

IFAE 2023

Incontri di Fisica delle Alte Energie

Test del Modello Standard ad alte energie: l'angolo di mixing debole

Clara Lavinia Del Pio
Università di Pavia - INFN Pavia



arXiv:2302.10782 [hep-ph]

S. Amoroso, M. Chiesa, E. Lipka, F. Piccinini,
F. Vazzoler, A. Vicini



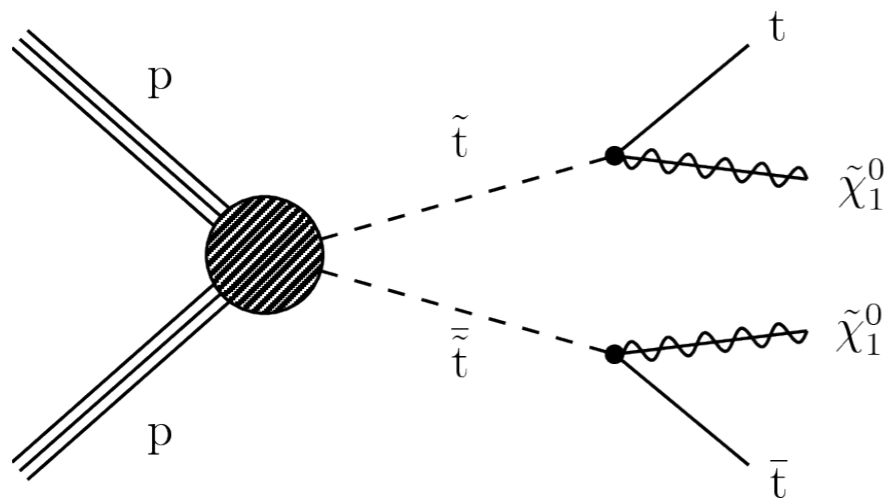
Test del Modello Standard...

Fisica oltre il Modello Standard: la duplice via

Il MS sembra descrivere bene la realtà... e ora?

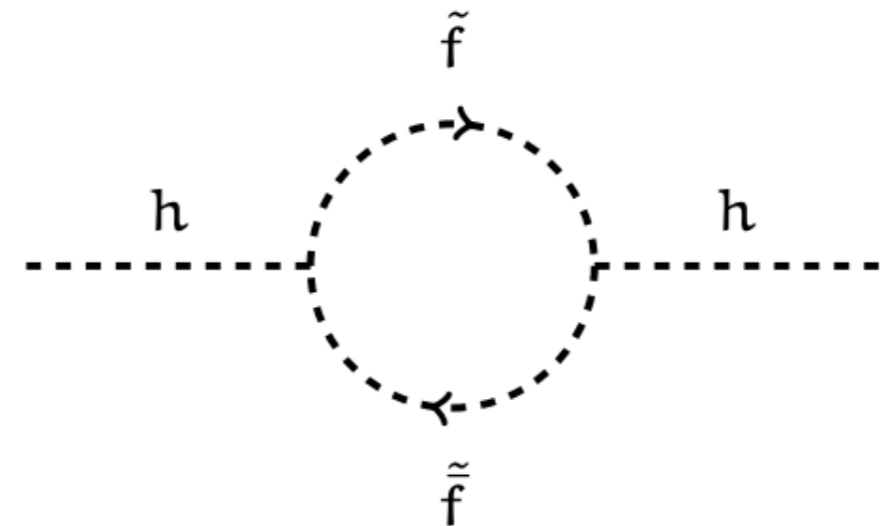
- Test di consistenza della teoria
- Ricerca di possibile fisica oltre il Modello Standard

Osservazioni dirette



→ Frontiera dell'energia

Effetti indiretti (virtuali)



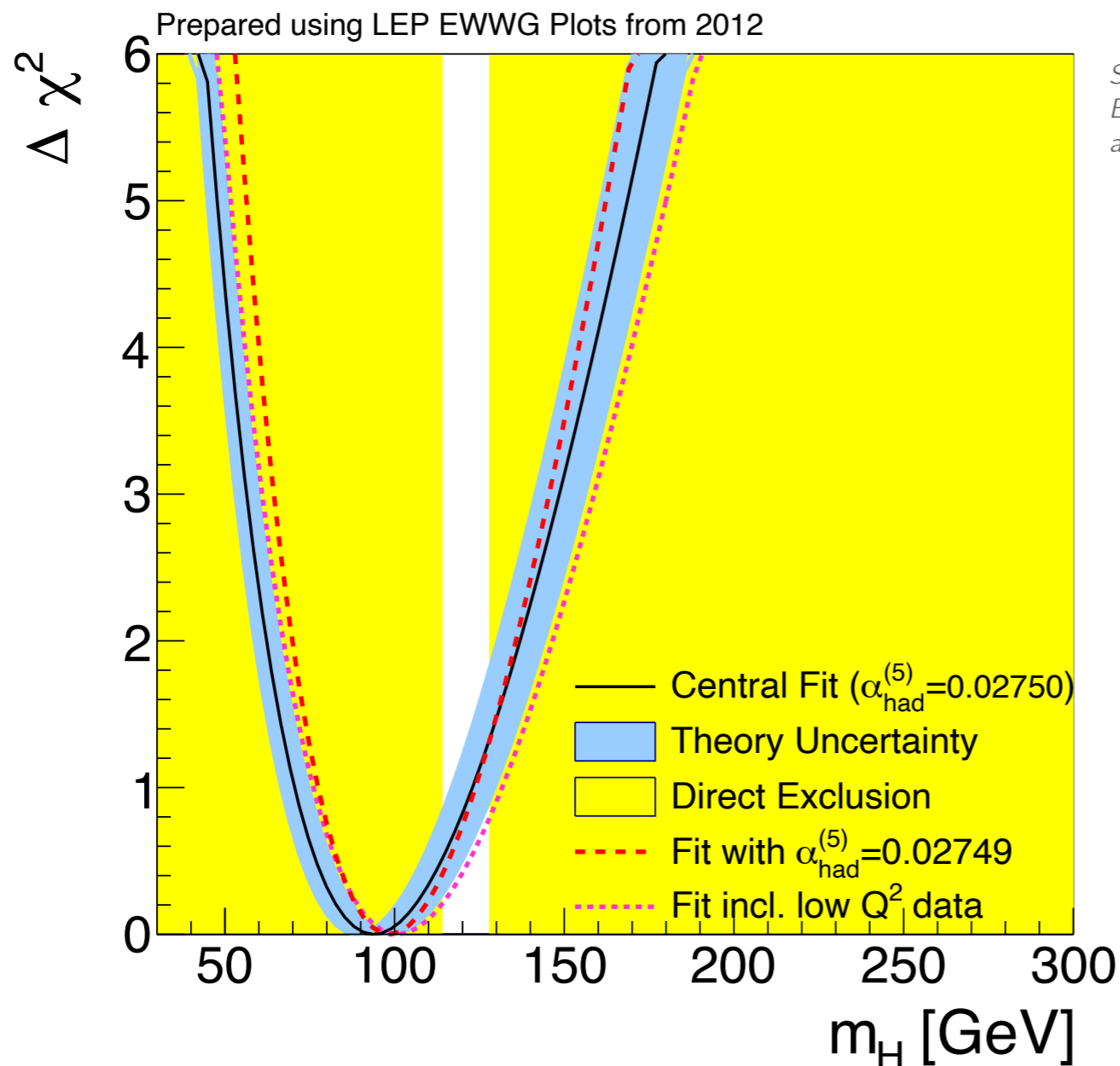
→ Frontiera dell'intensità

Fit elettrodebole globale

Un successo dalla storia

Fit globale delle previsioni del Modello Standard sui dati

Predizione di parametri a LEP, es. massa del bosone di Higgs e del quark top



Schael, S., et al., *Phys. Rept.* 427, 257 (2006)
Eler, J., Schott, M., *Progr. in Part. and Nucl. Phys.* 106 (2019) 68-119

$$\Delta\chi^2(m_H) = \chi_{\text{min}}^2(m_H) - \chi_{\text{min}}^2$$

$$\Delta\chi^2 = 2.7 \rightarrow 95\% \text{ CL}$$

upper limit

e.g. $m_H < 190$ GeV

Test di precisione a LHC

Fisica di precisione ai collider adronici

Anche ai collider adronici è possibile la fisica di precisione

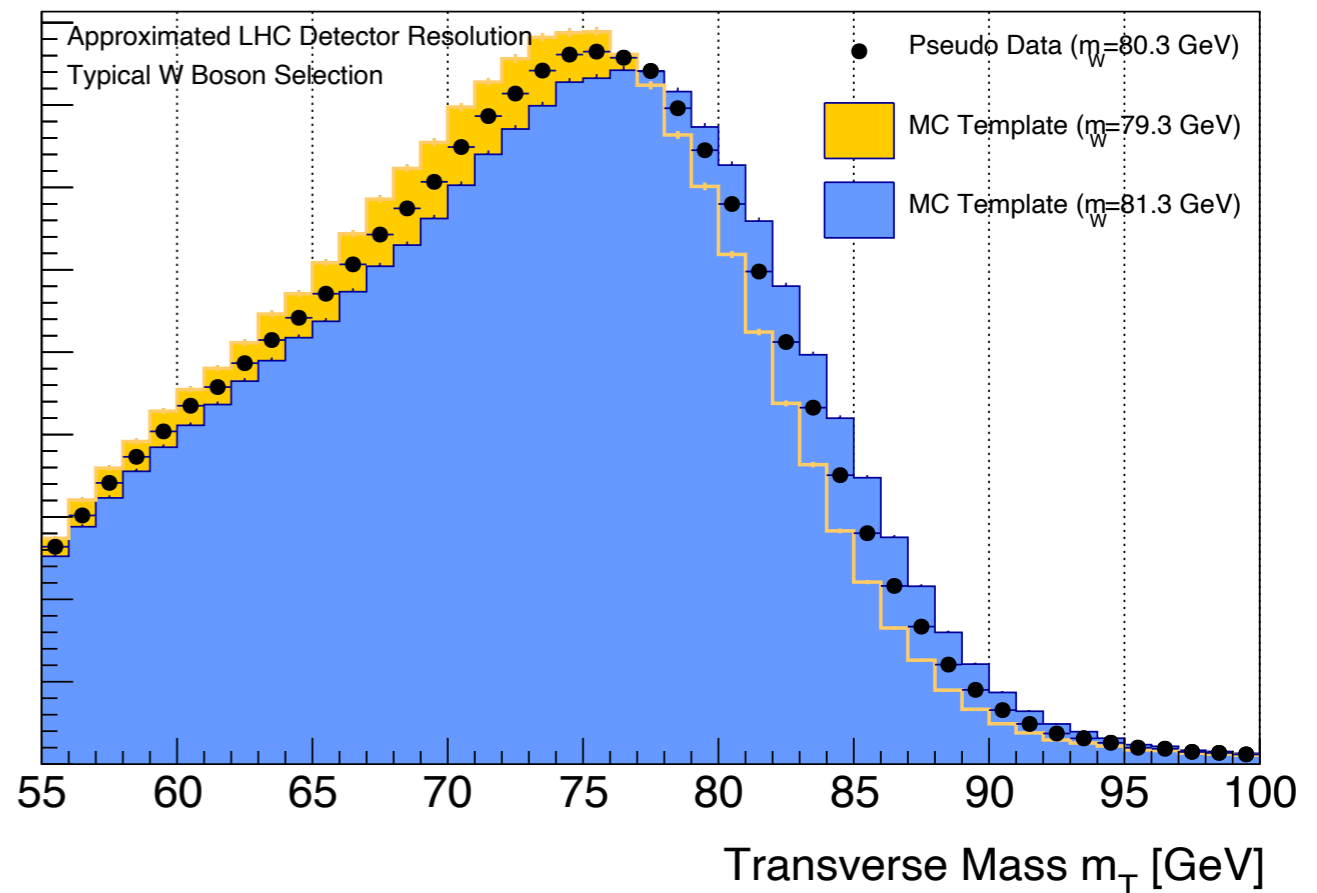
Esempi da questa sessione

misura delle proprietà del bosone di Higgs; o del quark top → G. Guerrieri
misura della massa del bosone W → D. Zuliani

Dal lato teorico

Sviluppo del calcolo perturbativo
per contributi da ordini superiori
Simulazione Monte Carlo di
precisione da confrontarsi con i dati

*Erlar, J., Schott, M., Progr. in Part.
and Nucl. Phys. 106 (2019) 68-119*





...con l'angolo di
mixing debole

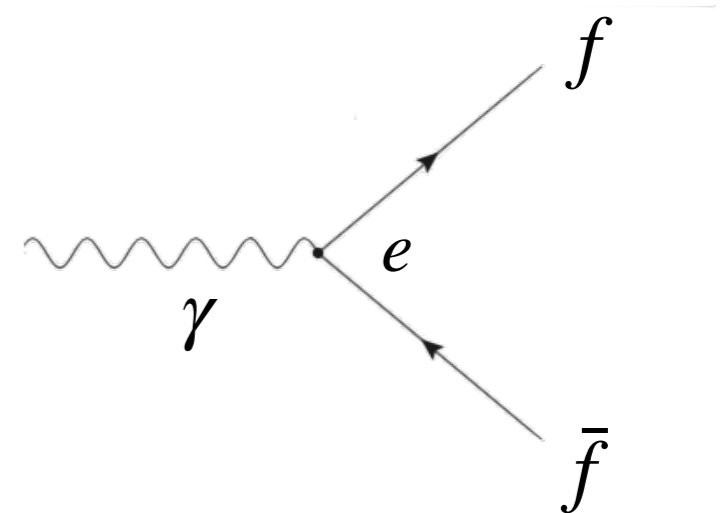
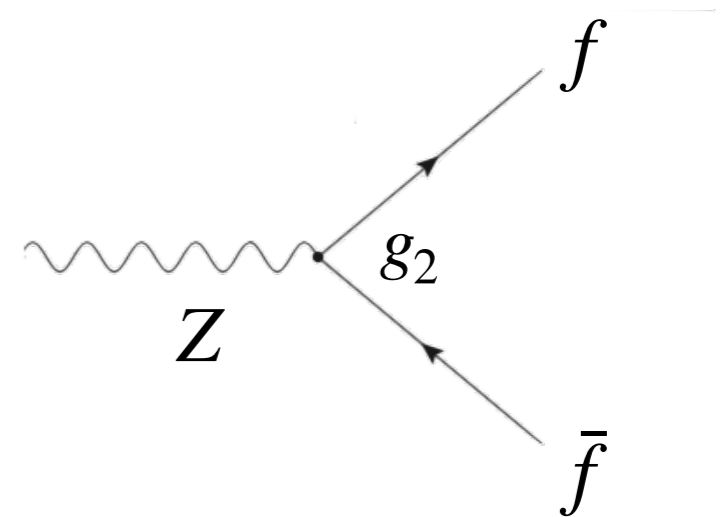
L'angolo di mixing debole

Definizioni

$$\sin \theta_w = \frac{e}{g_2} = \frac{g_1}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2}} \xrightarrow{\text{schema } \overline{MS}} \sin \theta_w^{\overline{MS}}(\mu) = \frac{e^{\overline{MS}}(\mu)}{g_2^{\overline{MS}}(\mu)}$$

Schema On-shell $\sin^2 \theta_{OS} = 1 - \frac{M_W^2}{M_Z^2}$

Effettivo (picco Z) $\sin^2 \theta_{eff} = \frac{1}{4|Q|} \left(1 - \frac{g_V}{g_A} \right)$

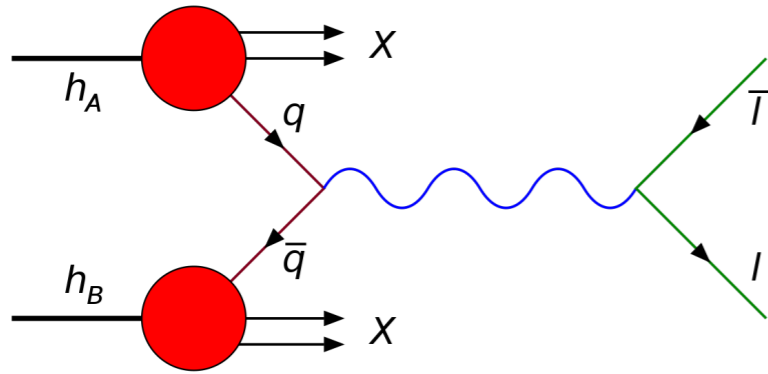


PDG (2022)

| Scheme | Notation | Value | Uncertainty |
|-------------------------|------------------|---------|---------------|
| On-shell | s_W^2 | 0.22339 | ± 0.00010 |
| \overline{MS} Z pole | \hat{s}_Z^2 | 0.23122 | ± 0.00004 |
| \overline{MS} $Q^2=0$ | \hat{s}_0^2 | 0.23863 | ± 0.00005 |
| Effective angle | \bar{s}_ℓ^2 | 0.23155 | ± 0.00004 |

L'angolo di mixing debole

Determinazione diretta di $\sin^2 \theta_{eff}^f$ alle macchine adroniche



$$\sim 1 + \cos^2 \theta_{\ell\bar{\ell}} + A_4 \cos \theta_{\ell\bar{\ell}} \quad A_4 \propto A_{FB}$$

Template fit

$A_{FB}(m_{ll}, |y_{ll}|)$
data

MC samples with different
values of $\sin^2 \theta_{eff}^f$

Measured value = MC sample
which best fit the data

La direzione del patrone entrante non è nota - sensibilità maggiore a grandi $|y_{\ell\bar{\ell}}|$ - necessario il sistema di riferimento di Collins-Soper - delicato trattamento delle PDF

→ Tevatron

CDF and DØ Collaborations, arXiv:1801.06283 [hep-ex], 2018

$$\sin^2 \theta_{eff}^{\ell} = 0.23148 \pm 0.00033$$

→ LHC

ATLAS Collaboration, Tech. Rep. ATLAS-CONF-2018-037, CERN, 2018

CMS Collaboration, arXiv:1806.00863 [hep-ex], 2018

LHCb Collaboration, arXiv:1509.07645 [hep-ex], 2015

$$\sin^2 \theta_{eff}^{\ell} = 0.23129 \pm 0.00033$$

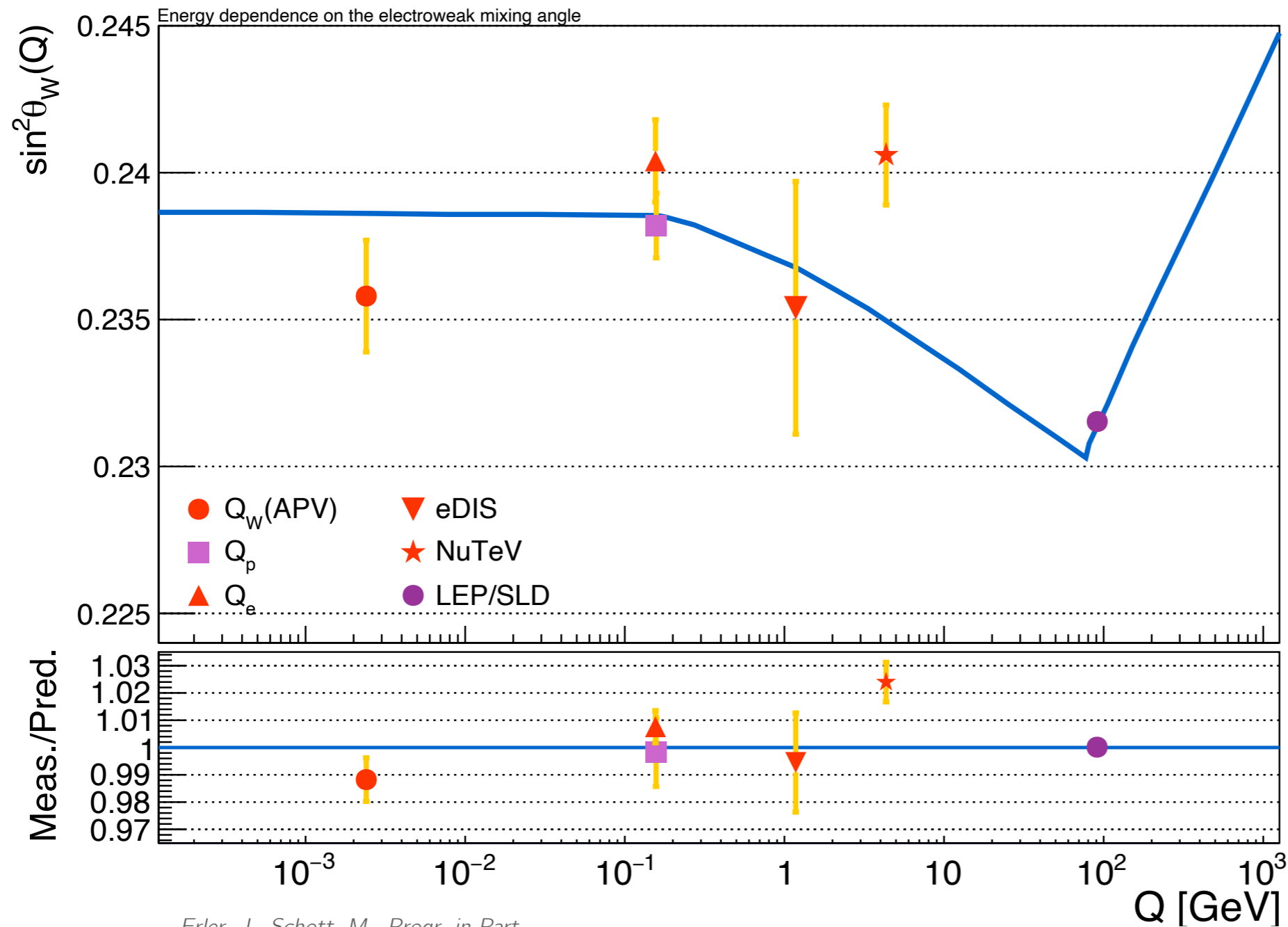
Confrontabile con LEP!



Lavori in corso nel **LHC EWWG** per quantificare **incertezze** e **problemi teorici** nell'estrazione di $\sin^2 \theta_{eff}^f$ (EW precision measurement subgroup)

Il running di $\sin^2 \theta_w^{MS}(\mu)$

Il punto di questo talk

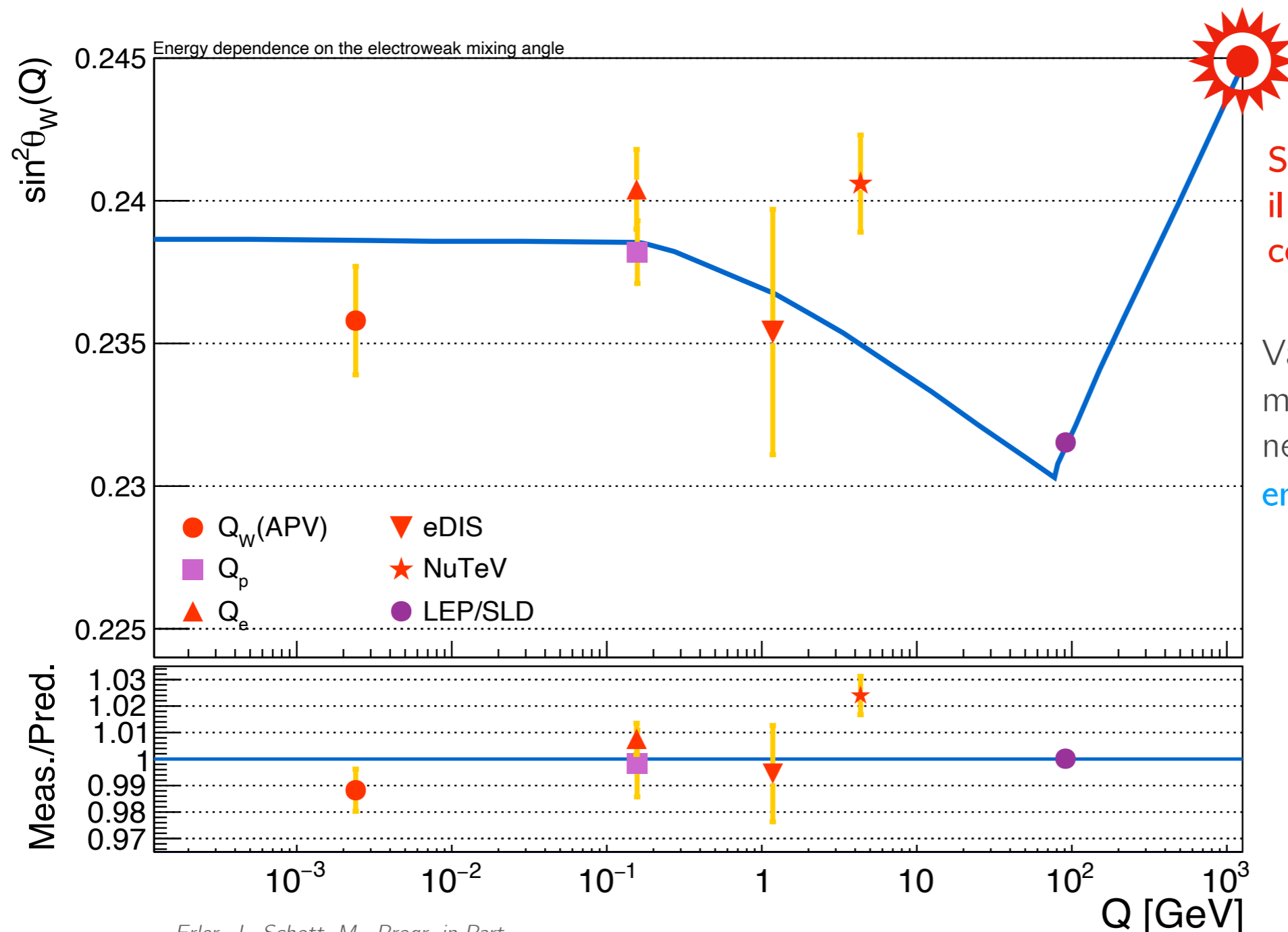


Varie misure a basso Q^2
ma **nessun risultato** sperimentale
nella regione time-like a
energie sopra M_Z !

*Erler, J., Schott, M., Progr. in Part.
and Nucl. Phys. 106 (2019) 68-119*

Il running di $\sin^2 \theta_w^{MS}(\mu)$

Il punto di questo talk



Sarebbe possibile testare il running a alta energia con LHC?

Varie misure a basso Q^2 ma **nessun risultato** sperimentale nella regione time-like a **energie sopra M_Z** !

Erlar, J., Schott, M., Progr. in Part. and Nucl. Phys. 106 (2019) 68-119

Il running in POWHEG

Implementazione del running NLO nel Monte Carlo

Chiesa, M., CD, Piccinini, F., in preparation

Implementazione **NLO** del **running delle costanti di accoppiamento** nel pacchetto **Z_EW-BMNNPV** di POWHEG-BOX-V2, produzione di eventi LHE

Barzé, L., et al., Eur. Phys. J. C 73 (6) (2013) 2474

Il running in POWHEG

Implementazione del running NLO nel Monte Carlo

Chiesa, M., CD, Piccinini, F., in preparation

Implementazione NLO del **running delle costanti di accoppiamento** nel pacchetto **Z_EW-BMNNPV** di POWHEG-BOX-V2, produzione di eventi LHE

Barzé, L., et al., Eur. Phys. J. C 73 (6) (2013) 2474

schema di rinormalizzazione usato è “ibrido” $(\alpha(\mu), \sin^2 \theta_w^{\overline{MS}}(\mu), M_Z)$

avere $\sin^2 \theta_w^{\overline{MS}}(\mu)$ in input ne permette una **determinazione diretta consistente** a NLO nel Modello Standard

Il running in POWHEG

Implementazione del running NLO nel Monte Carlo

Chiesa, M., CD, Piccinini, F., in preparation

Implementazione NLO del **running delle costanti di accoppiamento** nel pacchetto **Z_EW-BMNNPV** di POWHEG-BOX-V2, produzione di eventi LHE

Barzé, L., et al., Eur. Phys. J. C 73 (6) (2013) 2474

schema di rinormalizzazione usato è “ibrido” $(\alpha(\mu), \sin^2 \theta_w^{\overline{MS}}(\mu), M_Z)$

avere $\sin^2 \theta_w^{\overline{MS}}(\mu)$ in input ne permette una **determinazione diretta consistente** a NLO nel Modello Standard

ordini superiori nel running disponibili come opzioni nel codice

Erlar, J., Ramsey-Musolf, M. J., Phys. Rev. D 72 (2005) 073003

possibilità di disaccoppiare W e top e di accendere/spegnere le correzioni di soglia in corrispondenza delle masse di W e top

Strategia di analisi

Studio di sensibilità

- Osservabile usata: $\frac{d^3\sigma}{dm_{\ell\bar{\ell}} dy_{\ell\bar{\ell}} d\cos\theta_{CS}}$
- 2 scenari: **Run 3** (300 fb⁻¹) e **HL-LHC** (3000 fb⁻¹)
- $m_{\ell\bar{\ell}}$: [116, 150, 200, 300, 500, 1500, 5000] GeV
 $|y_{\ell\bar{\ell}}|$: [0.0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0, 2.5]
2 bin in $\cos\theta_{CS}$ per le direzioni in avanti/indietro

- Selezione fiduciale per **scenario realistico** $p_T^\ell > 40$ (30) GeV, $|\eta_\ell| < 2.5$

CMS Collab., Eur. Phys. J. C 78 (9) (2018) 701

- Disaccoppiamento, nessuna correzione di soglia nel running
Schema a masse complesse per trattare risonanza

Sjöstrand, T., et al., Comput. Phys. Commun. 191 (2015) 159-177

Denner, A., et al., Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 160 (2006) 22-26

Ball, R. D., et al., Eur. Phys. J. C 77 (10) (2017) 663

- **10⁹ eventi** a **NLOQCD+NLOEW+PS**

- NP31_nnlo_as_0118_hessian PDF con $\mu_R = \mu_F = m_{\ell\bar{\ell}}$

- Simulazione del detector con efficienze e risoluzioni leptoniche in RIVET

ATLAS Collab., Eur. Phys. J. C 79 (8) (2019) 639

ATLAS Collab., <http://cds.cern.ch/record/2047831>

Buckley, A., et al., Comput. Phys. Commun. 184 (2013) 2803-2819

Strategia di fit

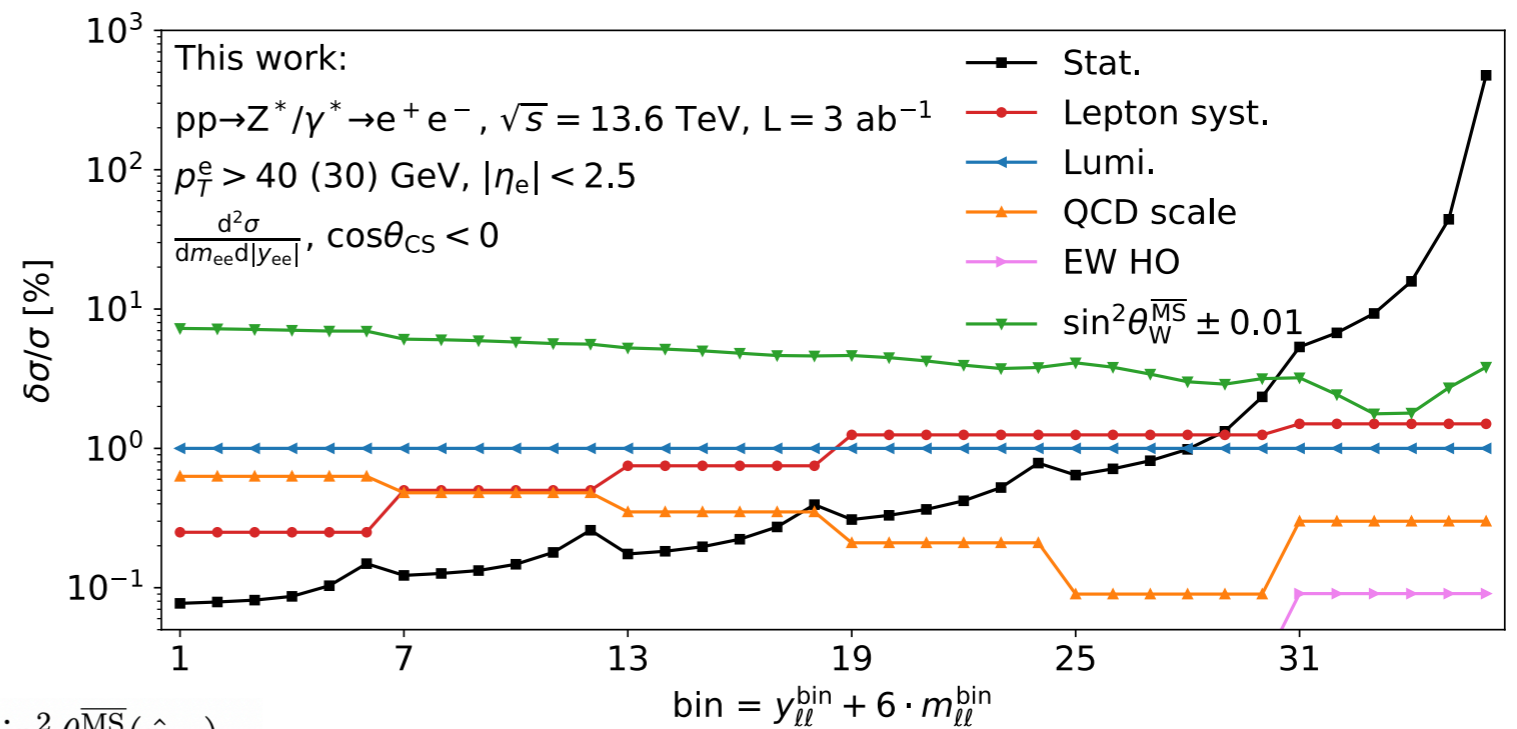
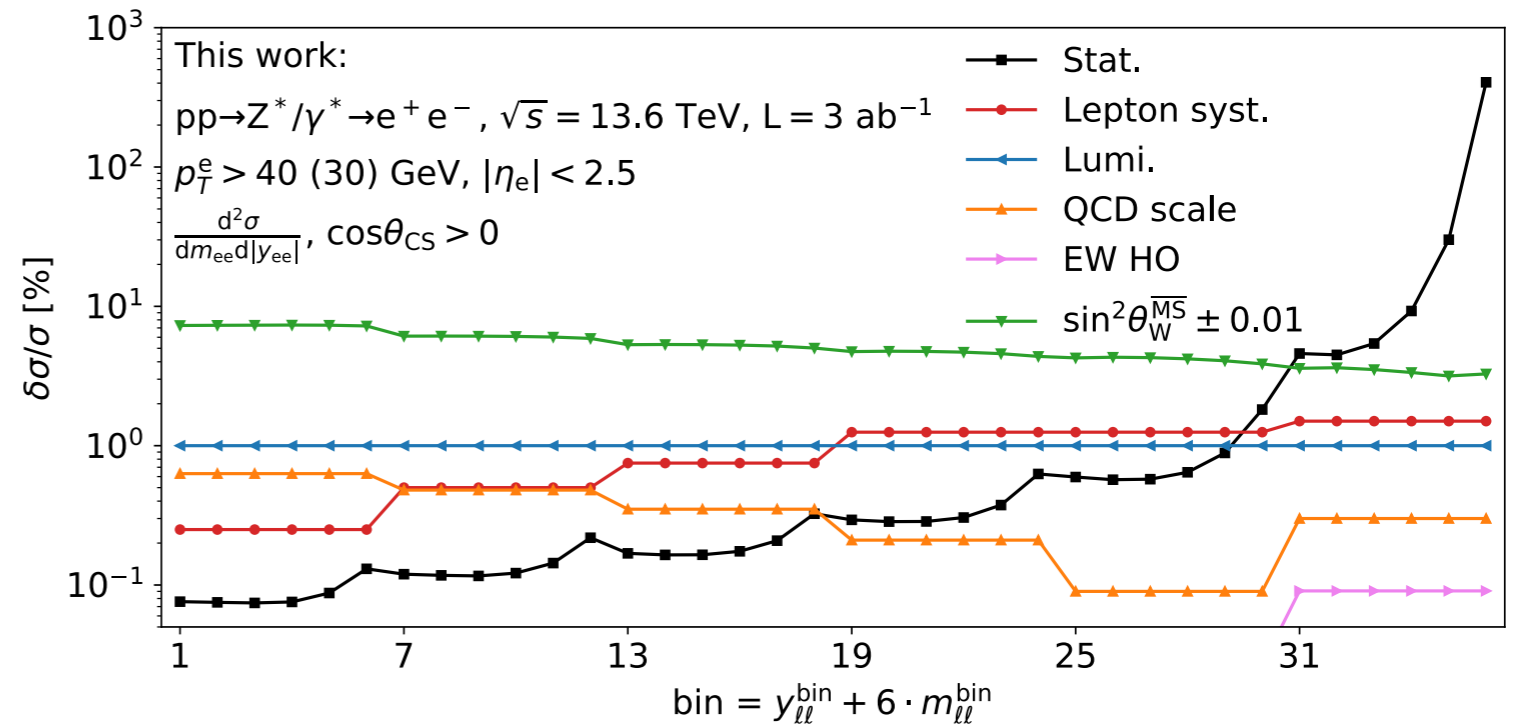
Studio di sensibilità II

- **Template** assumendo running del MS per $\alpha^{\overline{MS}}(\mu)$
 $\sin^2 \theta_w^{\overline{MS}}(\mu = \hat{m}_{\ell\bar{\ell}}) \pm 0.01$

- $\delta \sin^2 \theta_w^{\overline{MS}}(\mu)$ in ogni bin di $m_{\ell\bar{\ell}}$ nel fit (xFitter) con approx lineare

Alekhin, S., et al., Eur. Phys. J. C 75 (7) (2015) 304

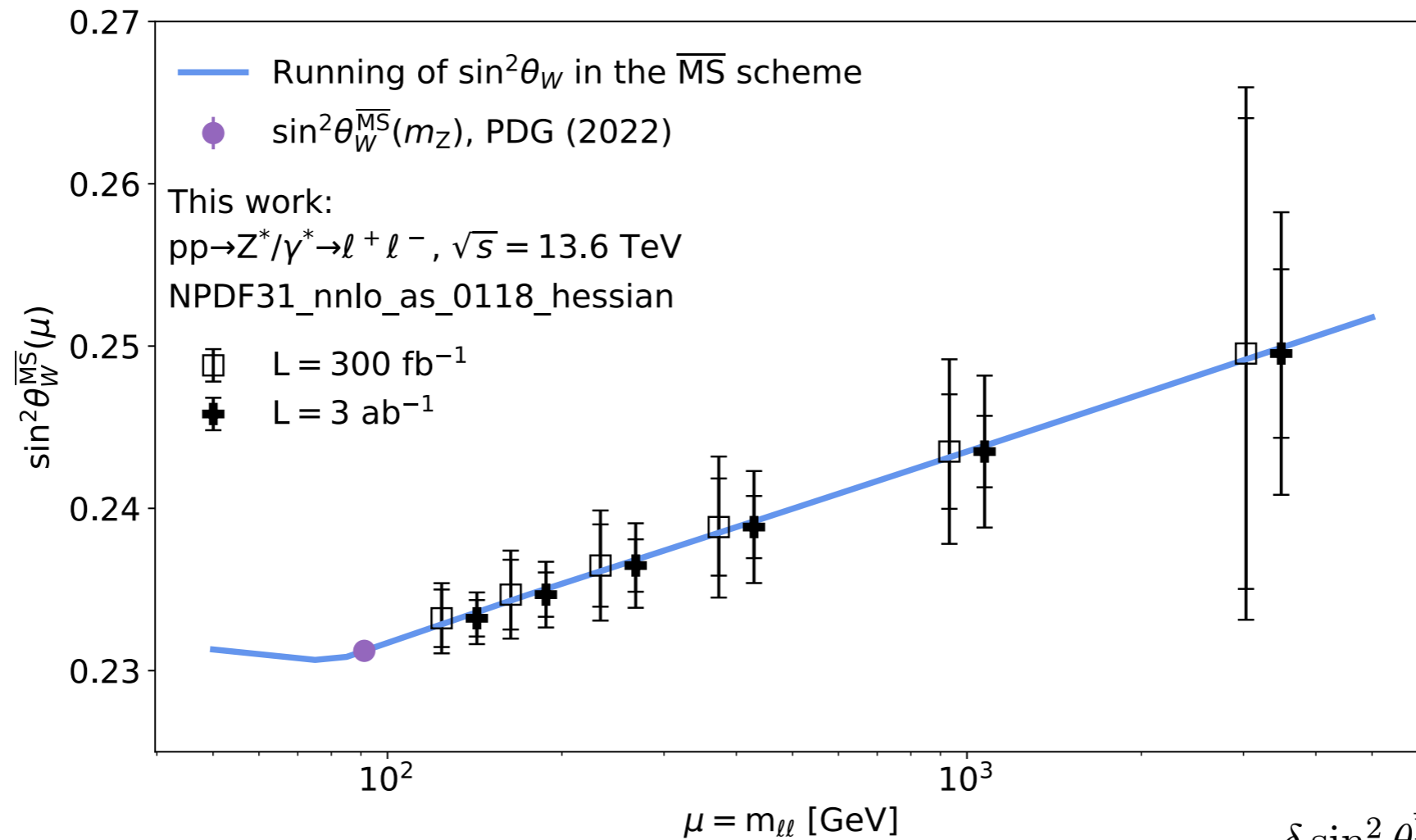
- **incertezze** incluse come **parametri di nuisance**



| $m_{\ell\bar{\ell}}^{\text{lo}}$ [GeV] | $m_{\ell\bar{\ell}}^{\text{hi}}$ [GeV] | $\hat{m}_{\ell\bar{\ell}}$ [GeV] | $(\alpha_{\text{EM}}^{\overline{MS}}(\hat{m}_{\ell\bar{\ell}}))^{-1}$ | $\sin^2 \theta_w^{\overline{MS}}(\hat{m}_{\ell\bar{\ell}})$ |
|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 66 | 116 | m_Z | 127.951 | 0.23122 |
| 116 | 150 | 133 | 127.838 | 0.23323 |
| 150 | 200 | 175 | 127.752 | 0.23468 |
| 200 | 300 | 250 | 127.544 | 0.23648 |
| 300 | 500 | 400 | 127.269 | 0.23885 |
| 500 | 1500 | 1000 | 126.735 | 0.24350 |
| 1500 | 5000 | 3250 | 126.047 | 0.24954 |

Risultati

Proiezioni sulla misura



Incertezza maggiore dovuta a PDF (regime alto x)
 fit ripetuto con 5 set diversi (1 con fotone)
 contributo a $\delta \sin^2 \theta_W^{\overline{MS}}(\mu)$ varia significativamente

| $\hat{m}_{\ell\ell}$ [GeV] | $\delta \sin^2 \theta_W^{\overline{MS}}(\hat{m}_{\ell\ell})$ [%] | |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------|---------|
| | NNPDF31 | NNPDF40 |
| 133 | 0.5 | 0.3 |
| 175 | 0.6 | 0.4 |
| 250 | 0.8 | 0.5 |
| 400 | 1.2 | 0.6 |
| 1000 | 1.6 | 0.8 |
| 3250 | 2.7 | 1.6 |

In breve

Grazie per l'attenzione... Domande?

Studio di sensibilità dei **dati di LHC al running di $\sin^2 \theta_w$ a NLO a alta energia**, che rappresenta un **test cruciale** per il Modello Standard

Codice **Monte Carlo** con **$\sin^2 \theta_w^{\overline{MS}}(\mu)$ in input** ne permette la determinazione diretta a NLO ai collider adronici

LHC e HL-LHC potrebbero misurare il running di $\sin^2 \theta_w$ con una **precisione di qualche %** fino a 3 TeV, assumendo SM running per $\alpha(\mu)$

Incertezza grande dovuta alle PDF - ridotta in fit di PDF futuri

Prossimo step: estensione dell'analisi includendo altre osservabili