



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MILANO



Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

SPIF: Studio di Precisione delle Interazioni Fondamentali

Alessandro Vicini

University of Milano, INFN Milano

Consiglio di Sezione INFN Milano, 14 luglio 2022

Struttura nazionale

4 sezioni: Genova (11 FTE, S. Marzani)
Milano (18 FTE, A. Vicini)
Roma 3 (10 FTE, G. Degrassi)
Torino (17 FTE, P. Torrielli)

responsabile nazionale: A. Vicini

Componenti della Sezione di Milano

UniMi: Stefano Carrazza (70%), Giancarlo Ferrera, Stefano Forte,
Raoul Röntsch, Alessandro Vicini, Marco Zaro
INFN: Claudia Frugieuele (80%)

postdocs: Juan Cruz Martinez, Simone Devoto, Felix Hekhorn, Kirill Kudashkin

dottorandi: Alessandro Candido, Niccolò Laurenti, Andrea Pasquale, Marco Rossi, Roy Stegeman, Davide Maria Tagliabue

esterni: Vito Antonelli (30%)

per un totale di 17.8 FTE

Test di Precisione del Modello Standard delle Interazioni Elettrodebole e Forte

struttura del protone

N3PDF determinazione delle densità partoniche del protone tramite reti neurali e IA

(Stefano Forte, Stefano Carrazza, Juan Cruz-Martinez, Felix Hekhorn, Alessandro Candido, Niccolò Laurenti, Andrea Pasquale, Marco Rossi, Roy Stegeman)

tecniche di risommazione a tutti gli ordini di correzioni quantistiche

risommazione di correzioni quantistiche con diversi tipi di incremento logaritmico

struttura generale dell'ampiezza, sfruttando i vincoli analitici offerti dai risultati della risommazione

(Stefano Forte, Giancarlo Ferrera)

calcolo di correzioni quantistiche di ordine superiore EW e QCD

calcolo di correzioni a ordine fisso (NLO, NNLO e N3LO) in QCD, EW o miste QCDxEW per LHC

sviluppo di strumenti di simulazione Monte Carlo

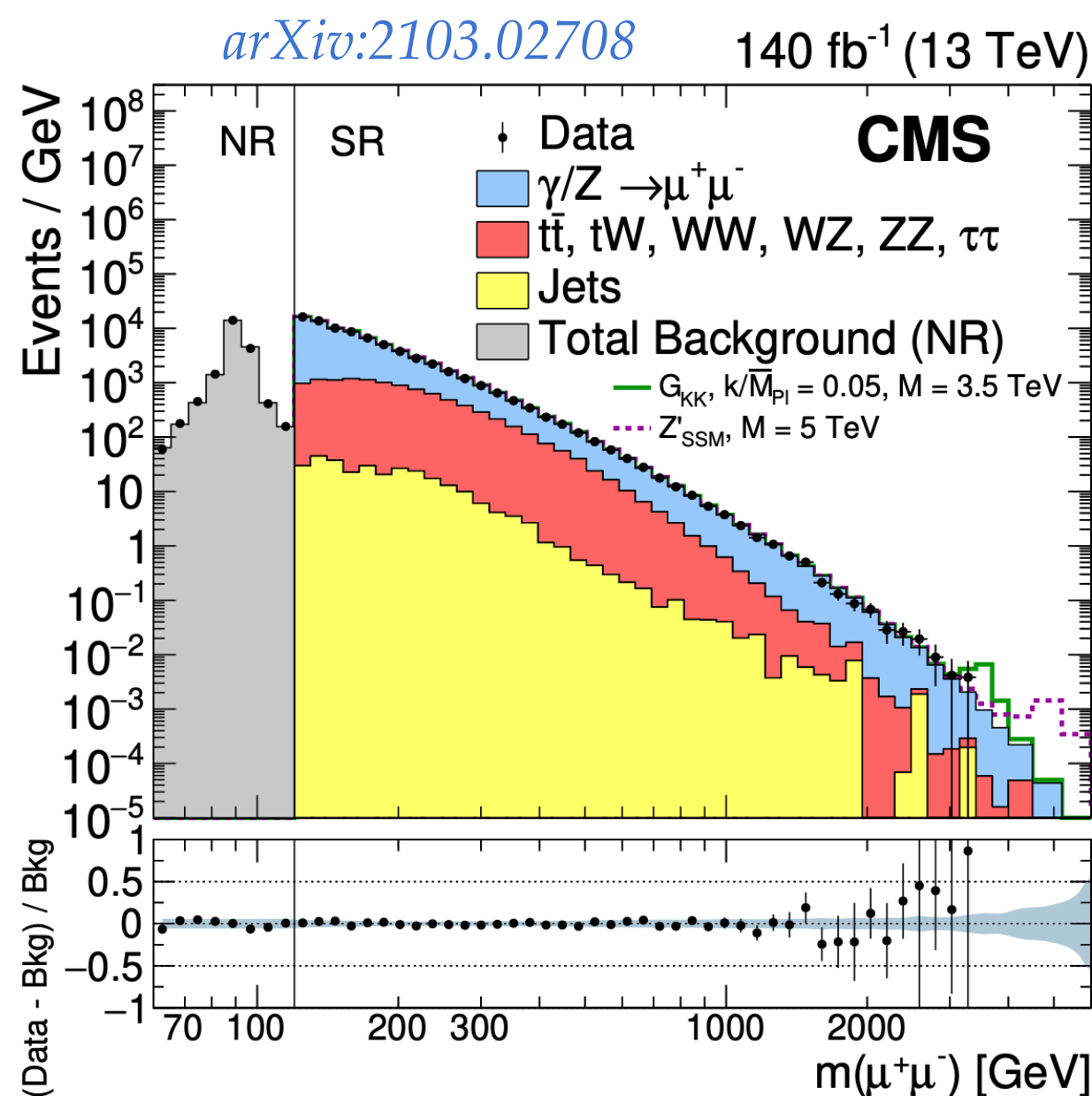
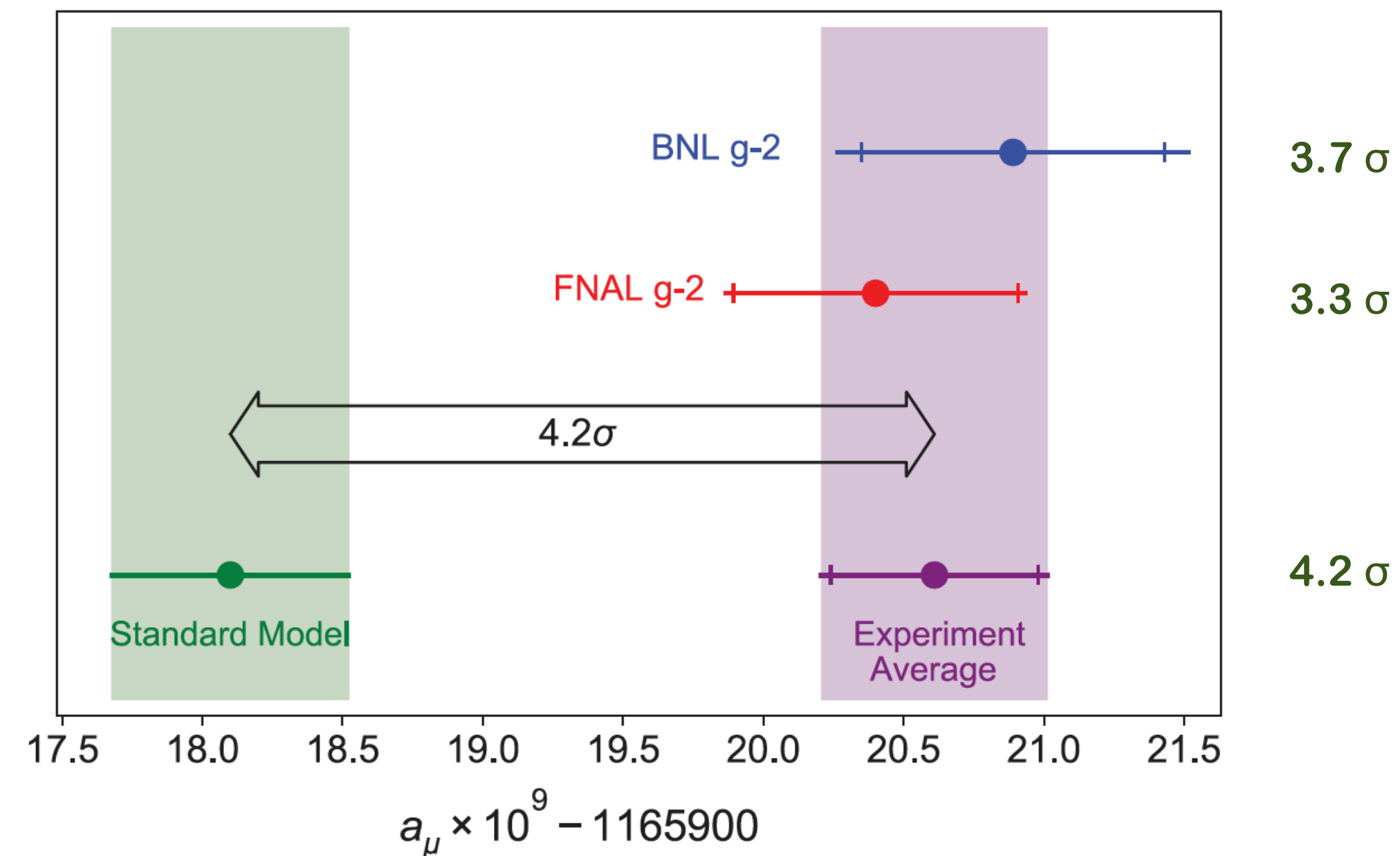
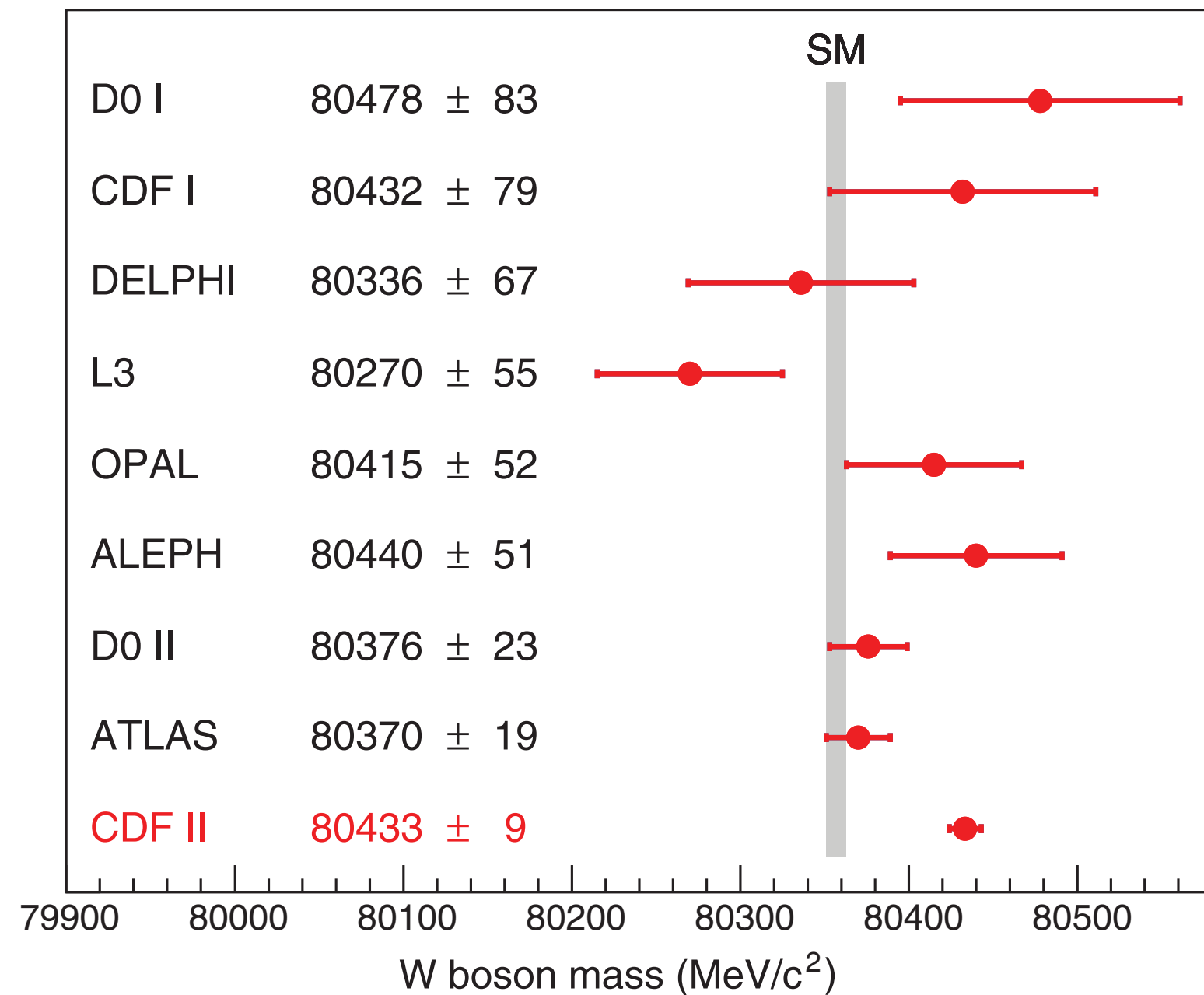
(Alessandro Vicini, Raoul Röntschi, Marco Zaro, Simone Devoto, Davide Maria Tagliabue)

estensioni del Modello Standard

modelli di materia oscura “leggera”, fisica dei neutrini

(Claudia Frugiuele, Vito Antonelli)

Motivazioni



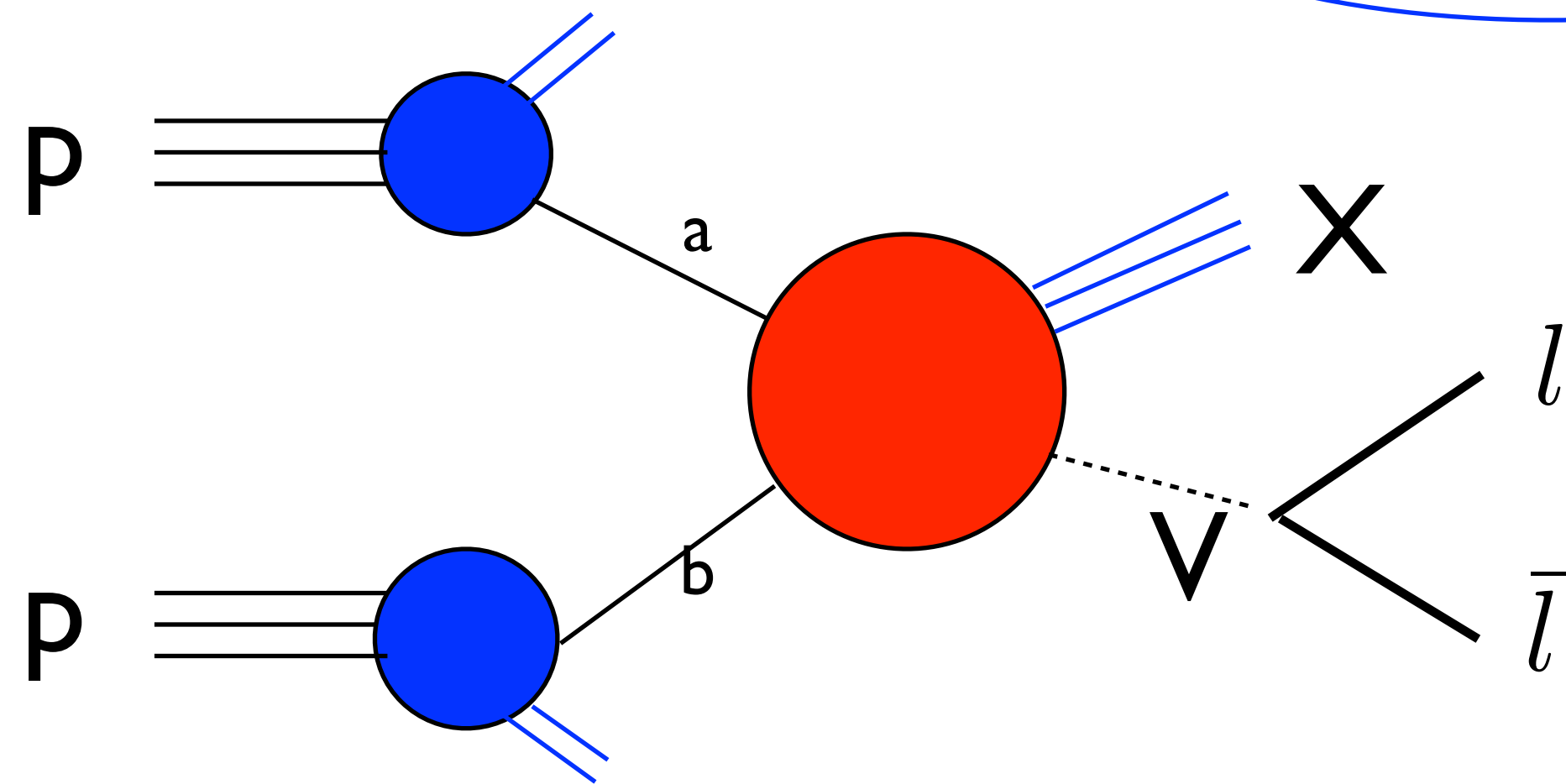
mass window [GeV]	stat. unc. 140fb ⁻¹	stat. unc. 3ab ⁻¹
600 < m _{μμ} < 900	1.4%	0.2%
900 < m _{μμ} < 1300	3.2%	0.6%

A deviation from the SM prediction can point towards New Physics

Is the SM prediction under control at the O(0.5%) level in the TeV region of the $m_{\ell\ell}$ distribution ?

Lepton-pair production at hadron colliders (theory breakdown)

$$\sigma(P_1, P_2; m_V) = \sum_{a,b} \int_0^1 dx_1 dx_2 f_{h_1,a}(x_1, M_F) f_{h_2,b}(x_2, M_F) \hat{\sigma}_{ab}(x_1 P_1, x_2 P_2, \alpha_s(\mu), M_F)$$

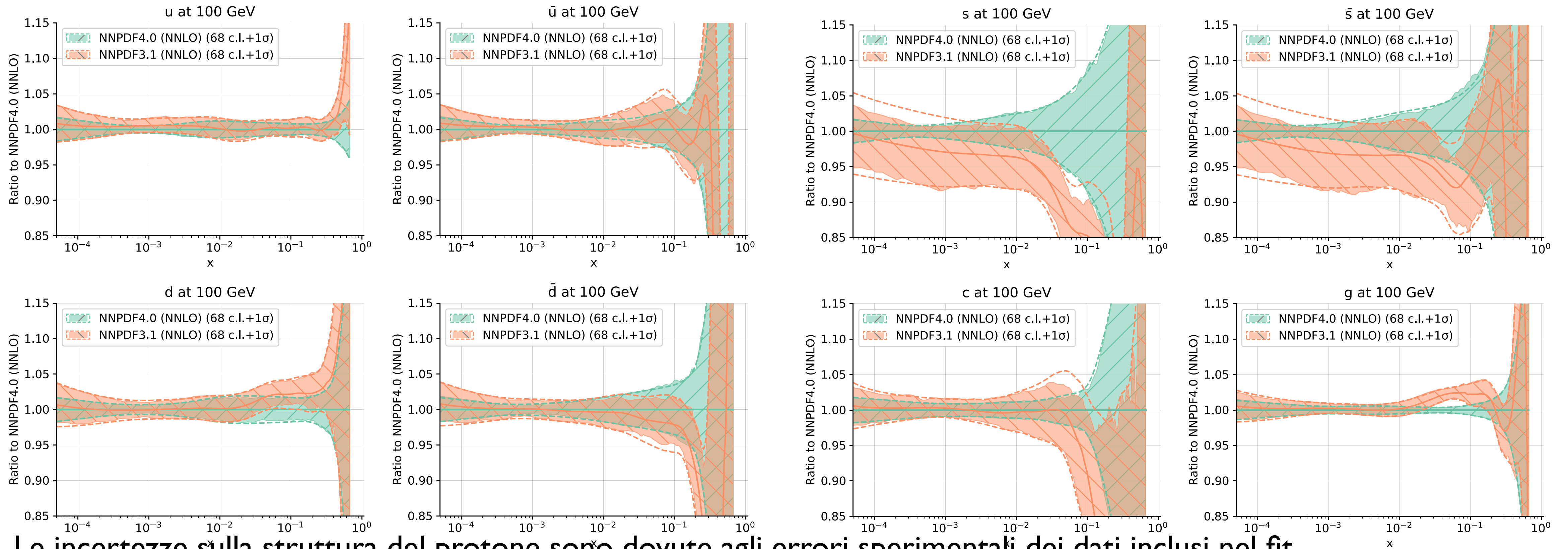


We need

- best description of the **partonic cross section** including fixed- and all-orders radiative corrections **QCD, EW, mixed QCDxEW**
- accurate and consistent description of the **QCD environment** including PDFs, intrinsic partonic k_{\perp} , QED DGLAP PDF evolution

- ▷ QCD modelling both perturbative and non-perturbative QCD contributions
 - transverse d.o.f. → gauge bosons p_{\perp}^V spectra; dependent on non-perturbative contributions at low p_{\perp}^Z
 - longitudinal d.o.f. → rapidity distributions ; affected by PDF uncertainties
- ▷ EW and mixed QCDxEW effects
 - important QED/EW corrections (mostly FSR) modulated by the underlying QCD dynamics

are our current tools adequate for the precision determination of EW parameters ?



Le incertezze sulla struttura del protone sono dovute agli errori sperimentali dei dati inclusi nel fit

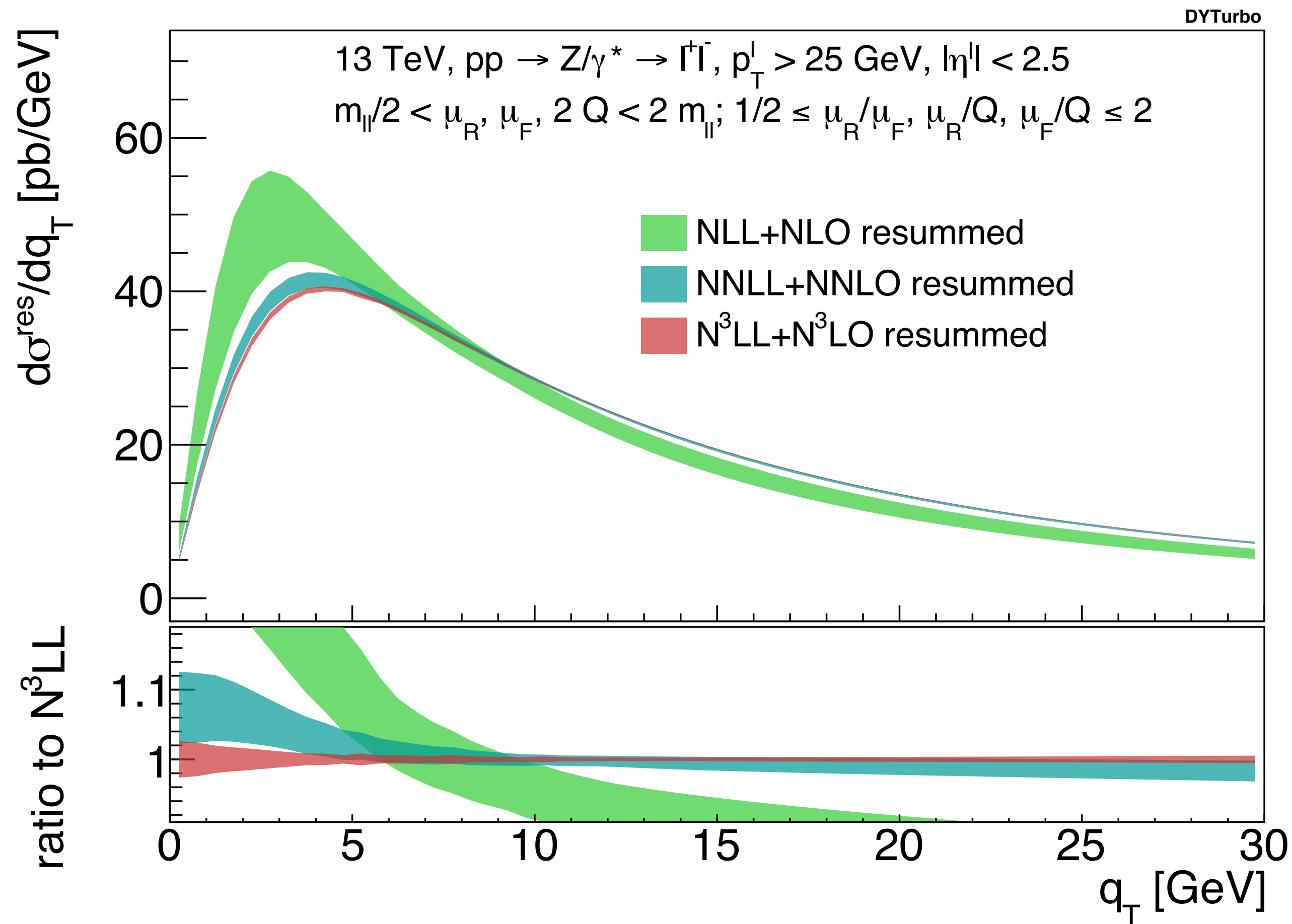
alla limitata accuratezza teorica delle formule usate nel fit

Queste incertezze si propagano alla predizione delle distribuzioni cinematiche

In ultima istanza, l'estrazione di parametri come MW risente di queste incertezze (incertezza del modello di fit)

L'utilizzo di tecniche avanzate di IA ha permesso una velocizzazione delle procedure di fit

→ l'esplorazione sistematica di intere classi di sorgenti di incertezza → miglior controllo sul fit e sulle incertezze residue

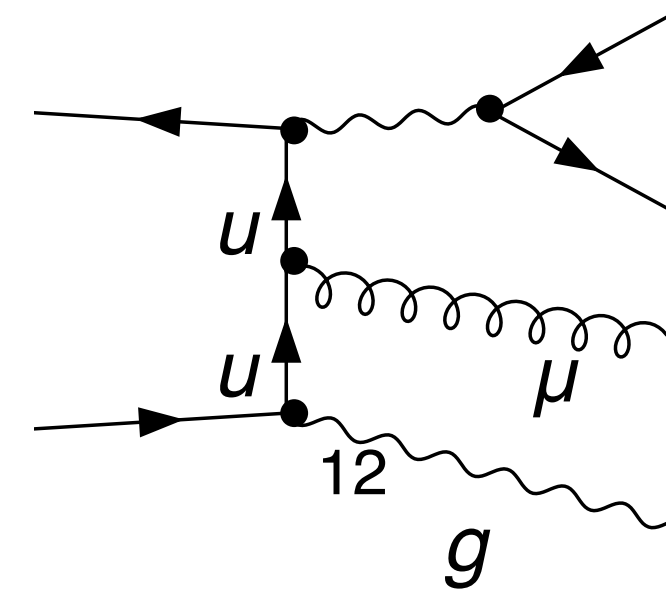


La distribuzione in impulso trasverso di un bosone di gauge è un'osservabile fondamentale in QCD:

- descrive la radiazione multipla di stato iniziale (test di QCD perturbativa)
- sensibile alla fisica dei piccoli impulsi trasversi (QCD non perturbativa e struttura del protone)

La conoscenza di questa osservabile è centrale nello studio delle distribuzioni dei leptoni da cui si estrae p.es. la massa del W

Correzioni NNLO QCDxEW al processo di Drell-Yan

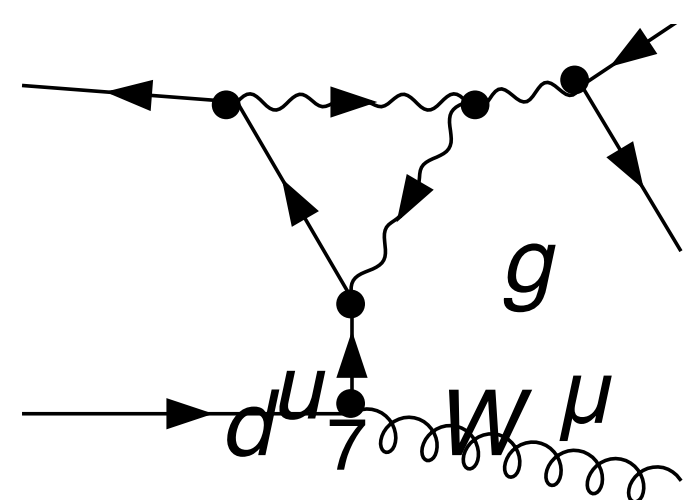


double-real contributions

amplitudes are easily generated with Madgraph

IR subtraction

care about the numerical convergence when aiming at 0.1% precision

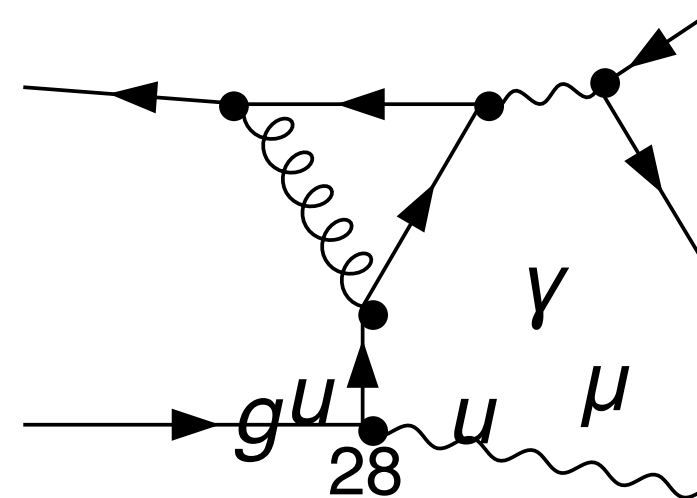


real-virtual contributions

amplitudes are easily generated with OpenLoops or Recola

1-loop UV renormalisation and IR subtraction

care about the numerical convergence when aiming at 0.1% precision



double-virtual contributions

generation of the amplitudes

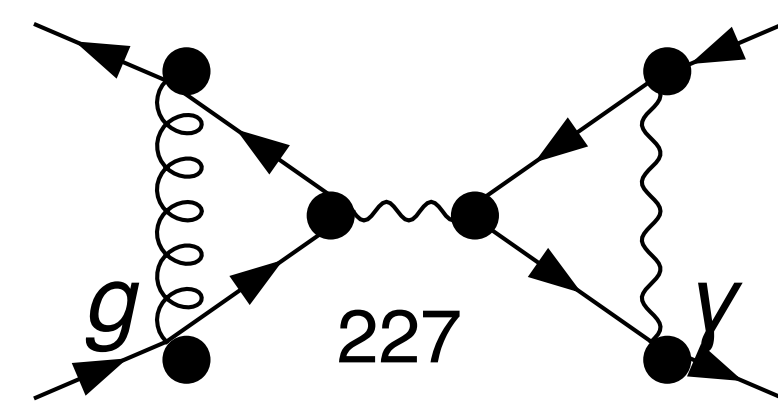
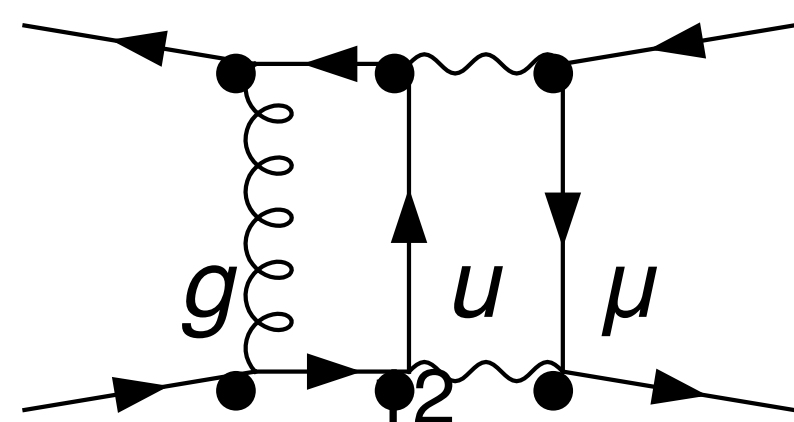
γ_5 treatment

2-loop UV renormalization

subtraction of the IR divergences

solution and evaluation of the Master Integrals

numerical evaluation of the squared matrix element



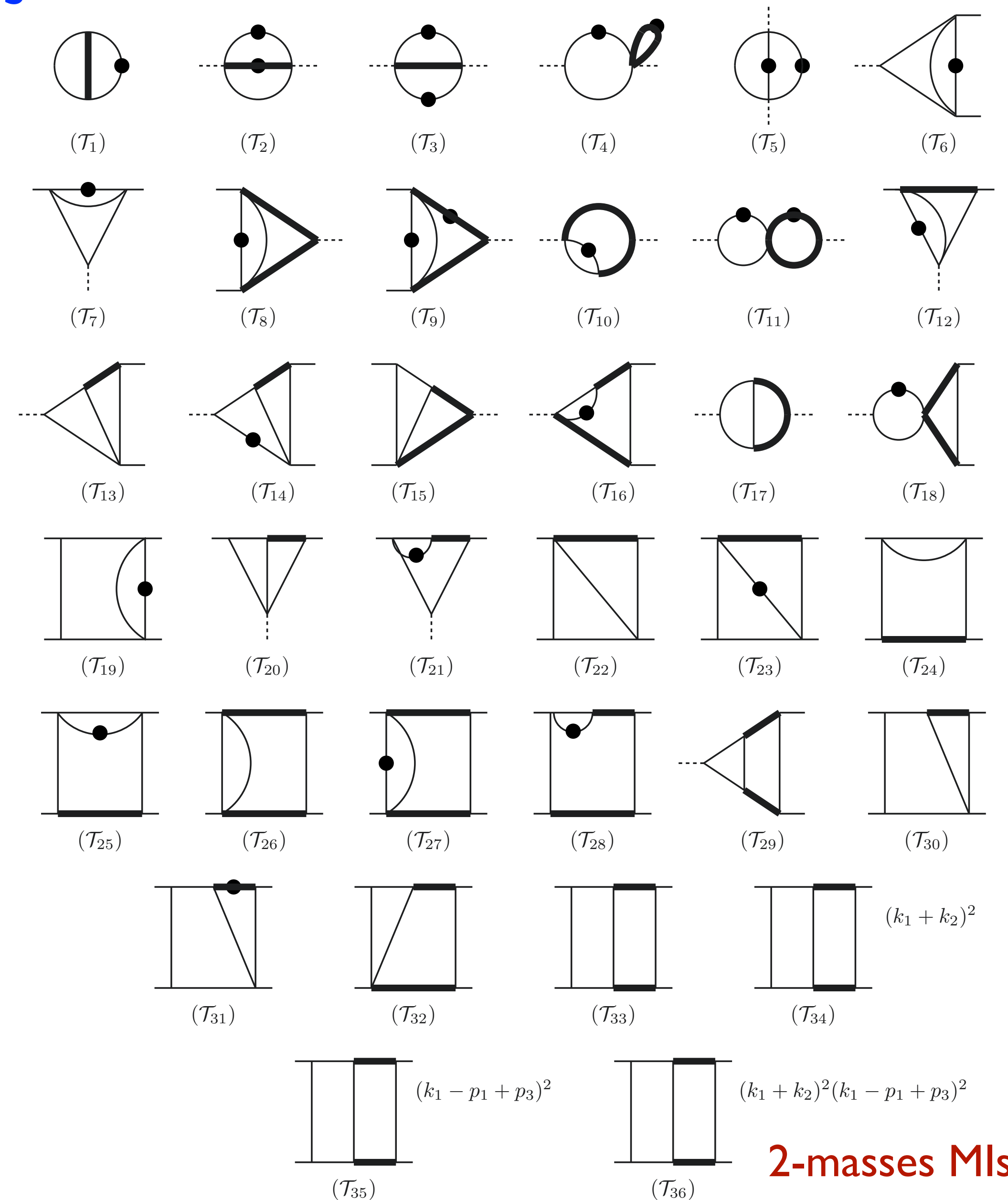
R.Bonciani, L.Buonocore, M.Grazzini, S.Kallweit, N.Rana, F.Tramontano, AV, arXiv:2106.111953

T.Armadillo, R.Bonciani, S.Devoto, N.Rana, AV, arXiv:2201.01754

F.Buccioni, F.Caola, H.Chawdhry, F.Devoto, M.Heller, A.von Manteuffel, K.Melnikov, R.Röntsch, C.Signorile-Signorile, arXiv:2203.11237

The double virtual amplitude: reduction to Master Integrals

$$2\text{Re} \left(\mathcal{M}^{(1,1)} (\mathcal{M}^{(0,0)})^\dagger \right) = \sum_{i=1}^{N_{MI}} c_i(s, t, m; \varepsilon) \mathcal{T}_i(s, t, m; \varepsilon)$$



The coefficients c_i are rational functions of the invariants, masses and of ε
 The size of the total expression can rapidly “explode” (hundreds of MB)
 → careful work to identify the patterns of recurring subexpressions
 keeping the total size in the O(1-10 MB) range

The solution of the 2-loop integrals \mathcal{T}_i is increasingly difficult
 with the number of internal energy scales and masses
 Moreover, the W and Z masses are complex-valued (unstable particles)

2-masses MIs

Evaluation of the Master Integrals by series expansions

T.Armadillo, R.Bonciani, S.Devoto, N.Rana, AV, 2205.03345

The Master Integrals satisfy a system of differential equations.

The MIs are replaced by formal series with unknown coefficients \rightarrow eqs for the unknown coefficients of the series.

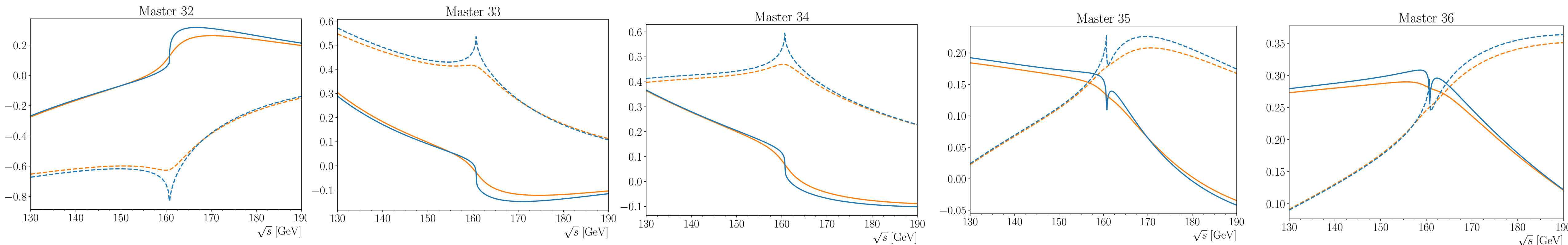
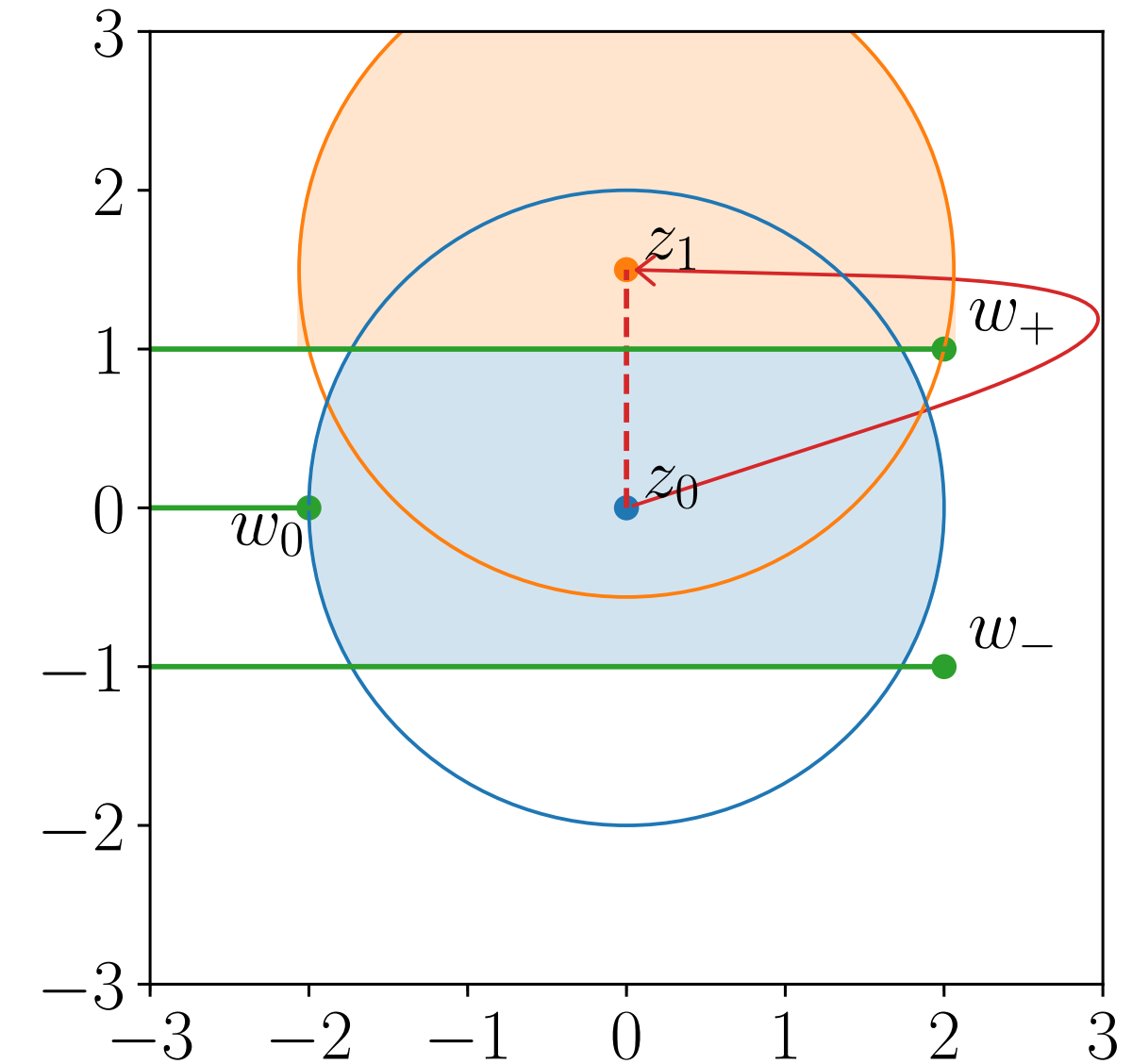
The package DiffExp by M.Hidding, arXiv:2006.05510 implements this idea, for real valued masses, with real kinematical vars.

But we need complex-valued masses of W and Z bosons (unstable particles) \rightarrow we wrote a new package (SeaSyde)

We implemented the same approach, for arbitrary complex-valued masses, working in the complex plane of each kinematical variable, one variable at a time

Complete knowledge about the singular structure of the MI can be read directly from the differential equation matrix

The solution can be computed with an arbitrary number of significant digits, but not in closed form \rightarrow semi-analytical



Phenomenology of Neutral Current Drell-Yan including exact NNLO QCD-EW corrections

R.Bonciani, L.Buonocore, S.Devoto, M.Grazzini, S.Kallweit, N.Rana, F.Tramontano, AV, arXiv:2106.11953 and work in preparation

SETUP (LHC @ $\sqrt{s} = 13.6$ TeV)

- NNPDF31_nnlo_as_0118_luxqed
- $p_{T,\mu} > 25$ GeV, $|y_\mu| < 2.5$, $66 \text{ GeV} < m_{\mu+\mu^-} < 116$ GeV
- massive muons (no photon lepton recombination)
- G_μ scheme, complex mass scheme
- fixed scale $\mu_F = \mu_R = m_Z$

G_μ -scheme	σ [pb]	$\sigma^{(i,j)}$ [pb]	$\sigma^{(i,j)}/\sigma_{\text{LO}}$
LO	763.40(2) ^{+12.7%} _{-13.6%}	—	—
NLO QCD	802.26(6) ^{+2.7%} _{-4.2%}	38.86(6)	5.1%
NNLO QCD	802.5(7) ^{+0.4%} _{-0.8%}	0.2(7)	0.0%
NLO EW	730.76(2) ^{+12.7%} _{-13.6%}	-32.65(3)	-4.3%
NNLO QCD+EW	769.8(7) ^{+0.5%} _{-0.6%}	—	—
NNLO QCD+EW+MIX _{fact}	768.2(7) ^{+0.3%} _{-0.7%}	-2.0(1)	-0.2%
NNLO QCD+EW+MIX	772.4(8) ^{+0.3%} _{-0.7%}	2.6(2)	0.3%

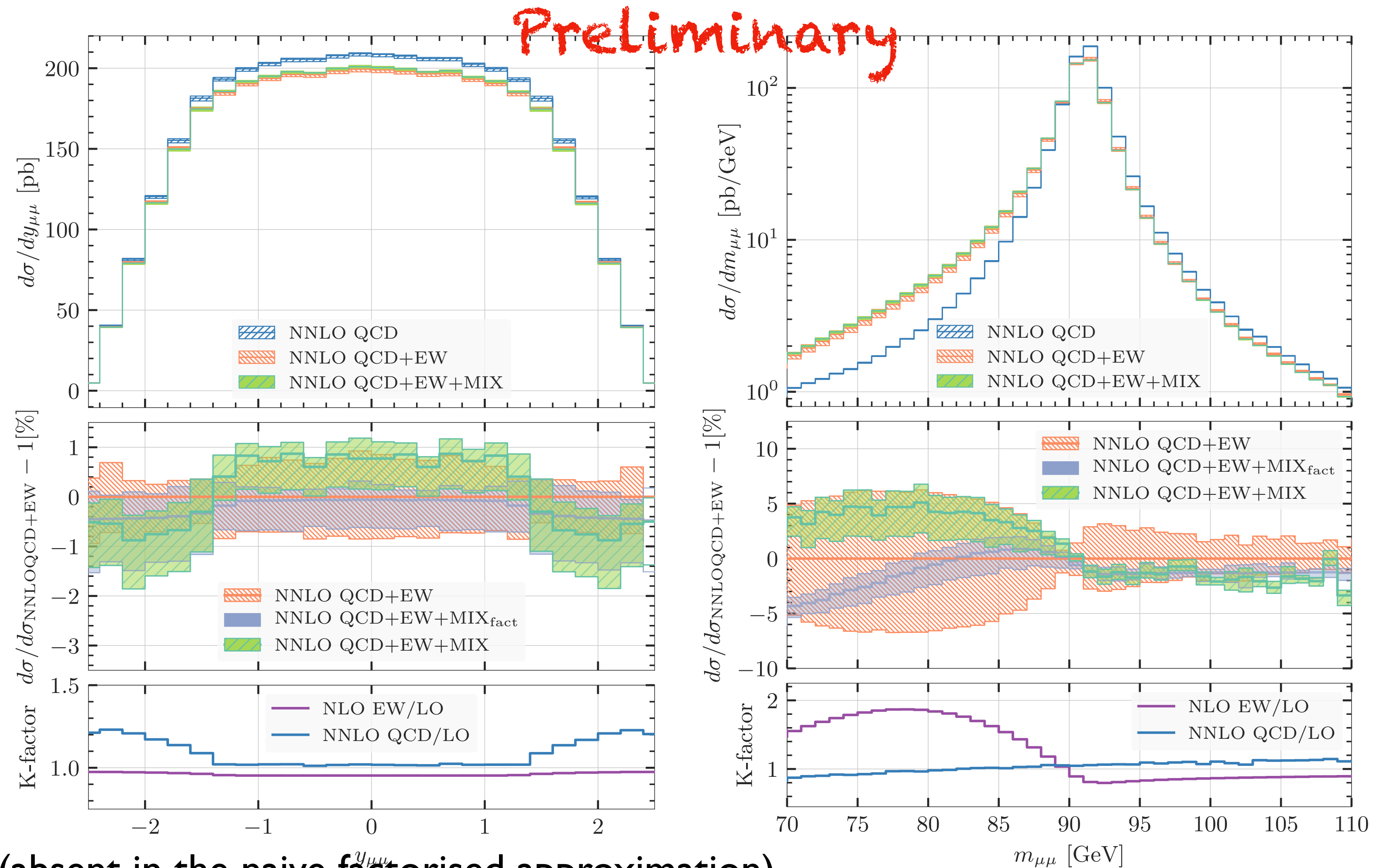
Sub-percent correction on total xsec (cfr. setup)

Non-trivial distortion of the rapidity distribution (absent in the naive factorised approximation)

Large effects below the Z resonance (the factorised approximation fails) → impact on the $\sin^2 \theta_{\text{eff}}$ determination

O(-1.5%) effects above the resonance

→ ongoing precision studies in the CERN EW WG



Phenomenology of Neutral Current Drell-Yan including exact NNLO QCD-EW corrections

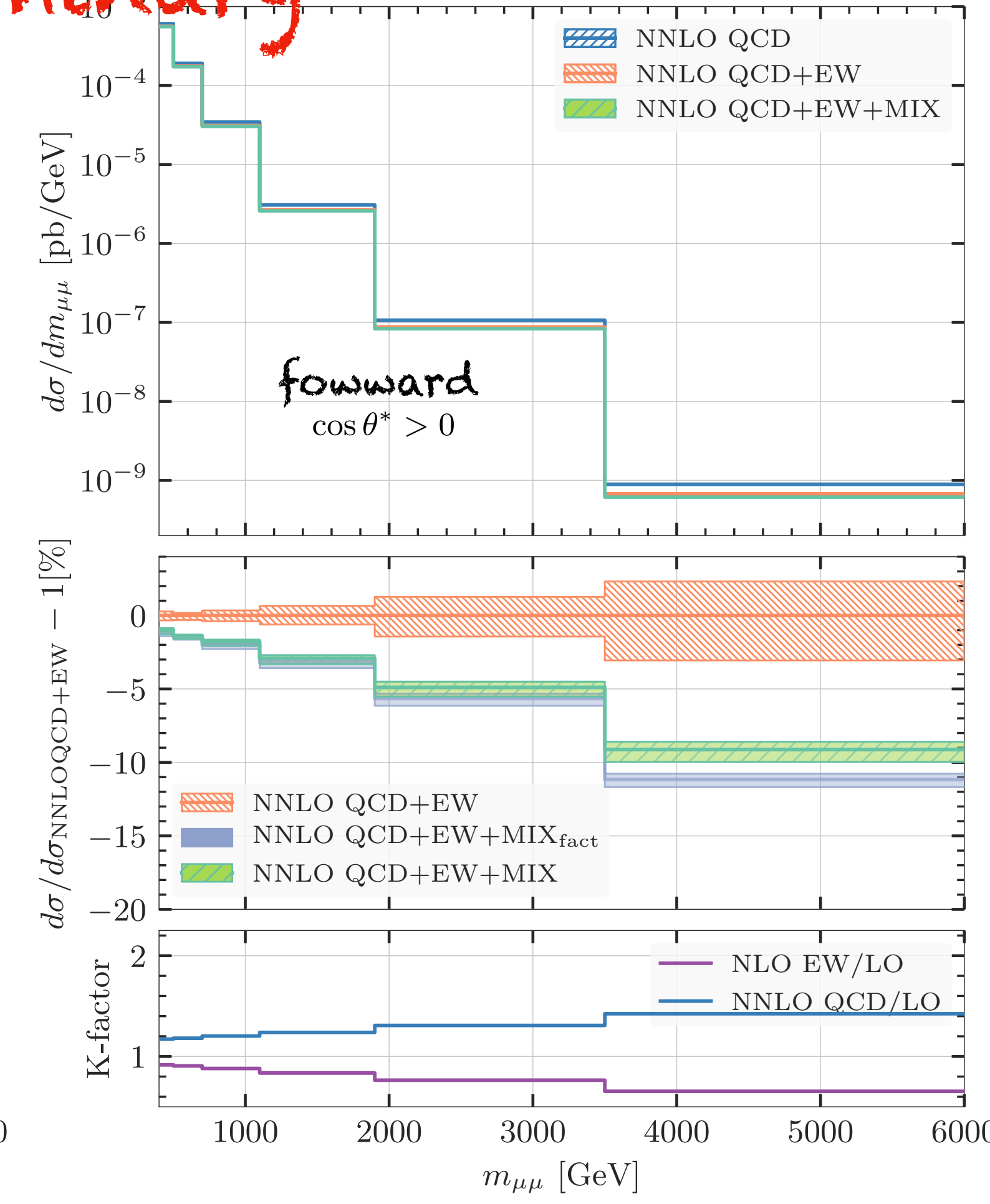
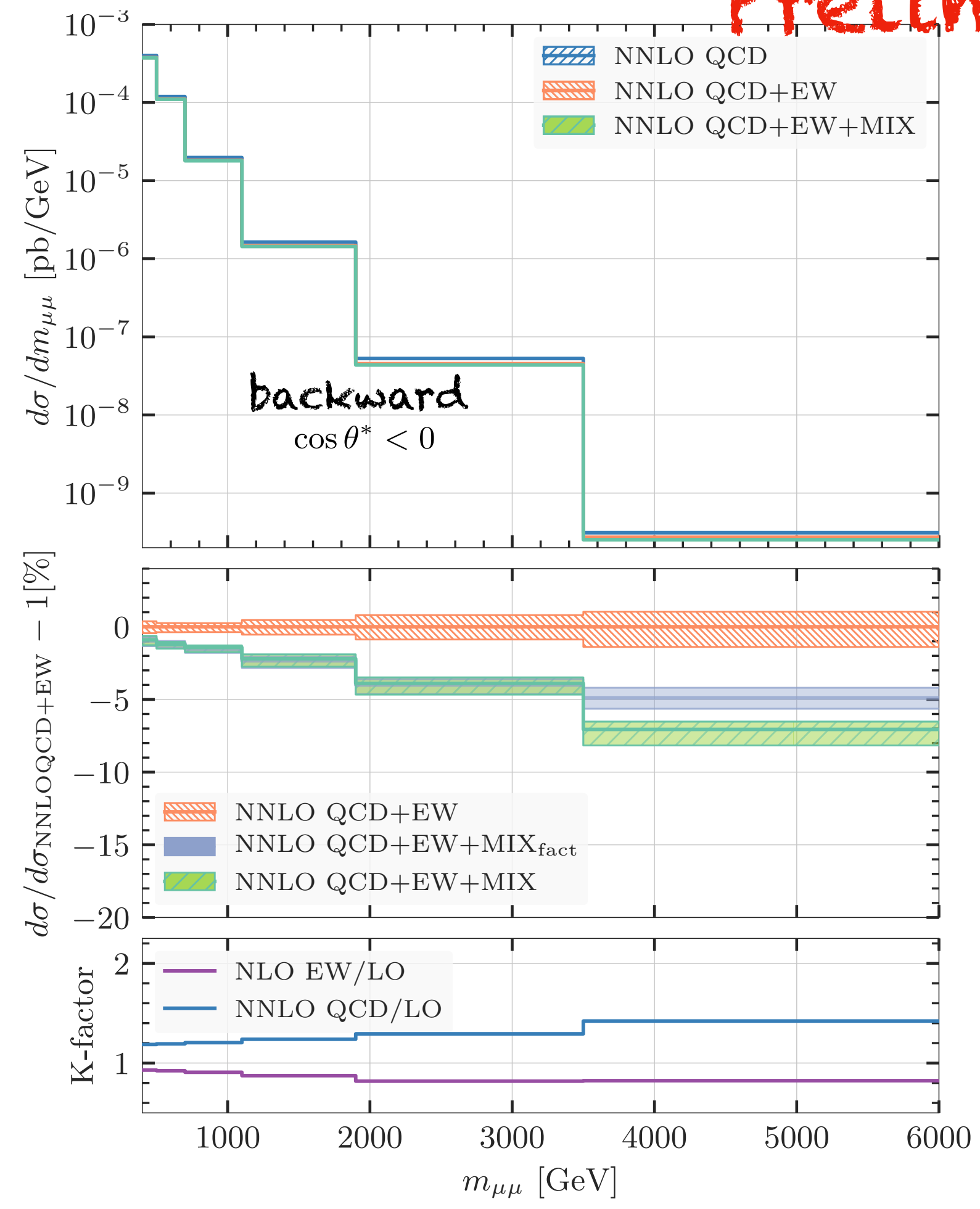
R.Bonciani, L.Buonocore, S.Devoto, M.Grazzini, S.Kallweit, N.Rana, F.Tramontano, AV, arXiv:2106.11953 and work in preparation

Preliminary

SETUP (LHC @ $\sqrt{s} = 13$ TeV)

CMS 2103.02708

- NNPDF31_nnlo_as_0118_luxqed
- $p_{T,\mu} > 53$ GeV, $|y_\mu| < 2.4$, $m_{\mu^+\mu^-} > 150$ GeV
- massive muons (no photon lepton recombination)
- G_μ scheme, complex mass scheme
- dynamic scale $\mu_F = \mu_R = m_{\mu^+\mu^-}$

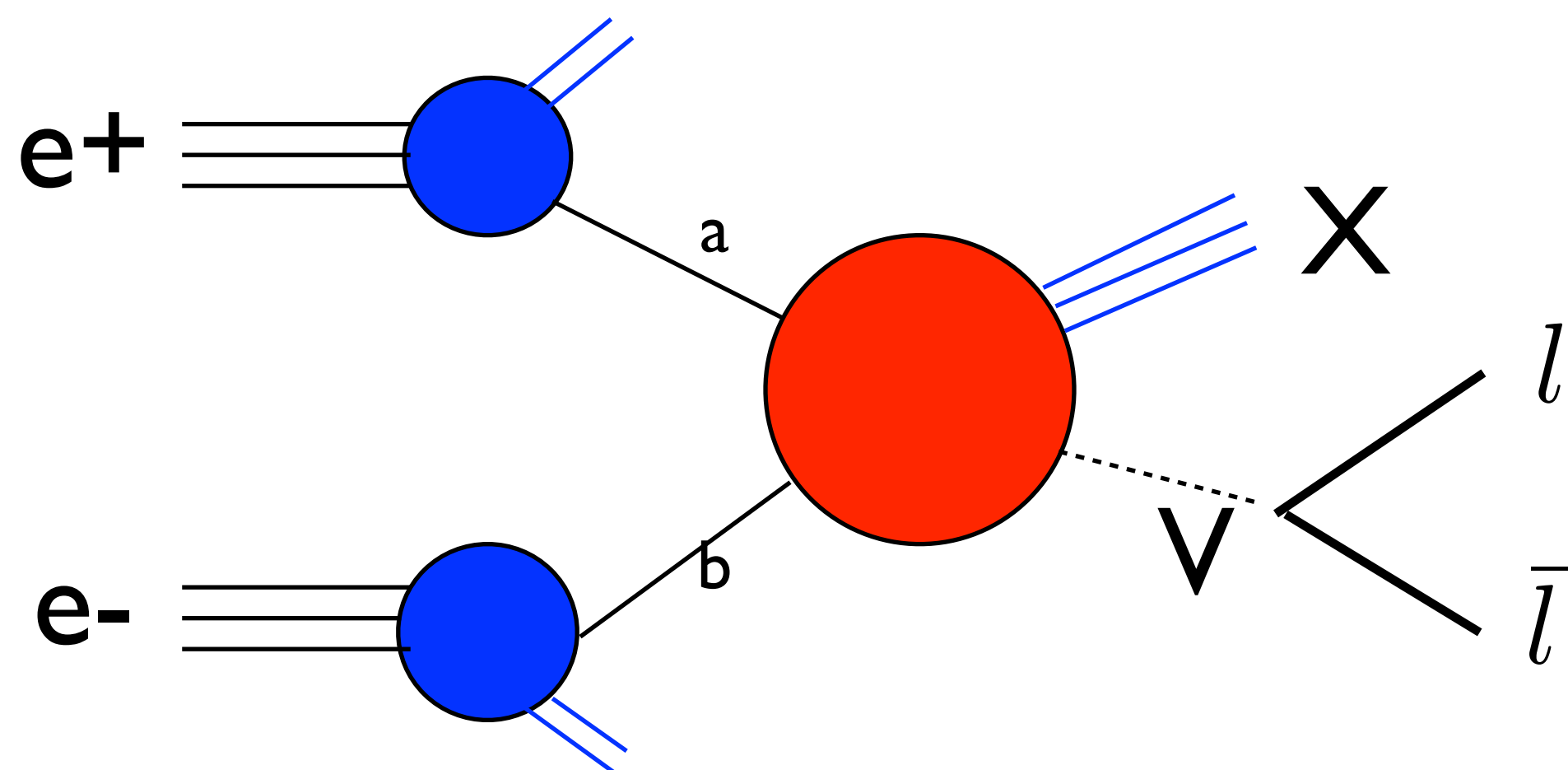


Negative mixed NNLO QCD-EW effects
(-3% or more) at large invariant masses,
absent in any additive combination

→ impact on the searches for new physics

Good accuracy
of the factorised of QCD x EW Ansatz

Scale uncertainty at most the $O(1\%)$ between 1 and 2 TeV

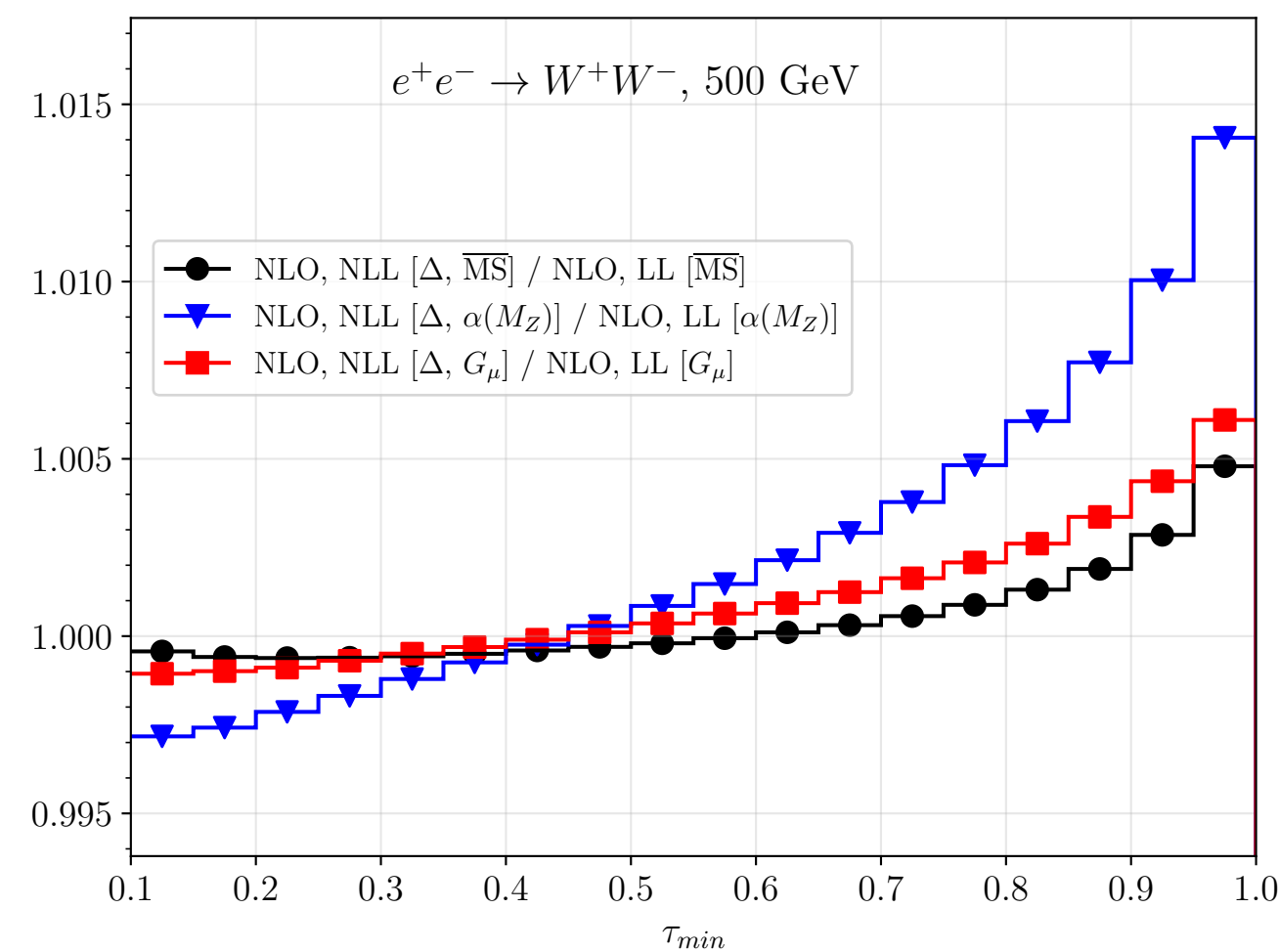
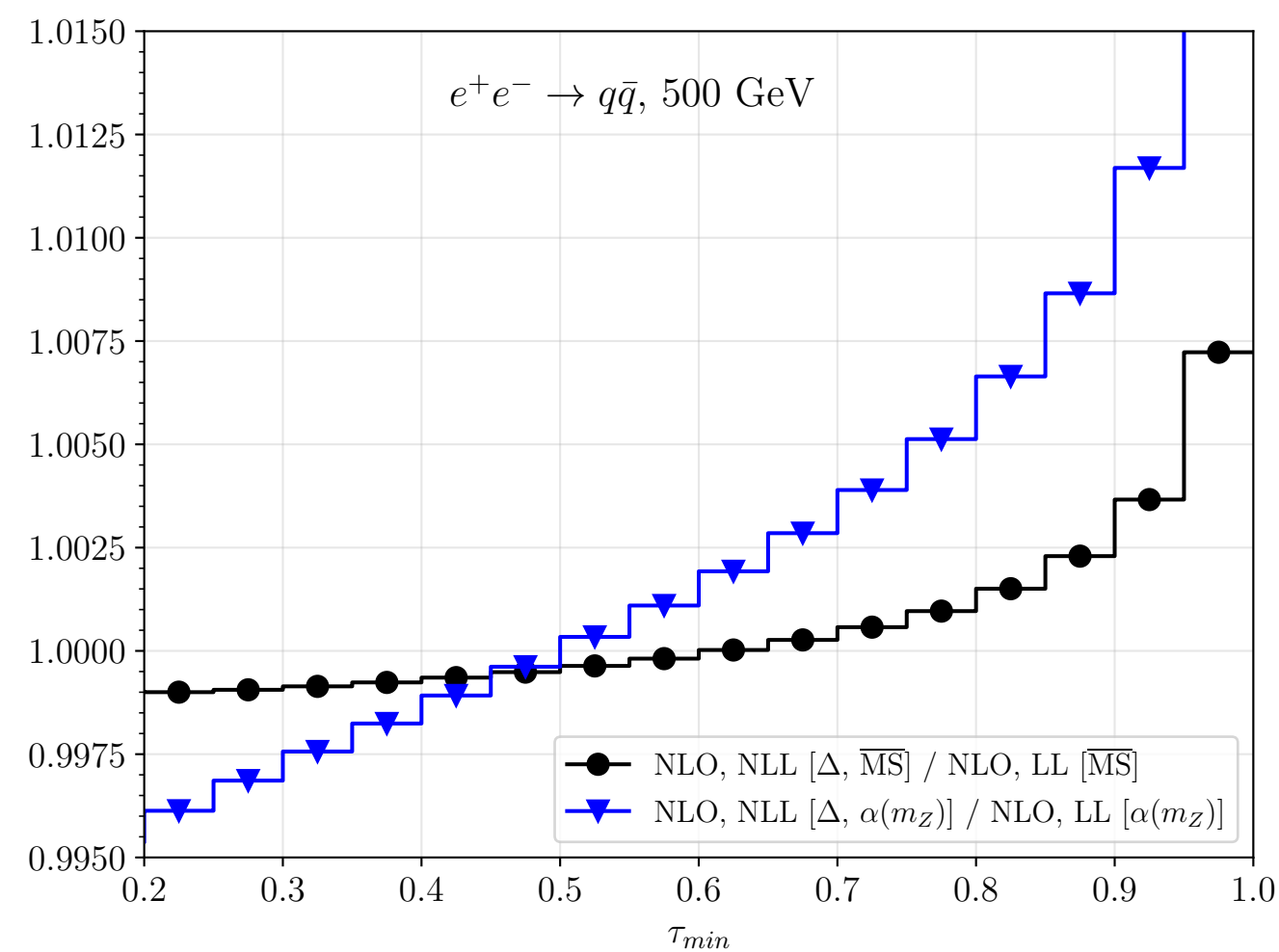


In un collisore leptónico,

i leptoni si comportano come dei sistemi composti formati da partoni

La struttura del leptone è descritta da densità partoniche collineari come nel caso del protone, grazie alla validità di opportuni teoremi di fattorizzazione.

Il formalismo delle PDF a LHC è stato rivisitato per colliders e^+e^- e inserito nel programma di simulazione Madgraph_aMCNLO



Il trattamento completo a NLO è solo il punto di partenza per un programma di fisica che richiederà per molte osservabili accuratezza NNLO-EW

Risorse di calcolo

Le risorse di calcolo utilizzate da SPIF a Milano includono un cluster ad alte prestazioni con 2240 jobs possibili eseguiti su 1120 cores installati su 40 server.

Il cluster è inserito nel sistema condor del Dipartimento/INFN.

Nel corso degli ultimi anni lo spazio disco è diventato uno dei fattori limitanti nello sviluppo di simulazioni ad alta precisione e quindi ad alta statistica.

L'esecuzione di calcoli simbolici richiede l'utilizzo di software come Mathematica con licenze proprietarie.

La soluzione del server nazionale di licenze, posto a Napoli, ottimizza l'uso di queste risorse, ma le 23 licenze disponibili spesso risultano occupate.