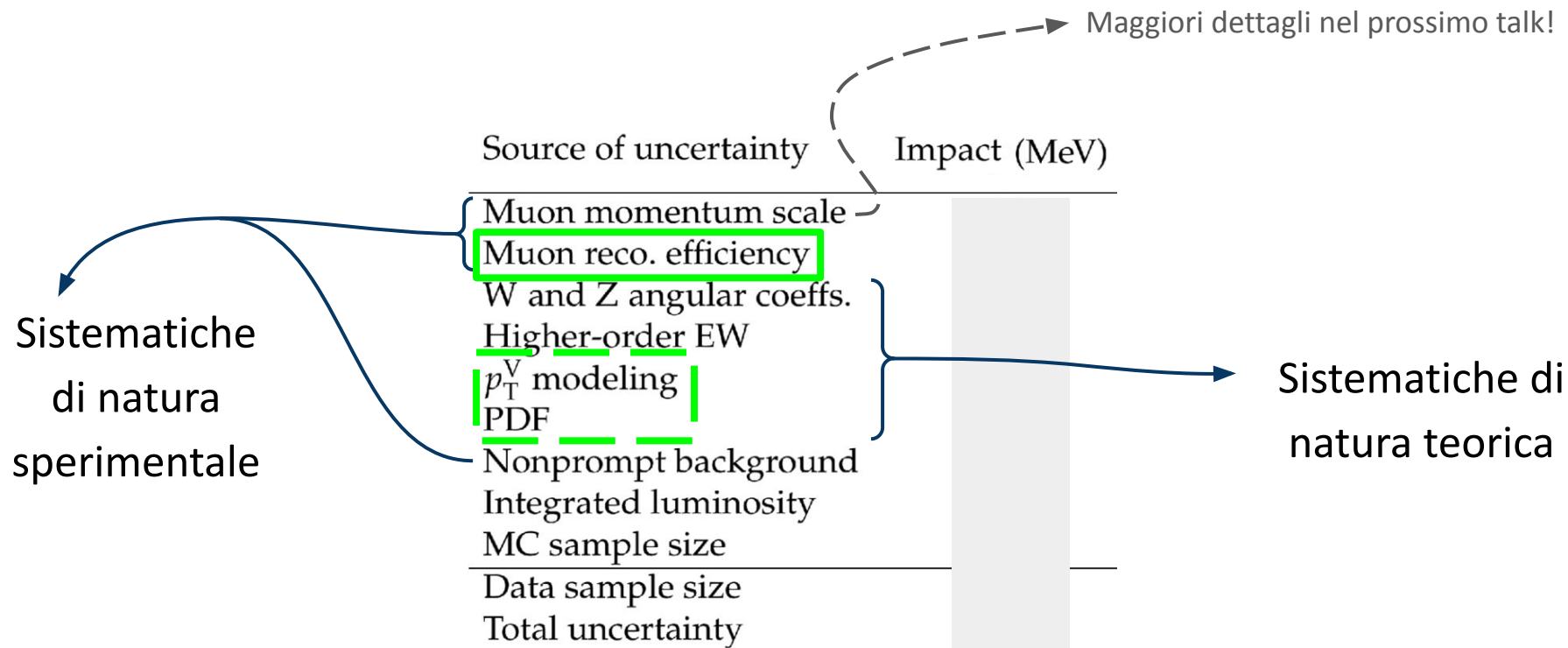
Selezione degli eventi

- Global muon
 - impulso misurato nel tracciatore
 - rivelatori esterni → alte performance di identificazione
- $m_T > 40$ GeV per soppressione del fondo



**Circa 100M di candidati
ricostruiti, ~ 87% di purezza**

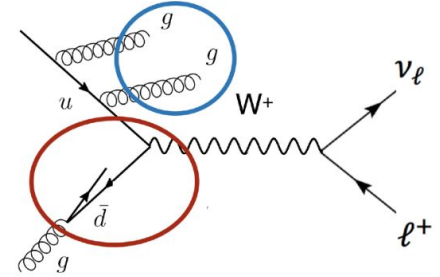
Fonti di incertezza



Sistematiche teoriche

Problema principale: **caratterizzazione della produzione del W**

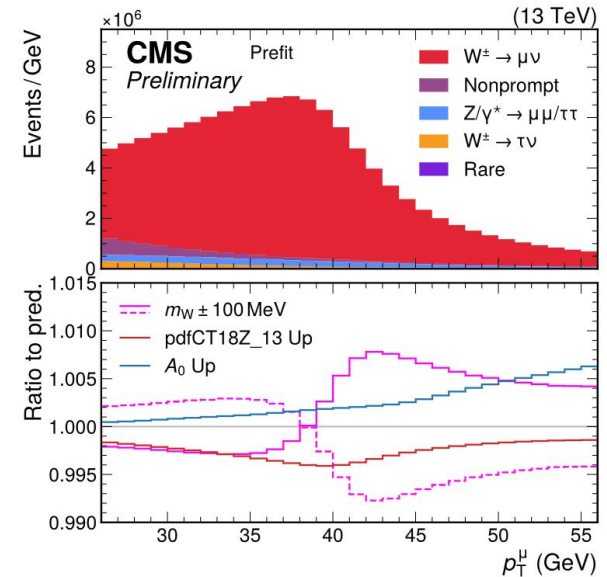
- Effetti di QCD $\rightarrow$ cinematica trasversa del W
- Dipendenza dalle PDFs $\rightarrow$ cinematica longitudinale, effetto indiretto sulla cinematica trasversa del muone



Variazioni nei modelli teorici hanno un impatto sul p_T del muone *diverso* da quello di una variazione in m_W

Strategia adottata:

- Dividere l'analisi in bin fini di η^μ (riduzione impatto delle PDF)
- Modello approfondito per p_T^ν , ma non calibrato sulla Z
- Lasciare che i dati stessi adattino il modello per p_T^W , validazione indipendente con la Z



Efficienze di ricostruzione - 1

Templates MC alla base della misura di m_W

Correzioni locali alla simulazione sono fondamentali prima del fit ai dati

⇒ Misura di ***scale factors*** Data/MC per le efficienze di ricostruzione

Tecnica del Tag&Probe su eventi $Z \rightarrow \mu\mu$

- cinque step consecutivi di selezione della *probe* : $reco * tracking * ID * trigger * isolation$
- misure effettuate in bin di $p_T^\mu - \eta^\mu - q^\mu$

Accortezze metodologiche:

- ❖ sottrazione del fondo è necessaria nei dati, fit alla massa invariante tag-probe
 - differenti configurazioni per modello di segnale e fondo
- ❖ la selezione sulla probe non deve essere influenzata da quella sulla tag
 - dipendenza non trascurabile dall'*hadronic recoil* u_T per *trigger* e *isolation*

Efficienze di ricostruzione - 2

Misura di ϵ_{Data} →

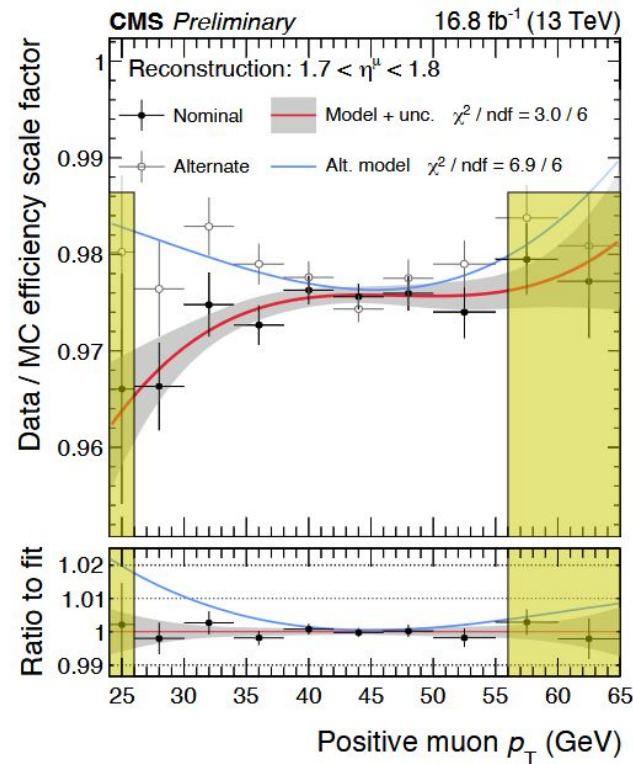
Strategy	Signal pdf	Background pdf
Nominal	$\text{MC}_{Z \rightarrow \mu\mu} \otimes \text{Gauss}$	Analytical
Alternative	Analytical	Analytical
Alt. Bkg	$\text{MC}_{Z \rightarrow \mu\mu} \otimes \text{Gauss}$	MC_{bkg}

Ci si aspetta che l'andamento degli scale factors sia regolare in funzione di p_T (e u_T)

- procedura di *smoothing* con polinomi
 - incertezza statistica: variazioni da matrice di covarianza postfit (diagonalizzata)
 - incertezza sistematica: rapporto alternativo/nominale

Più di 3000 nuisance parameters nel fit a m_W

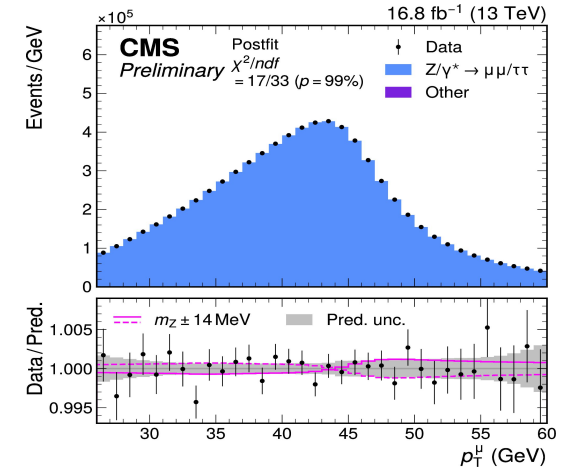
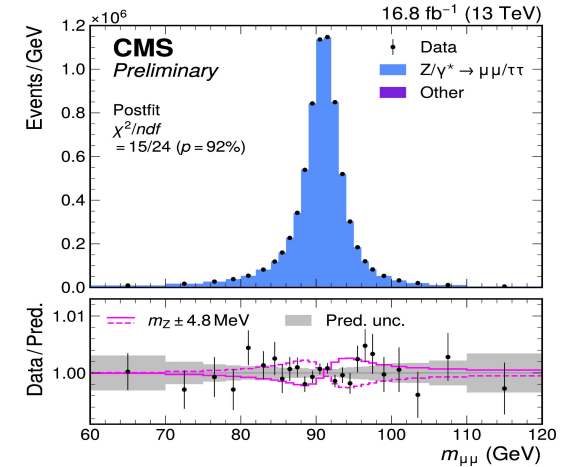
★ Impatto totale di 3 MeV



Validazione

Due misure preliminari alla estrazione di m_W
utilizzando dataset contenente eventi $Z \rightarrow \mu\mu$

- ❖ m_Z dalla massa invariante $\mu\mu$
 - validazione della calibrazione
 - Risultato: $m_Z - m_Z^{\text{PDG}} = -2.2 \pm 4.8 \text{ MeV}$
- ❖ m_Z da analisi “W-like” (un μ trattato come se fosse un ν)
 - validazione metodologia e input sperimentali e teorici
 - es. scale factors, modello per p_T^W
 - Risultato: $m_Z - m_Z^{\text{PDG}} = -6 \pm 14 \text{ MeV}$



Risultato finale

$$m_W = 80360.2 \pm 9.9 \text{ MeV}/c^2$$

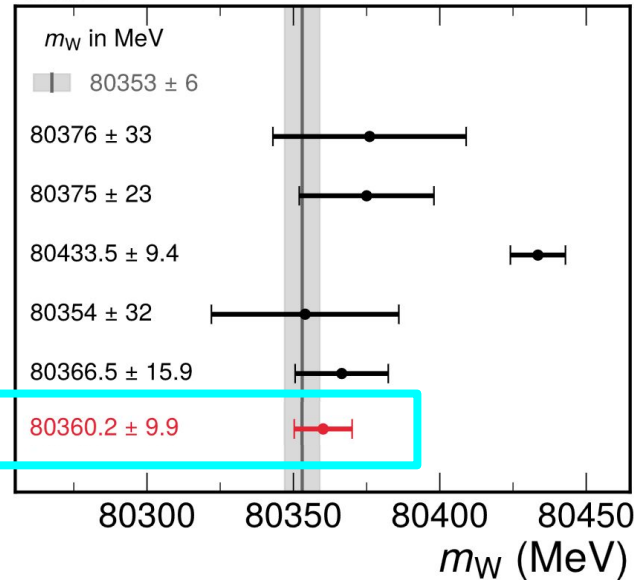
Source of uncertainty	Impact (MeV)
Muon momentum scale	4.8
Muon reco. efficiency	3.0
W and Z angular coeffs.	3.3
Higher-order EW	2.0
p_T^V modeling	2.0
PDF	4.4
Nonprompt background	3.2
Integrated luminosity	0.1
MC sample size	1.5
Data sample size	2.4
Total uncertainty	9.9

Risultato finale

$$m_W = 80360.2 \pm 9.9 \text{ MeV}/c^2$$

CMS

Electroweak fit
PRD 110 (2024) 030001
LEP combination
Phys. Rep. 532 (2013) 119
D0
PRL 108 (2012) 151804
CDF
Science 376 (2022) 6589
LHCb
JHEP 01 (2022) 036
ATLAS
arXiv:2403.15085
CMS
This work



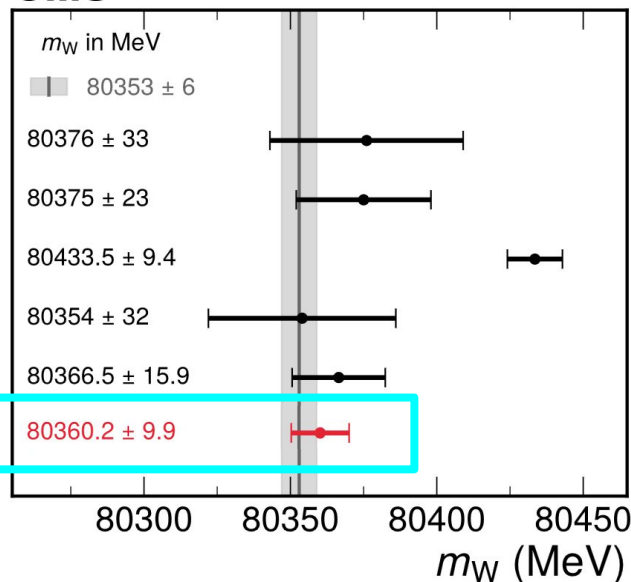
Source of uncertainty	Impact (MeV)
Muon momentum scale	4.8
Muon reco. efficiency	3.0
W and Z angular coeffs.	3.3
Higher-order EW	2.0
p_T^V modeling	2.0
PDF	4.4
Nonprompt background	3.2
Integrated luminosity	0.1
MC sample size	1.5
Data sample size	2.4
Total uncertainty	9.9

Risultato finale

$$m_W = 80360.2 \pm 9.9 \text{ MeV}/c^2$$

CMS

Electroweak fit
PRD 110 (2024) 030001
LEP combination
Phys. Rep. 532 (2013) 119
D0
PRL 108 (2012) 151804
CDF
Science 376 (2022) 6589
LHCb
JHEP 01 (2022) 036
ATLAS
arXiv:2403.15085
CMS
This work

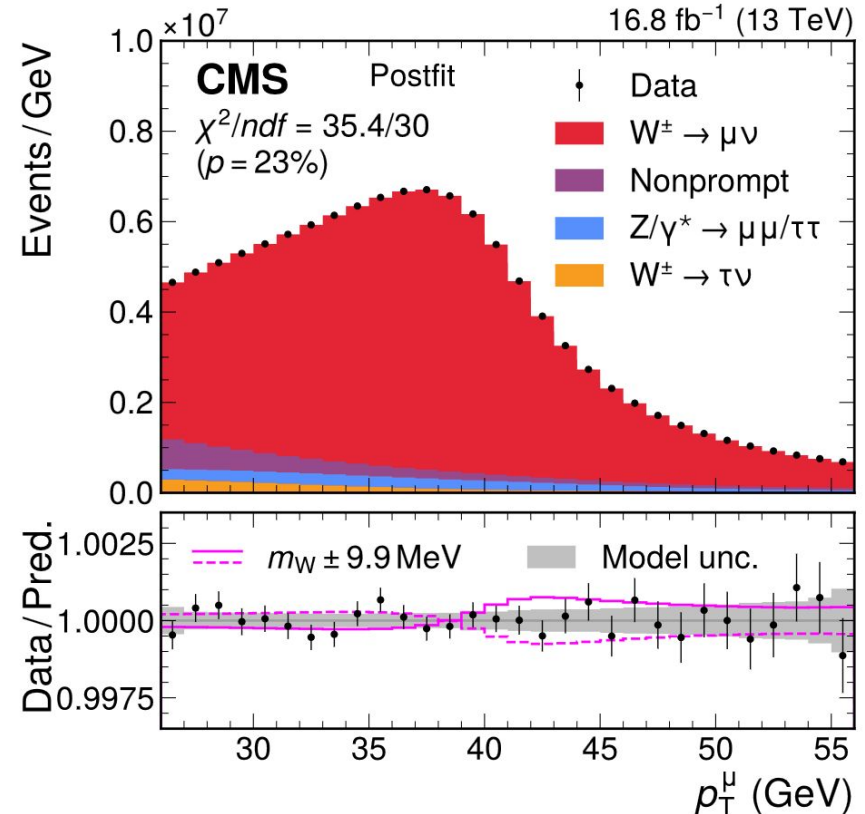


Source of uncertainty	Impact (MeV)
Muon momentum scale	4.8
Muon reco. efficiency	3.0
W and Z angular coeffs.	3.3
Higher-order EW	2.0
p_T^V modeling	2.0
PDF	4.4
Nonprompt background	3.2
Integrated luminosity	0.1
MC sample size	1.5
Data sample size	2.4
Total uncertainty	9.9

Il modello standard
resta valido!

In breve

- ★ Prima misura di m_W a CMS
 - la più precisa a LHC
 - accordo con il SM, tensione con CDF
- ★ Utilizzate tecniche innovative nella trattazione delle incertezze di natura teorica e sperimentale
- ★ Impiegato solo il 10% dei dati del Run2 di LHC, ampio spazio per ulteriori sviluppi
 - es. utilizzo dei dati del 2018, full-Run2 con ridotto impatto di input teorici



Grazie per l'attenzione

ruben.forti@cern.ch



UNIVERSITÀ DI PISA



Backup

Produzione del W

Sez. d'urto differenziale di decadimento di un bosone di spin 1:

*valida a ogni
ordine in QCD*

$$\frac{d\sigma}{dp_T^2 dm dy d\cos\theta^* d\phi^*} = \frac{3}{16\pi} \frac{d\sigma^{U+L}}{dp_T^2 dm dy} \left[(1 + \cos^2\theta^*) + \sum_{i=0}^7 \underbrace{A_i(p_T, m, y)}_{\text{Armoniche sferiche degli angoli di decadimento nel sistema Collins-Soper}} P_i(\cos\theta^*, \phi^*) \right]$$

Coefficienti angolari:

- predetti da simulazione di processi di QCD
- incertezze calcolate variando i parametri di rinormalizzazione μ_R, μ_F

Armoniche sferiche degli angoli di decadimento nel sistema Collins-Soper

Helicity cross-section fit: misura di m_W dal fit simultaneo con $\sigma_i = \sigma_{UL} \times A_i$

- ❖ minor dipendenza da modelli teorici
- ❖ maggior incertezza complessiva, dovuta alla statistica finita dei template
- ❖ primo risultato pubblicato: $m_W = 80360.8 \pm 15.2 \text{ MeV}$ (in accordo con la misura “classica”)

Modello per p_T^W

Strategia convenzionale: tuning della simulazione su eventi $Z \rightarrow \mu\mu$, predizione dello spettro per $W \rightarrow \mu\nu$ estratta da rapporto delle xsec. W/Z (teoriche)

- assunzioni model-dependent necessarie nella propagazione delle incertezze

Strategia adottata in CMS:

↗ NNLO in α_s , ma utilizzo di parton shower (PYTHIA) che raggiungono accuratezza leading-log (LL) a basso p_T^V

❖ Modello basato su simulazione MINNLO_{PS}, con correzioni:

- risommazioni con SCETlib: calcoli avanzati in QCD per raggiungere ordine $N^3\text{LL}$ in (p_T^V/m_V)
- effetti di natura non perturbativa (con SCETlib) $\rightarrow$ *Transverse Momentum Dependent PDFs*
- ordine perturbativo fissato NNLO ad alto p_T , tramite matching con DYturbo

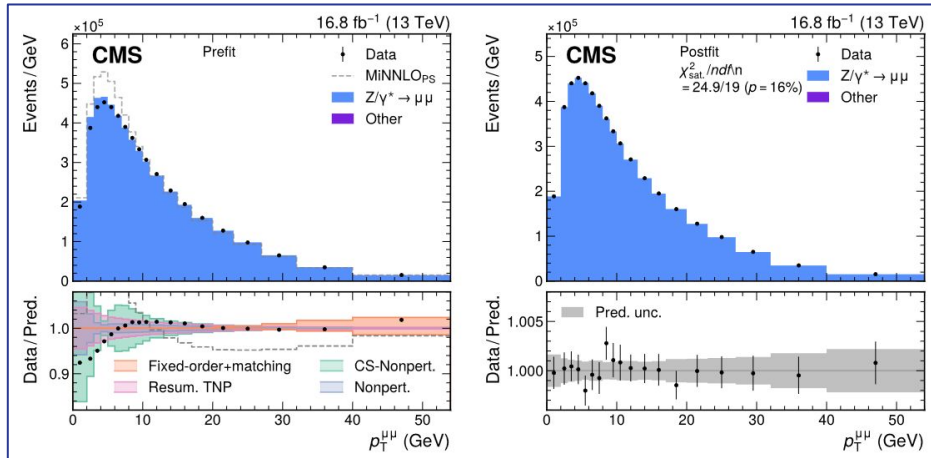
❖ Incertezze associate ai diversi effetti:

- Theory Nuisance Parameters per le risommazioni
- Modello *loose* per le incertezze associate ai modelli non perturbativi
- Variazione delle scale μ_R, μ_F per teoria perturbativa ad alto p_T

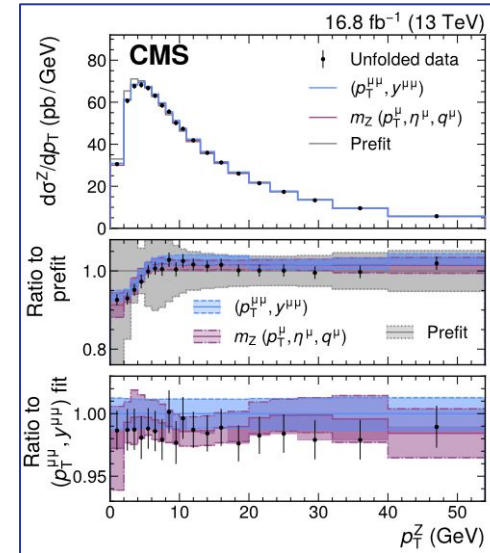
Modello per p_T^W - validazione

- 1) Analisi m_Z "dilepton": ricostruzione dello spettro di $p_T^{\mu\mu}$
- 2) Analisi m_Z W-like: spettro di p_T^Z nei dati ricostruito tramite unfolding

La minimizzazione modifica i parametri del modello



Distribuzione descritta
con precisione di 0.001



Accordo tra dati,
distrib. ricostruita
tramite fit a $p_T^{\mu\mu}$ e
distrib. estratta da
fit a m_Z W-like



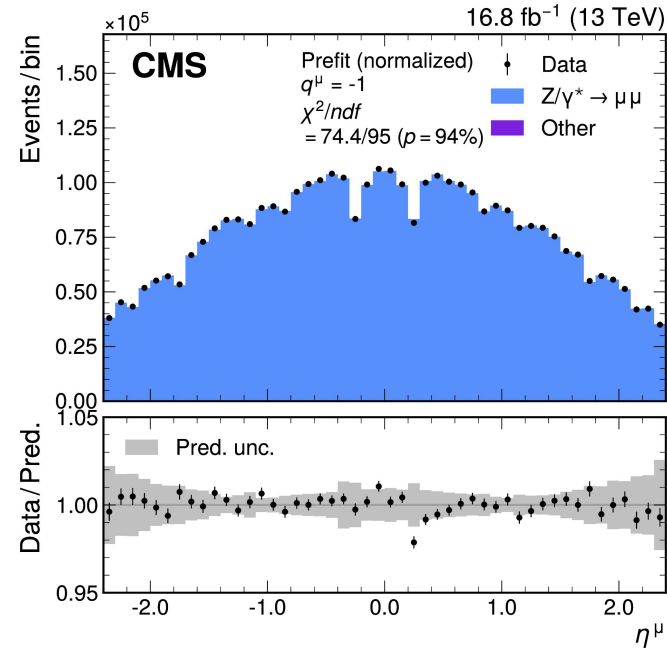
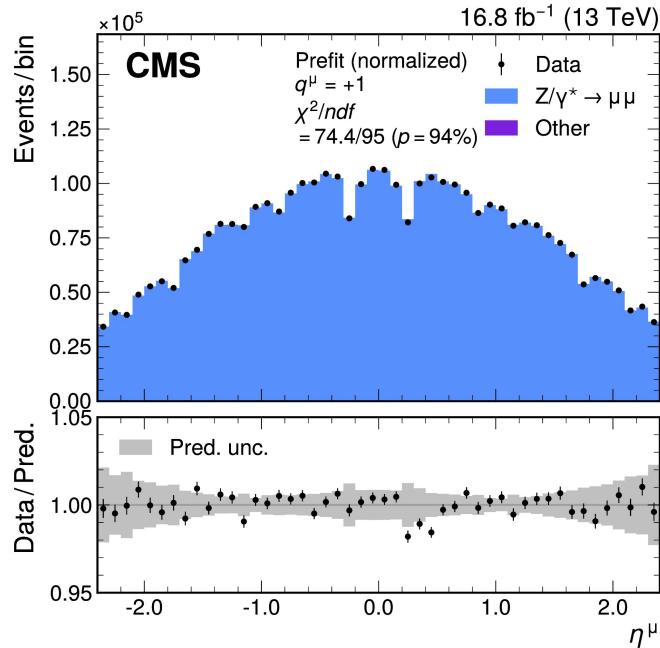
si può adottare la
stessa procedura
nella misura di m_W

Impatto: $\square m_W = 2.0 \text{ MeV}$

Scale factors - validazione

Scale factors applicati per analisi m_Z W-like

- ❖ accordo data/MC ripristinato entro l'1-2%
- ❖ incertezze sistematiche in grado di coprire le rimanenti discrepanze



Backgrounds

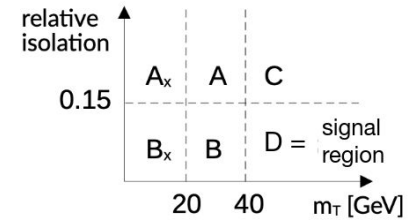
Prompt: muoni da $Z \rightarrow \mu\mu$, $Z \rightarrow \tau\tau$, $W \rightarrow TV$ (con uno dei due muoni fuori accettazione o $\tau \rightarrow \mu\nu$), o da decadimento di top o eventi con due bosoni; contributo stimato da MC

Nonprompt: muoni da decadimenti di mesoni B/D in eventi multi-jet

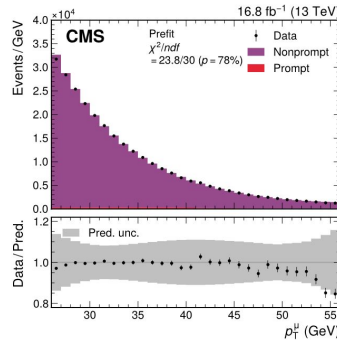
- ❖ in gran parte soppressi dal taglio $m_T > 40$ GeV
- ❖ contributo stimato con metodo data-driven “extended ABCD”

- Transfer factor T_f calcolato nelle regioni con $m_T < 40$ GeV e applicato alla regione C (in bin di $p_T^\mu - \eta^\mu - q^\mu$)
- Smoothing in funzione di p_T per ogni sideband
- Validazione su sample arricchito di muoni da vertici secondari

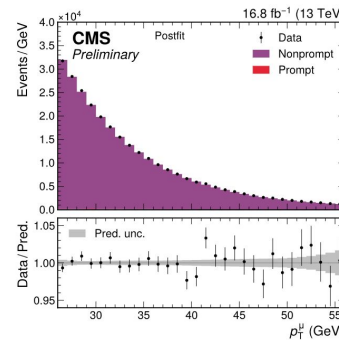
$$m_T = \sqrt{2 p_T^\ell p_T^{\text{miss}} (1 - \cos \Delta\phi)}$$



$$D = C \cdot \frac{A_x B^2}{B_x A^2}$$



fit



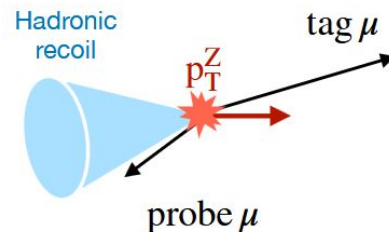
Impatto:

$$\square m_W = 3.2 \text{ MeV}$$

Efficienze e *hadronic recoil*

Richieste sulla tag: isolamento + $p_T > 25$ GeV $\downarrow$

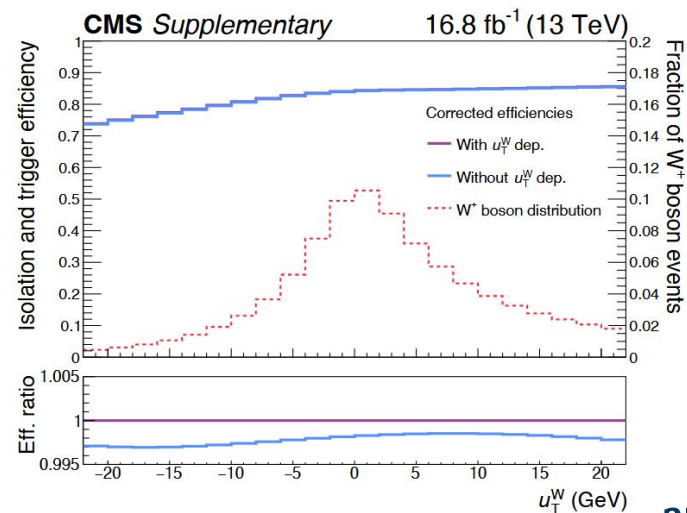
- ❖ quando $p_T^{\text{tag}} > p_T^{\text{probe}}$, la probe tenderà a cadere nel cono dell'*hadronic recoil* $\rightarrow$ minor efficienza di isolamento
- ❖ effetto che dipende dalla distribuzione di p_T^Z e dell'angolo tra la Z e la probe (sul piano trasverso)
 - dipendenza racchiusa dalla osservabile u_T
 - distribuzioni differenti rispetto al caso $W \rightarrow \mu\nu$, bias da correggere nelle efficienze misurate



$$u_T = \frac{\vec{p}_T^Z \cdot \vec{p}_T^\mu}{|\vec{p}_T^\mu|}$$

Soluzione implementata: misurare le efficienze di ricostruzione anche in funzione di u_T (per trigger e isolation)

- ★ correzione di 0.4% nelle efficienze



Confronto con CDF

- ❖ Misura effettuata a collider protone-antiprotone, migliore definizione dello stato iniziale (minor contributo di quark del mare, minor impatto delle PDF)
- ❖ minor quantità di materiale nell'apparato di tracciatura ($< 0.2 X_0$, vs 1-2 X_0 a CMS)
- ❖ misura include anche gli elettroni e sfrutta m_T come distribuzione nel fit
- ❖ fit di likelihood senza profiling, non possibile un confronto diretto con CMS

Source	Uncertainty (MeV)
Lepton energy scale	3.0
Lepton energy resolution	1.2
Recoil energy scale	1.2
Recoil energy resolution	1.8
Lepton efficiency	0.4
Lepton removal	1.2
Backgrounds	3.3
p_T^Z model	1.8
p_T^W/p_T^Z model	1.3
Parton distributions	3.9
QED radiation	2.7
W boson statistics	6.4
Total	9.4

Source of uncertainty	Impact (MeV)
Muon momentum scale	4.8
Muon reco. efficiency	3.0
W and Z angular coeffs.	3.3
Higher-order EW	2.0
p_T^V modeling	2.0
PDF	4.4
Nonprompt background	3.2
Integrated luminosity	0.1
MC sample size	1.5
Data sample size	2.4
Total uncertainty	9.9

Confronto con ATLAS

- ❖ Analisi su dati del Run1 di LHC (7 TeV), pubblicato recentemente un update con sviluppi nella tecnica di fit (ora simile a quella utilizzata in CMS)
- ❖ misura include anche gli elettroni e sfrutta m_T come distribuzione nel fit
- ❖ rispetto a CMS, minori constraints ottenuti sulle PDFs e sulle incertezze della modellizzazione di processi di QCD

Unc. [MeV]	Total	Stat.	Syst.	PDF	A_i	Backg.	EW	e	μ	u_T	Lumi	Γ_W	PS
p_T^ℓ	16.2	11.1	11.8	4.9	3.5	1.7	5.6	5.9	5.4	0.9	1.1	0.1	1.5
m_T	24.4	11.4	21.6	11.7	4.7	4.1	4.9	6.7	6.0	11.4	2.5	0.2	7.0
Combined	15.9	9.8	12.5	5.7	3.7	2.0	5.4	6.0	5.4	2.3	1.3	0.1	2.3

Nota: ATLAS quota i “global impacts”, in cui i constraints in-situ ottenuti nel fit fanno parte dell’incertezza statistica

Source of uncertainty	Impact (MeV)	
	Nominal	Global
Muon momentum scale	4.8	4.4
Muon reco. efficiency	3.0	2.3
W and Z angular coeffs.	3.3	3.0
Higher-order EW	2.0	1.9
p_T^V modeling	2.0	0.8
PDF	4.4	2.8
Nonprompt background	3.2	1.7
Integrated luminosity	0.1	0.1
MC sample size	1.5	3.8
Data sample size	2.4	6.0
Total uncertainty	9.9	9.9