



Verso la misura della massa del bosone W con l'esperimento CMS

Marco Cipriani

Sapienza Università di Roma e INFN Roma1

per conto della collaborazione CMS

IFAE 2018

Milano, 4 Aprile 2018

Perché misurare la massa del W?

➤ **parametro fondamentale del Modello Standard (MS)**

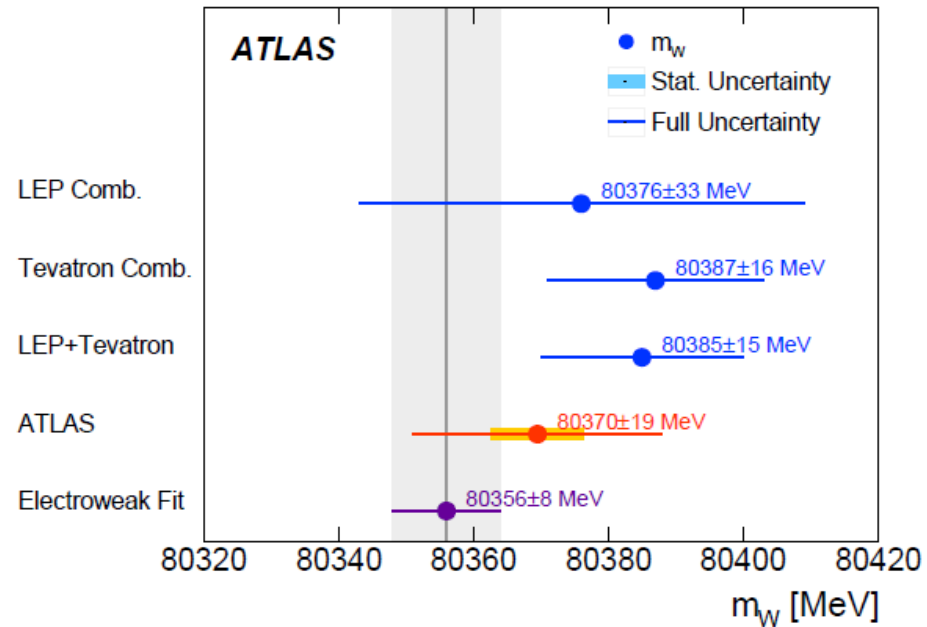
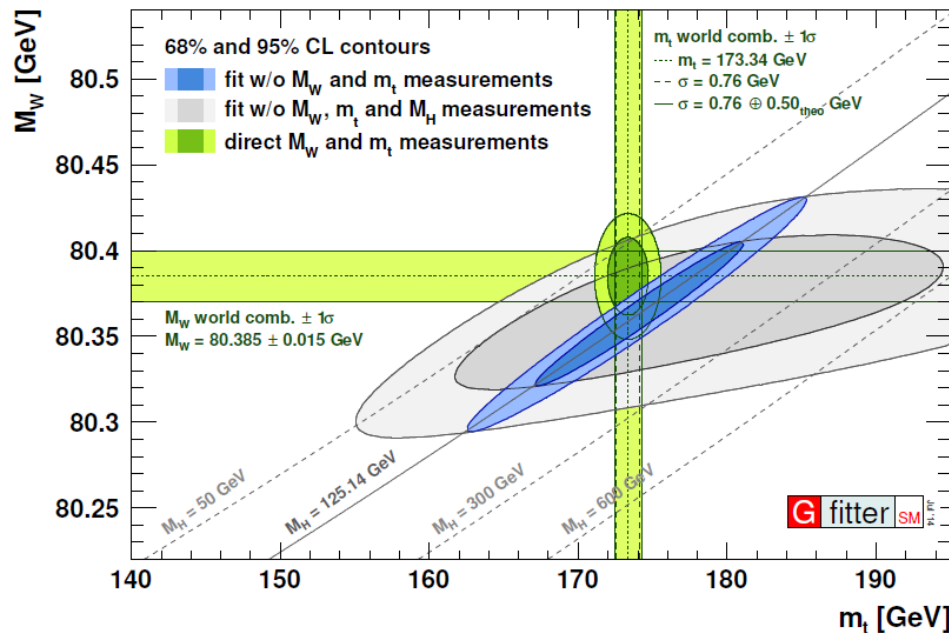
- legato ad altre grandezze della teoria elettrodebole

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

➤ **correzioni alla massa da ordini superiori (Δr)**

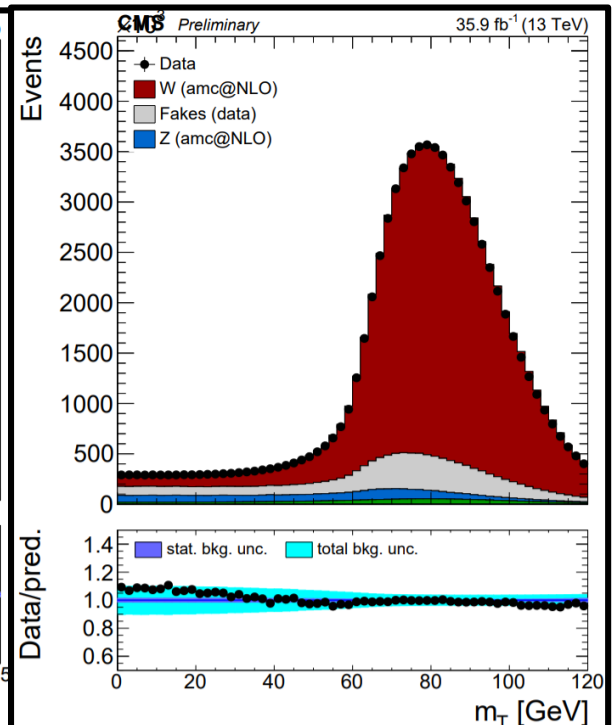
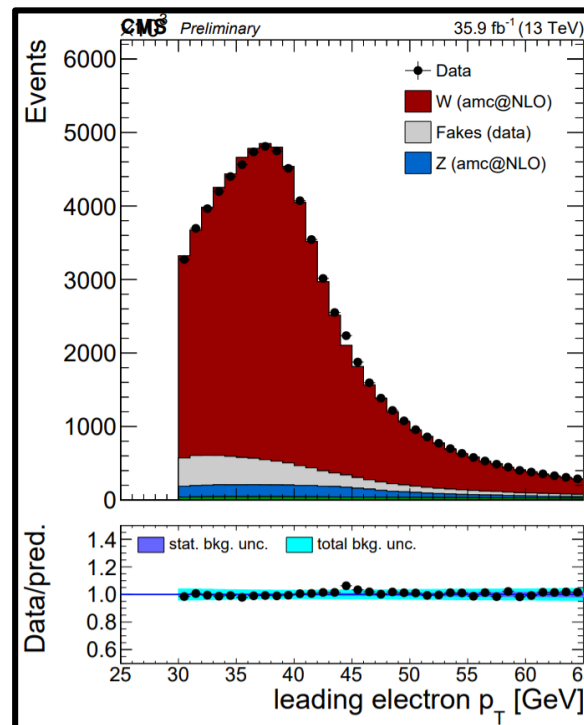
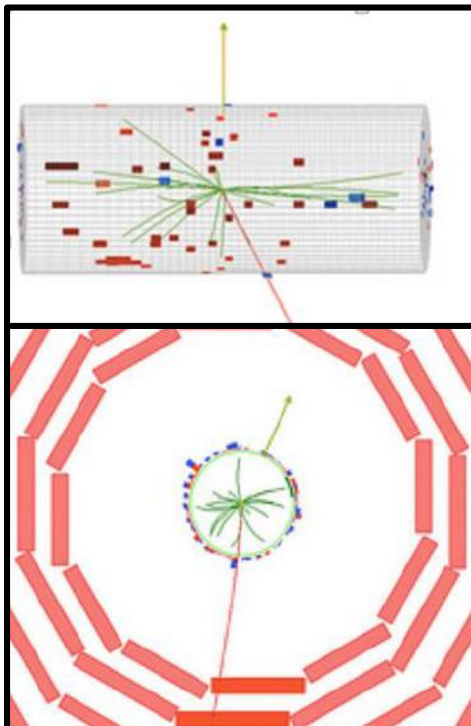
- maggiore contributo da particelle pesanti
- straordinario strumento per **testare la coerenza interna del MS** e **sondare l'esistenza di nuova fisica**

➤ **valore sperimentale attualmente meno preciso della predizione**



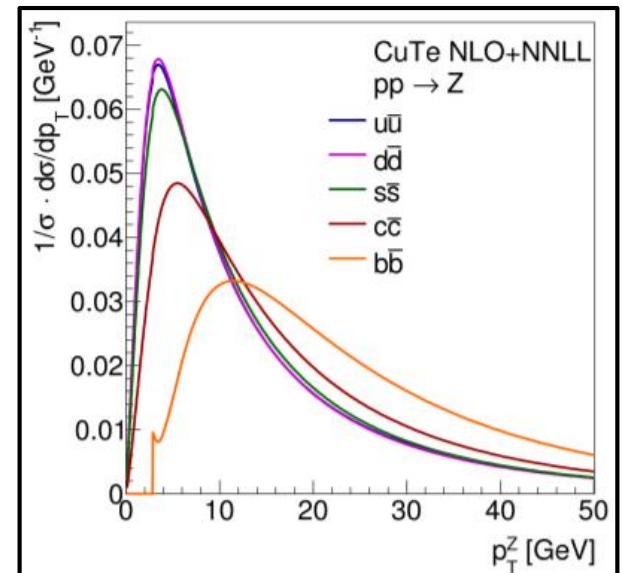
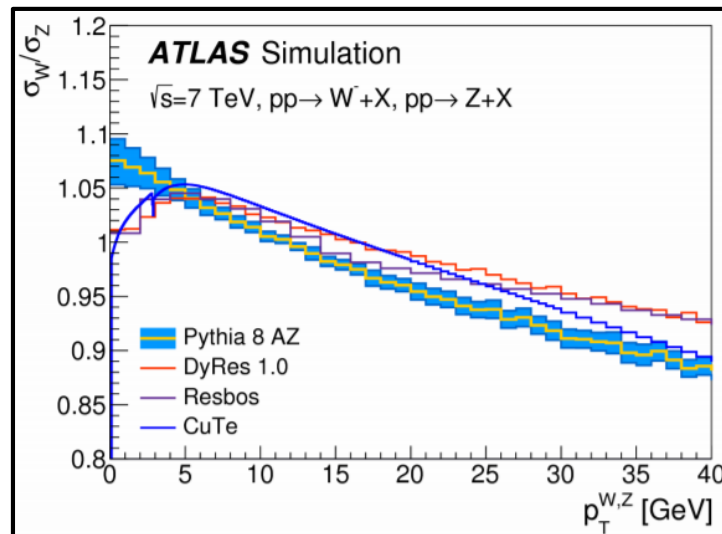
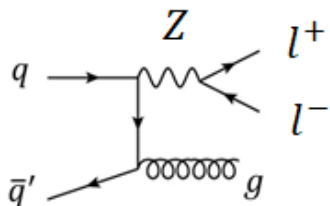
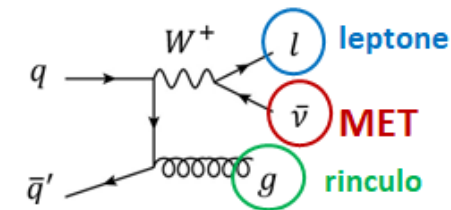
Come misurare la massa del W

- **decadimento leptonic** → **energia mancante nel piano trasverso, MET (ν)**
 - impulso longitudinale iniziale non noto a LHC (PDF dei protoni)
- **picco jacobiano in variabili cinematiche nel piano trasverso**
 - impulso trasverso p_T del leptone carico ($l = e, \mu$) → picco a $m_W/2$
 - massa trasversa del W, $m_T = \sqrt{2 \cdot p_T \cdot p_T^\nu \cdot (1 - \cos \phi_{l,\nu})}$ → picco a m_W
- **confronto dei dati con distribuzioni simulate per diverse ipotesi di m_W**



Incertezze sistematiche

- misurare m_W richiede un **perfetto controllo delle simulazioni e delle incertezze sistematiche teoriche e sperimentali**
 - p_T : migliore precisione sperimentale, ma incertezza teorica dovuta a p_T^W (PDF)
 - m_T : dominata da risoluzione sperimentale sulla MET (rinculo adronico)
- **misura precisa di p_T^W (= rinculo) fondamentale**
 - tradizionalmente si misura $d\sigma/dp_T^Z$ per vincolare $d\sigma/dp_T^W$ dal rapporto teorico
 - propagare attuali incertezze teoriche nel rapporto W/Z implica $\delta m_W \approx 30$ MeV
- **le principali incertezze teoriche si riconducono sostanzialmente alle PDF**



Stato della misura di m_W a CMS

➤ **ATLAS ha recentemente pubblicato una misura basata su 4.7 fb^{-1} a 7 TeV**

- trattazione di alcune incertezze teoriche attualmente fonte di dibattito

Combined categories	Value [MeV]	Stat. Unc.	Muon Unc.	Elec. Unc.	Recoil Unc.	Bckg. Unc.	QCD Unc.	EWK Unc.	PDF Unc.	Total Unc.	χ^2/dof of Comb.
$m_{T-p_T^\ell}, W^\pm, e-\mu$	80369.5	6.8	6.6	6.4	2.9	4.5	8.3	5.5	9.2	18.5	29/27

➤ **CMS sta attualmente lavorando alla misura con 35.9 fb^{-1} a 13 TeV (dati 2016)**

- in passato, studi di fattibilità basati su misura di m_Z 'à la m_W ' a 7 TeV
- sistematiche sperimentali sotto controllo (precisione di 10^{-4} su p_T , 10^{-2} su rinculo)
- serve maggior lavoro per ridurre quelle teoriche

➤ **strategia attuale: concentrarsi su misure complementari e propedeutiche**

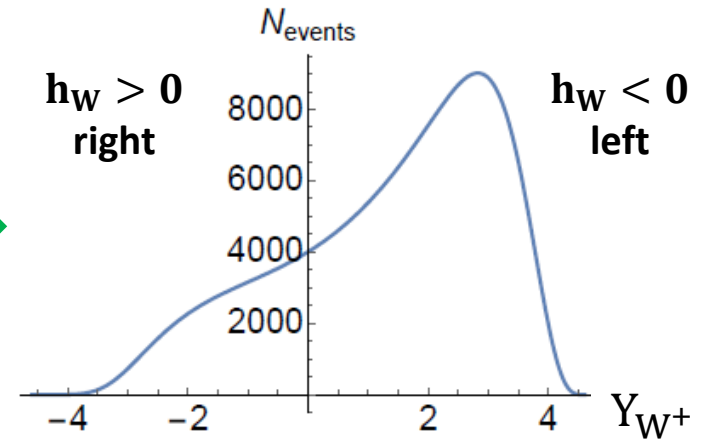
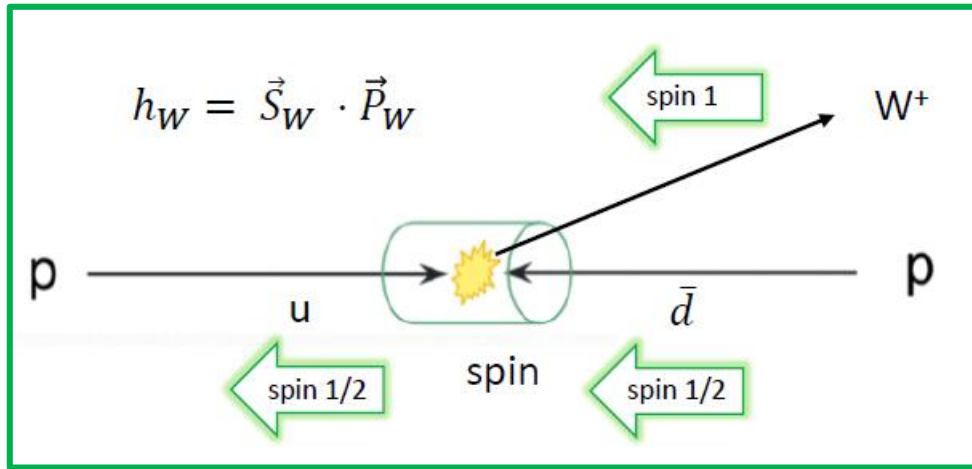
- fondamentali per non dipendere da assunzioni teoriche non sempre giustificabili
- molti aspetti e tecniche sperimentali comuni (stima di fondi, sistematiche)
- utili ai teorici per lo sviluppo di modelli più accurati

➤ **misure ausiliarie in corso a 13 TeV**

- distribuzione di **elicità/rapidità del W**
- $d\sigma/dp_T^W$ per $p_T^W \lesssim 10 \text{ GeV}$ (ATLAS cita incertezza 2% $\rightarrow \delta m_W \approx 8 \text{ MeV}$)
- $d\sigma/dp_T^Z$ e rapporto con p_T^W (e confronto con misure esistenti a 8 TeV)

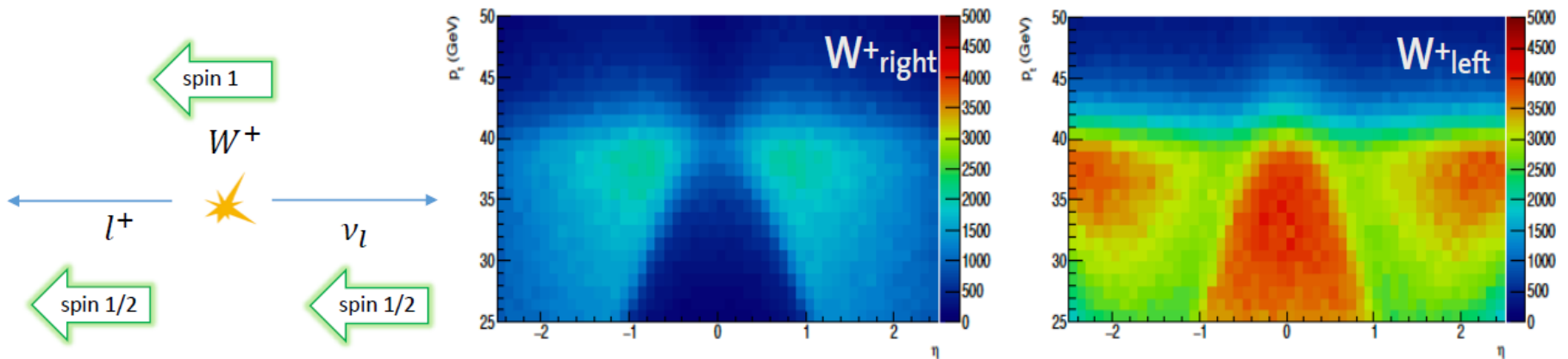
Misura della distribuzione di elicità/rapidità del W a CMS

Produzione e decadimento del W



distribuzione di rapidità dei bosoni W (Y_W) prodotti a LHC dipende dalle PDF

- misurare Y_W permette di vincolare le PDF e migliorare la misura di m_W
- forte correlazione di Y_W con p_T e pseudorapidità (η) del leptone carico nel decadimento

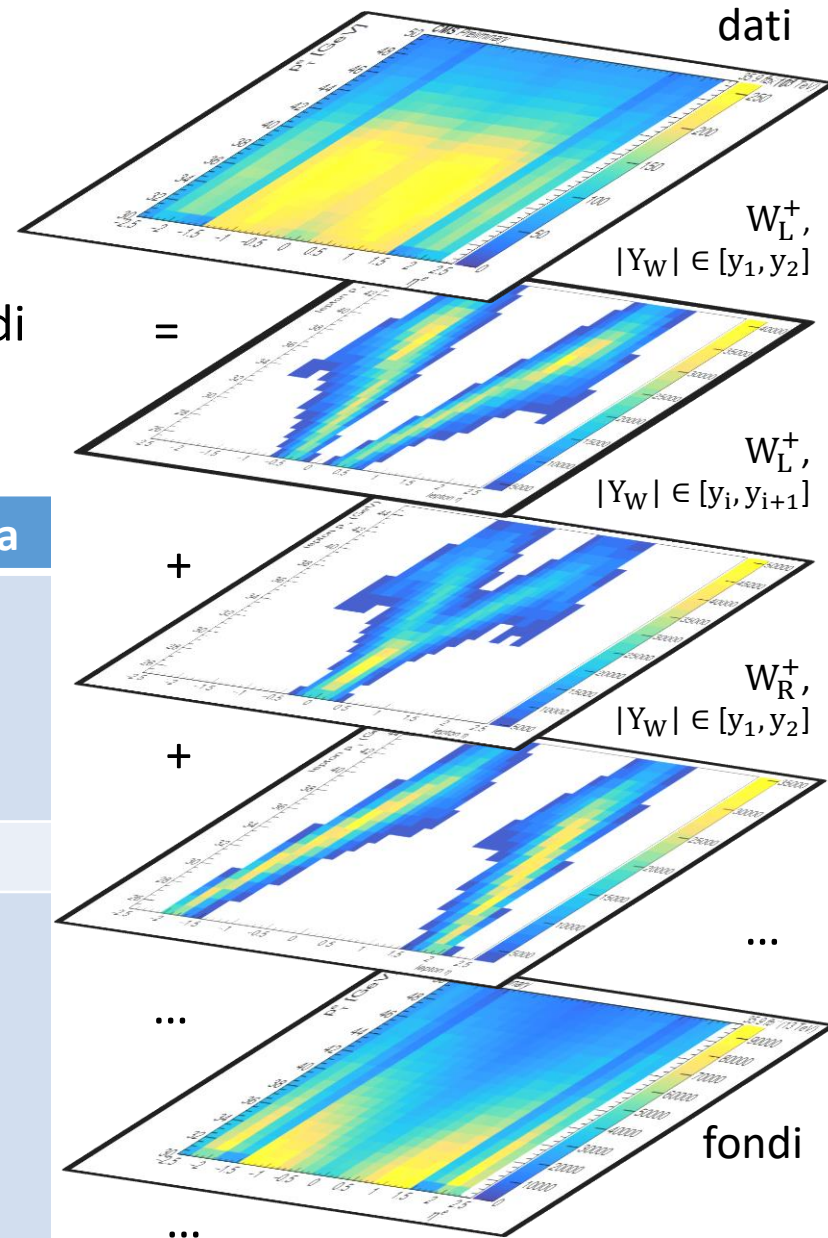


distribuzioni p_T vs. η del muone in decadimenti $W \rightarrow \mu\nu$

Basi della misura

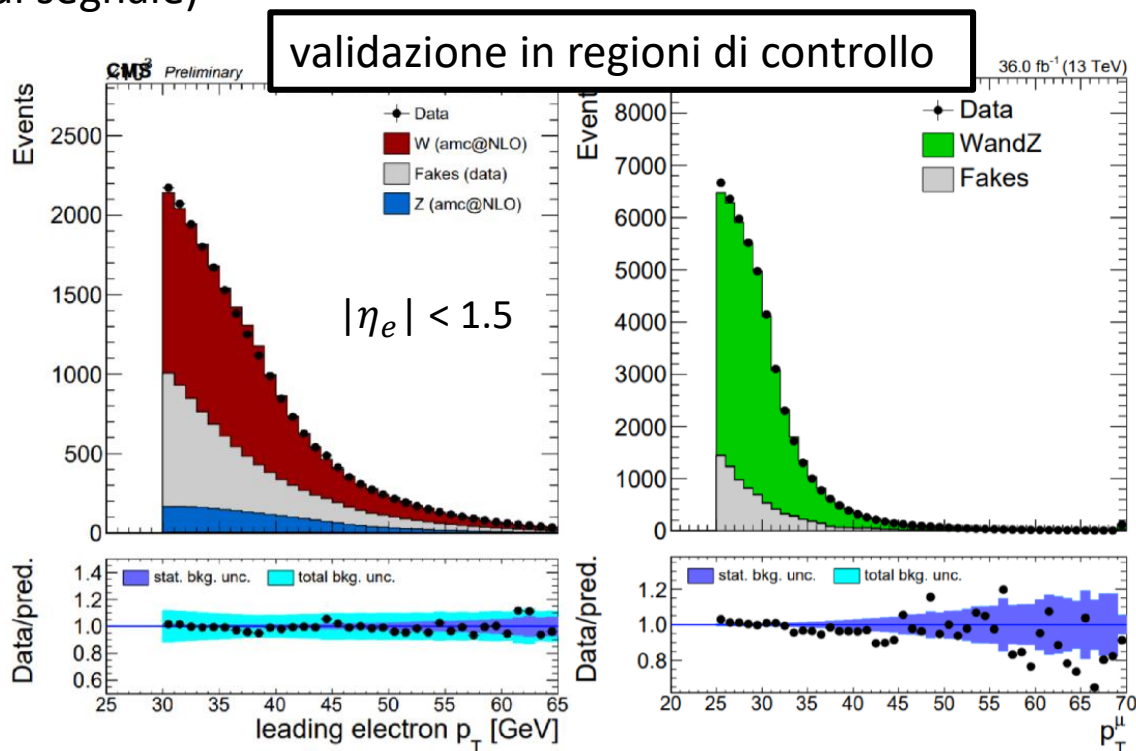
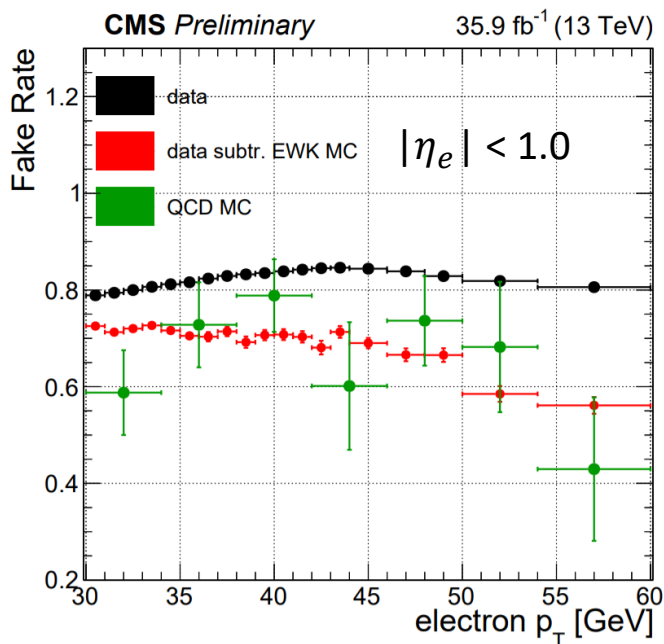
- **fit alla distribuzione p_T vs. η del leptone (e/μ) nei dati con template di segnale e fondi, separatamente per ciascuna carica**
- **il fit estrae il peso statistico di ciascun bin di Y_W , campionando di fatto la distribuzione di Y_W per ciascuna h_W (left/right)**

Processo		Elemento nel fit	Stima									
Segnale	W	Diversi template per vari bin di $ Y_W $ e h_W (left/right)	MC									
		Fondo	<tr> <td rowspan="4">Fondo</td> <td>QCD</td> <td>1 template</td> <td>Dati</td> </tr> <tr> <td>W₀ (polarizzazione longitudinale)</td> <td>1 template</td> <td rowspan="3">MC</td> </tr> <tr> <td>W → $\tau\nu$</td> <td>1 template</td> </tr> <tr> <td>Z, top, WW, ZZ, WZ</td> <td>1 template</td> </tr>	Fondo	QCD	1 template	Dati	W₀ (polarizzazione longitudinale)	1 template	MC	W → $\tau\nu$	1 template
Fondo	QCD	1 template	Dati									
	W₀ (polarizzazione longitudinale)	1 template	MC									
	W → $\tau\nu$	1 template										
	Z, top, WW, ZZ, WZ	1 template										



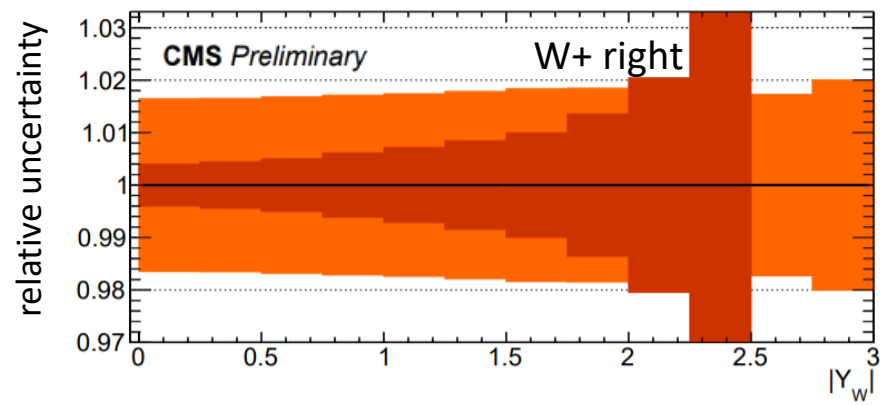
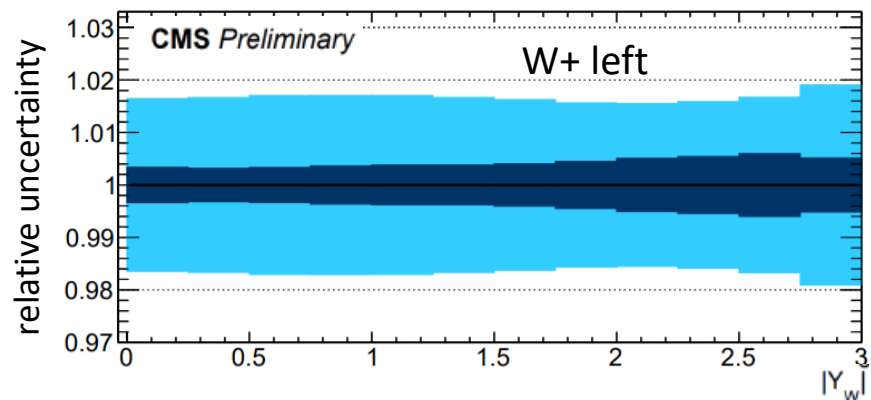
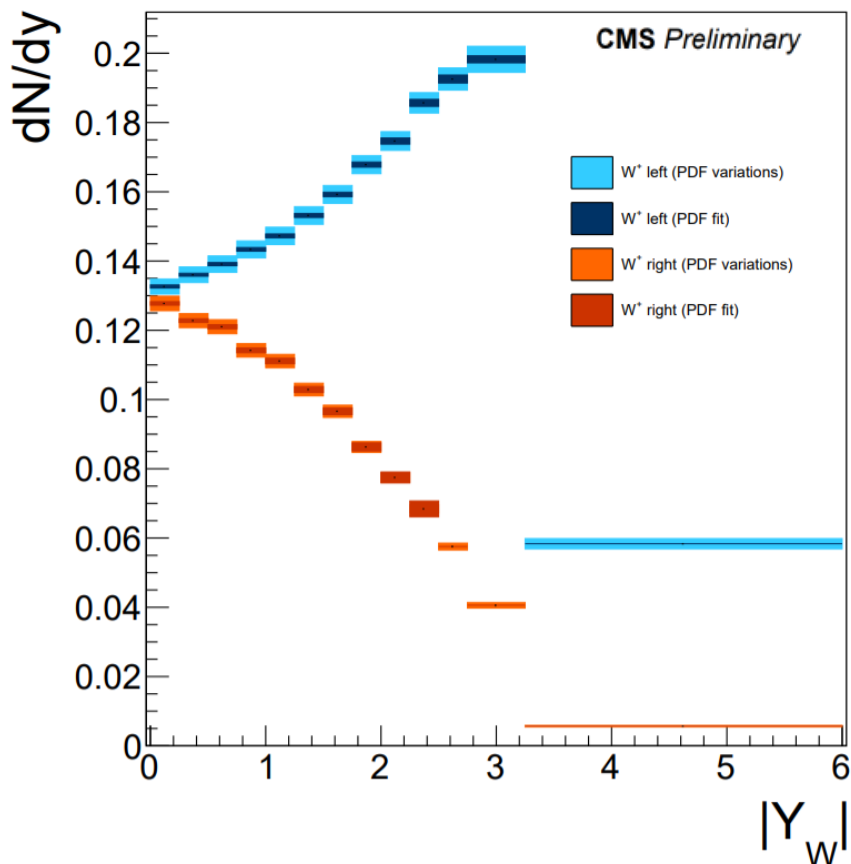
Stima del fondo di QCD

- **fondo dominante: leptoni da decadimenti leptonici di quark pesanti (muoni), misidentificazione di jet e conversione di fotoni (elettroni)**
 - simulazioni non riproducono adeguatamente i processi all'origine
- **necessaria una stima basata sui dati: metodo della *fake-rate* (FR)**
 - si rilassa ID/isolamento del leptone e si calcola la probabilità $P(\text{tight}|\text{loose}) \equiv \text{FR}$
 - si applica FR a campione di eventi con leptoni che falliscono ID/isolamento tight (ortogonale alla regione di segnale)



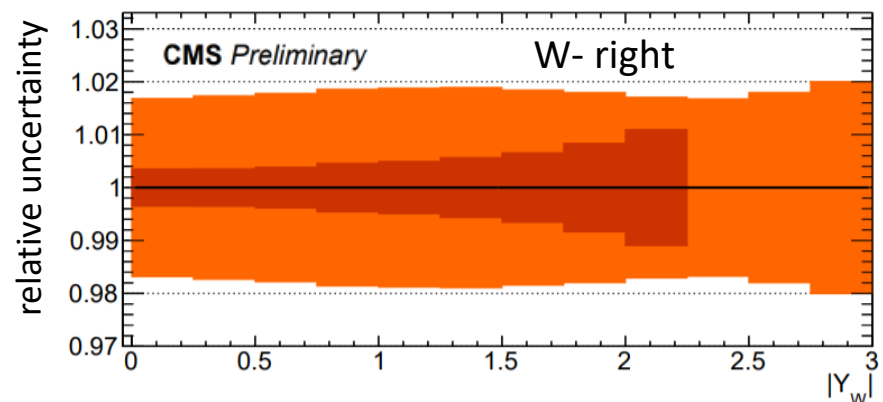
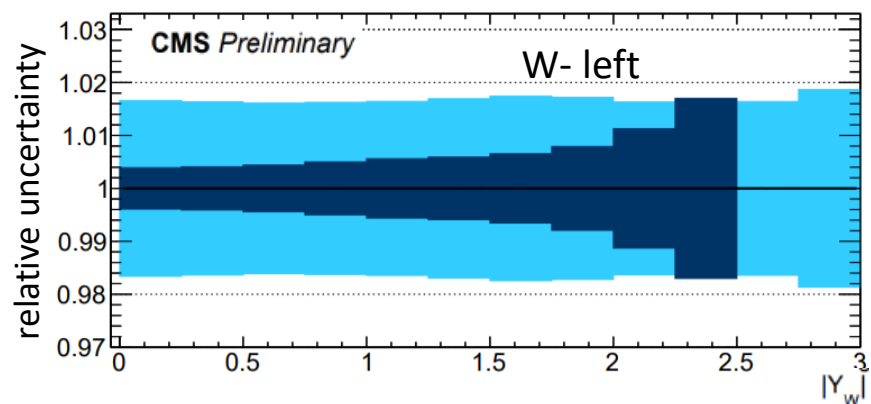
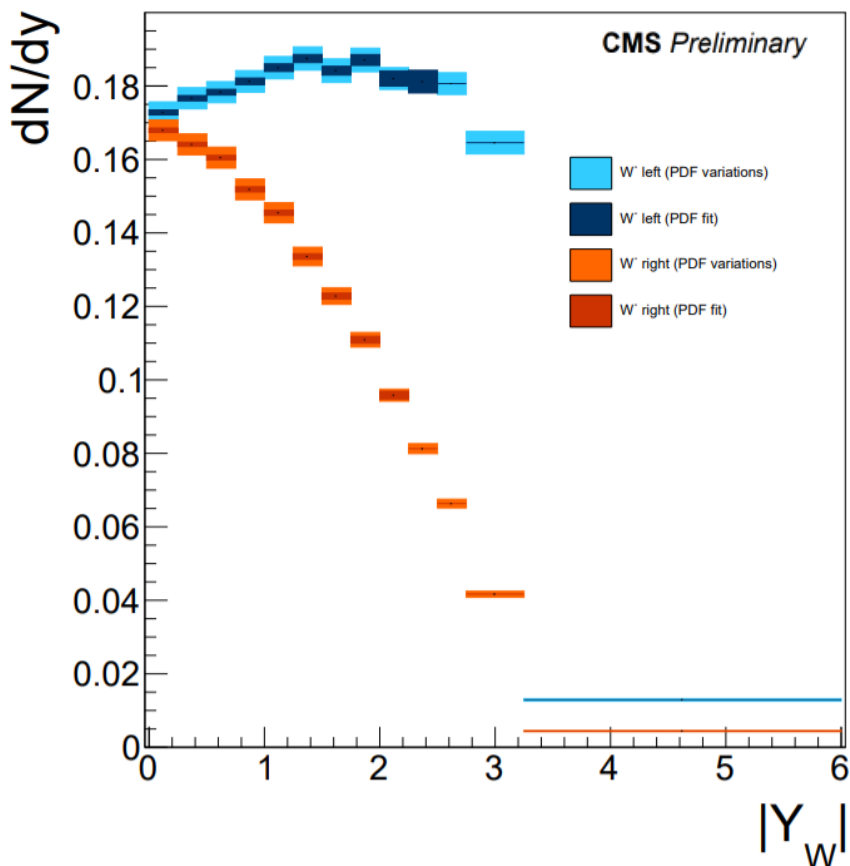
Risultati: $W^+ \rightarrow e^+\nu$

- **il fit include diverse sistematiche (efficienze, fondi, sezioni d'urto)**
 - in particolare, riceve in input le variazioni attese del segnale legate alle PDF
- **risultati ancora molto preliminari, ma piuttosto incoraggianti**
 - fit (aspettato) in grado di vincolare le PDF
 - quantificare l'effetto richiede la trattazione accurata di tutte le sistematiche



Risultati: $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}$

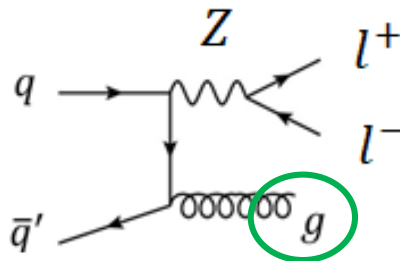
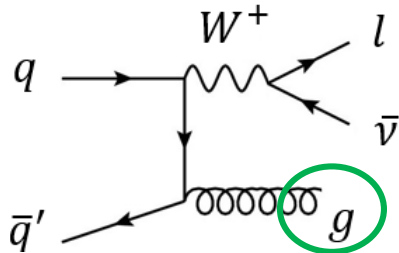
- **il fit include diverse sistematiche (efficienze, fondi, sezioni d'urto)**
 - in particolare, riceve in input le variazioni attese del segnale legate alle PDF
- **risultati ancora molto preliminari, ma piuttosto incoraggianti**
 - fit (aspettato) in grado di vincolare le PDF
 - quantificare l'effetto richiede la trattazione accurata di tutte le sistematiche



Prossimi passi

➤ **misura di precisione dell'impulso trasverso del W ($d\sigma/dp_T^W$) per $p_T^W < 10$ GeV**

- limite intrinseco dalla **risoluzione sul rinculo**
- necessaria accurata calibrazione del rinculo (sulla Z)
- risoluzione degradata da collisioni simultanee (pileup)



➤ **CMS ha raccolto dati dedicati a basso pileup a 13 TeV**

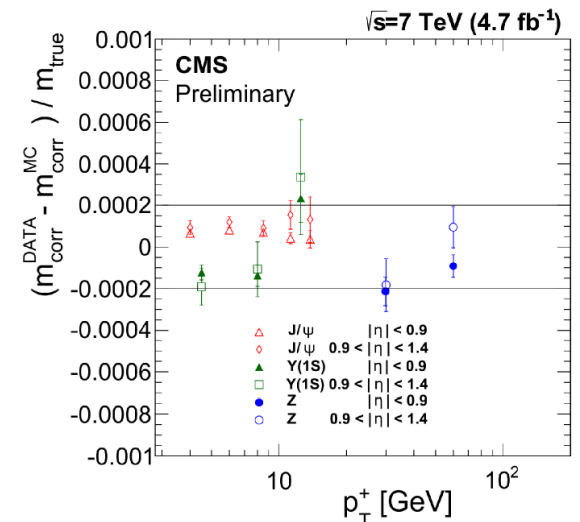
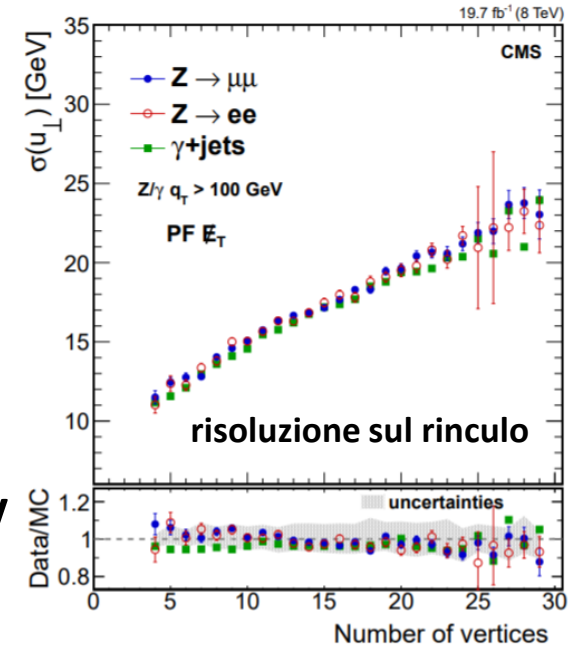
- validare calibrazione del rinculo, misurare $d\sigma/dp_T^W$

➤ **misura verrà ripetuta anche ad alto pileup**

- maggiore statistica, accesso anche ad alto p_T^W
- richiede tecniche avanzate (analisi multivariate)

➤ **accurata calibrazione dell'impulso dei leptoni**

- misurare m_W richiede **precisione $\lesssim 10^{-4}$**
- già raggiunto per muoni a 7 TeV (ripetere a 13 TeV)
- più difficile per elettroni, ma non impossibile



Piani e prospettive

- **2018: misura della distribuzione di elicità/rapidità del W a CMS**
 - possibilità concreta di vincolare le PDF
 - molti aspetti sperimentali e fenomenologici in comune con la misura di m_W
 - **Y_W mai misurata prima a LHC** per $p_T^W \cong O(10 \text{ GeV})$, pubblicazione entro l'estate
- **ridurre l'incertezza legata alle PDF è uno dei punti chiave per la misura di m_W**
 - vincoli ulteriori dalla misura di $d\sigma/dp_T^W$ e $d\sigma/dp_T^Z$
- **inizio 2019: misura preliminare di m_W da parte di CMS**
 - incertezze sperimentali + PDF possibilmente migliori di quelle citate da ATLAS
 - incertezze teoriche vincolate da misure dirette (evitare assunzioni sulla teoria)
 - δm_W totale potrebbe essere maggiore di ATLAS, ma più "solida"
- **2020-21: misura di m_W più raffinata**
 - miglior controllo di aspetti teorici
 - uso di tecniche avanzate (machine learning) per sfruttare al meglio la correlazione tra le varie osservabili e migliorarne la misura

BACKUP

Stima della QCD: metodo della fake-rate (FR)

- **Idea di base:**
 1. calcolare la probabilità (FR) che un leptone non-prompt, che ha superato delle selezioni di identificazione “lasche”, passi anche quelle “dure”
 2. applicare FR come **peso** ad eventi nei dati che passano la **selezione lasca ma non dura**: questo campione ripesato fornisce la **stima di QCD dai dati**

$$N_{\text{tight}}(\text{QCD}) = N_{\text{loose}}(\text{QCD}) \cdot \text{FR} = \left(N_{\text{notTight}}(\text{QCD}) + N_{\text{tight}}(\text{QCD}) \right) \cdot \text{FR}$$

$$\rightarrow N_{\text{tight}}(\text{QCD}) = \frac{\text{FR}}{1-\text{FR}} \cdot N_{\text{notTight}}(\text{QCD})$$

- **FR misurata in eventi di tipo dijet** (un jet reale e uno identificato come leptone) in funzione di p_T del leptone per diversi bin di η
- **leptone non-prompt:** leptone non isolato da decadimenti di adroni con quark pesanti, jets misidentificati (tipicamente da quark leggeri), elettroni da conversioni di γ
- **leptone prompt:** leptoni reali da decadimenti di W and Z (questa componente deve essere sottratta dai dati quando si calcola la FR)

Misurare l'elicità/rapidità del W

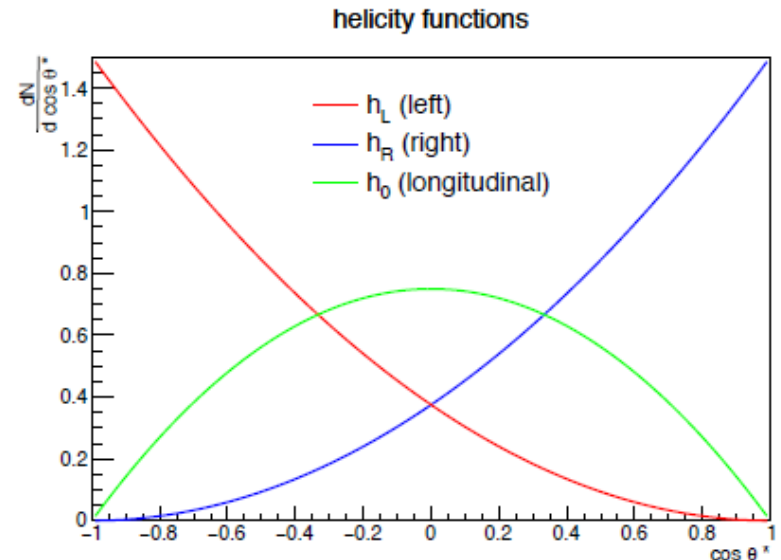
L'elicità non disponibile esplicitamente nel MC, bisogna ricavarla a posteriori

1) Con un qualunque MC di **W** senza selezioni cinematiche si costruisce, a livello di generatore, la distribuzione Y_W e p_T^W verso $\cos \theta^*$ (istogramma 3D)

- θ^* angolo nel sistema di riferimento di Collins-Soper

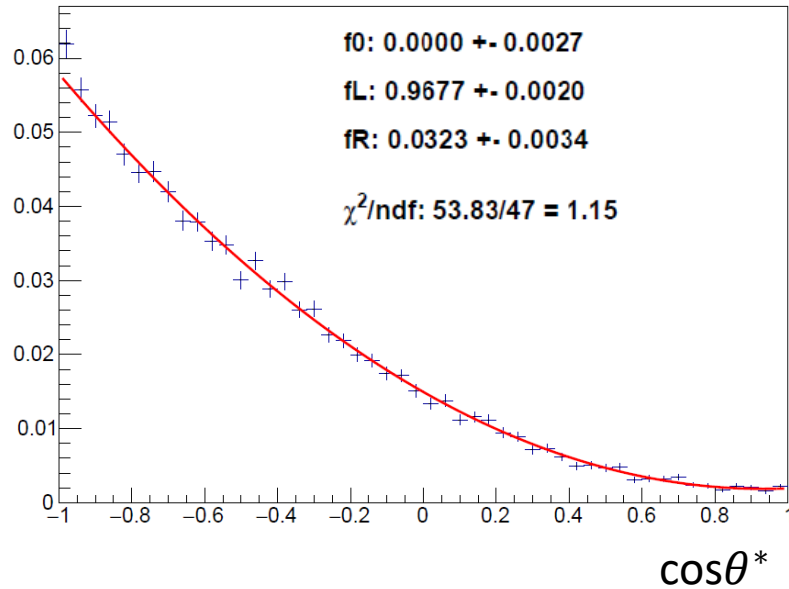
2) Fissato un intervallo di Y_W e p_T^W si ha una distribuzione 1D di $\cos \theta^*$, su cui si può effettuare un fit per estrarre le 3 frazioni di elicità sfruttando la funzione analitica della sezione d'urto

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d\cos\theta^*} = \frac{3}{8} (1 - \cos\theta^*)^2 F_L + \frac{3}{4} (\sin\theta^*)^2 F_0 + \frac{3}{8} (1 + \cos\theta^*)^2 F_R.$$

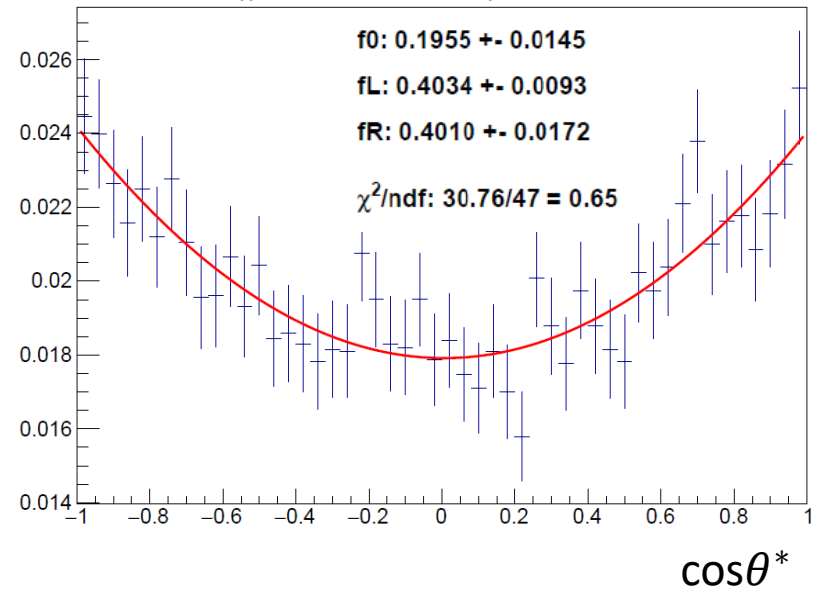


Frazioni di elicità

W^+ : $y_W \in [-6.00, -3.54]$, $p_T^W \in [0.00, 1.96]$

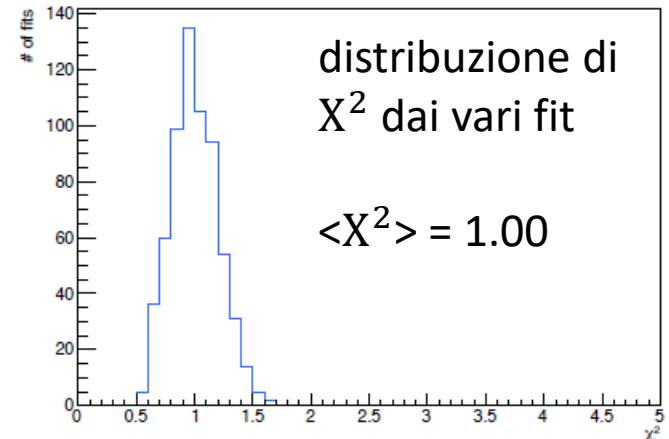


W^+ : $y_W \in [0.00, 0.49]$, $p_T^W \in [32.43, 40.09]$



- In media un W^+ ha più spesso elicità negativa (left) e polarizzazione longitudinale quasi nulla
- Un W^+ prodotto in avanti ha sostanzialmente solo elicità sinistrorsa

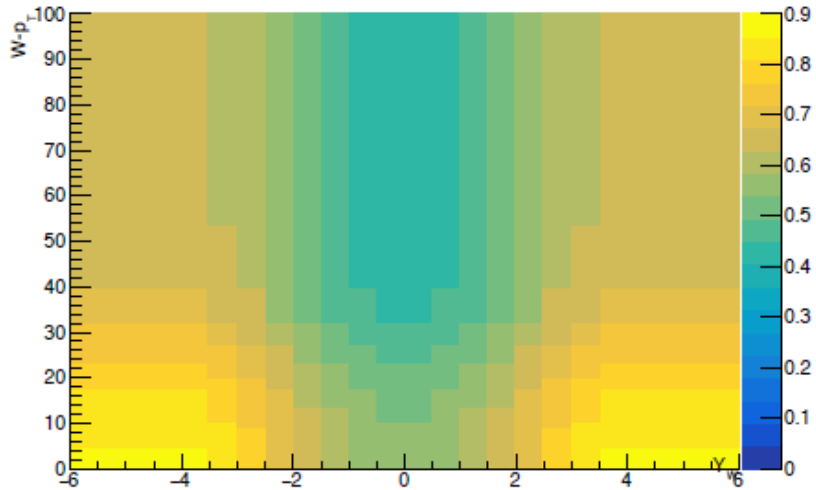
χ^2 distribution - NLO



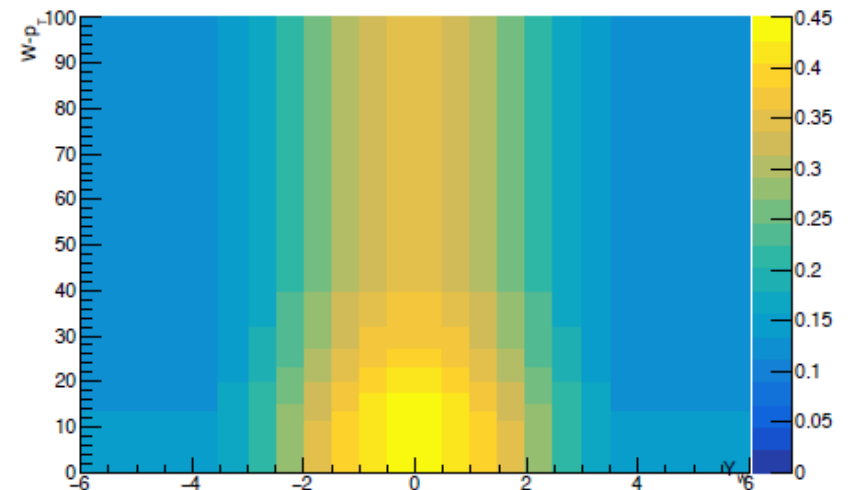
Frazioni di elicità per W^+

p_T^W su asse y, Y_W su asse x

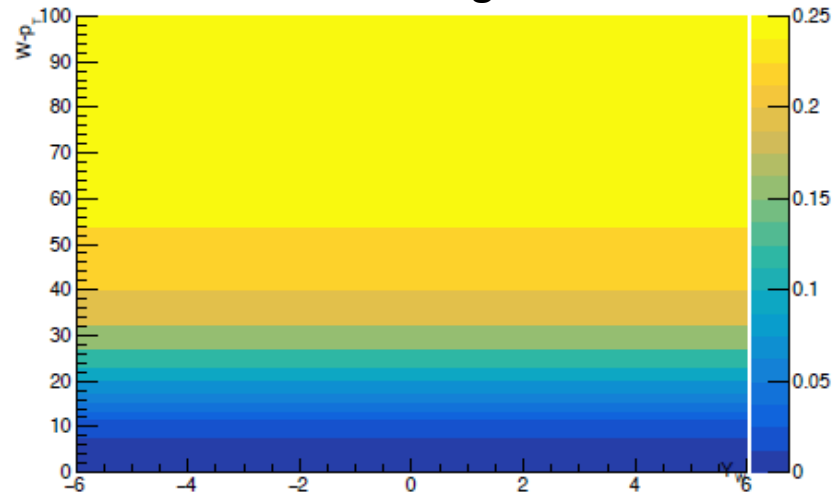
W^+ left



W^+ right



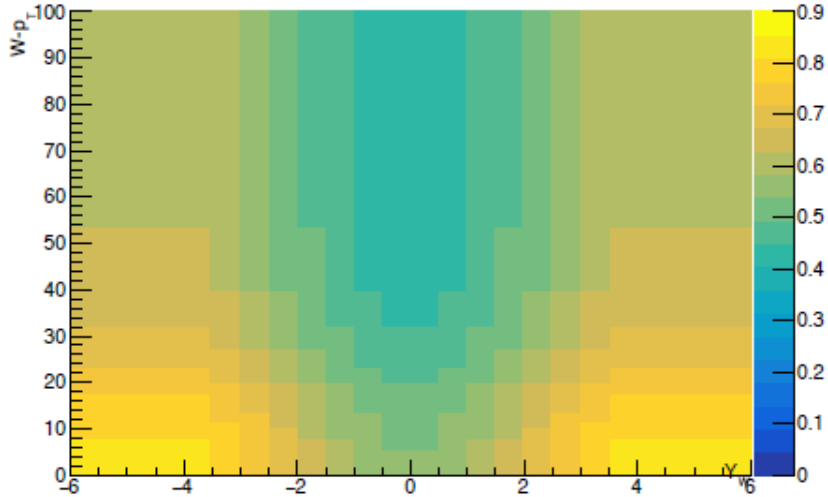
W^+ long



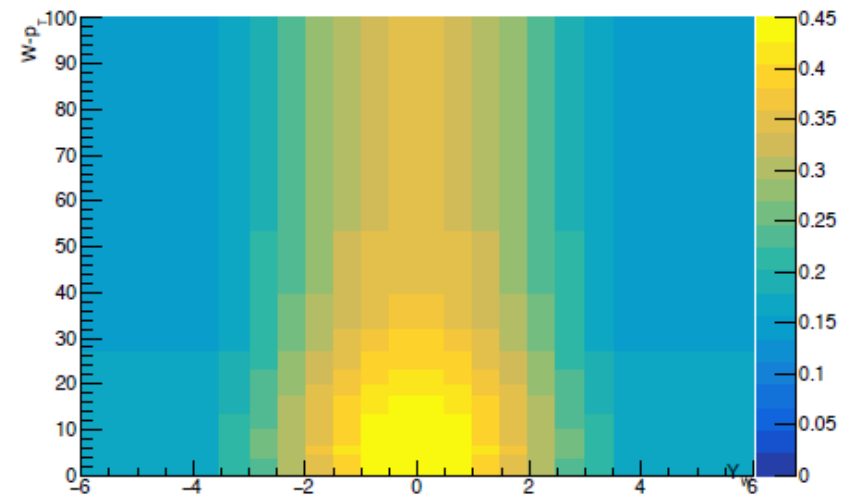
Frazioni di elicità per W^-

p_T^W su asse y, Y_W su asse x

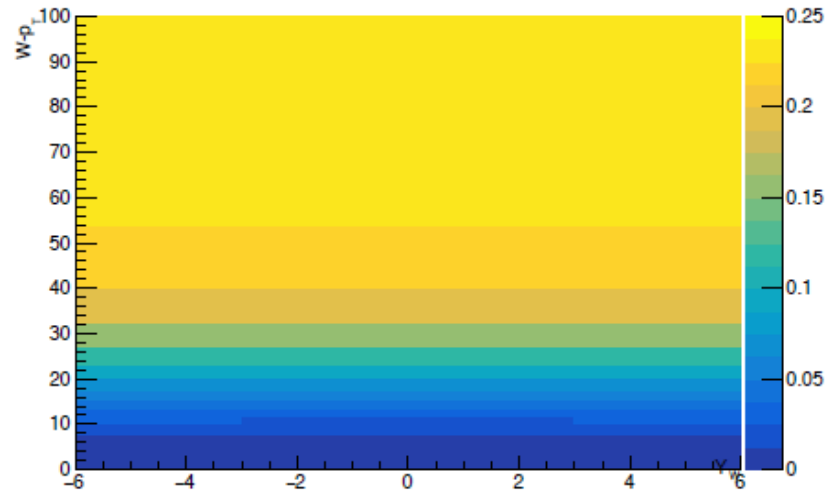
W^- left



W^- right



W^- long



Distribuzioni a livello di generatore

- ottenute ripesando ogni evento 3 volte in funzione di p_T^W e Y_W per ciascuna frazione di elicità
- accettazione finita del rivelatore limita fortemente lo spazio delle fasi accessibile dalla misura

