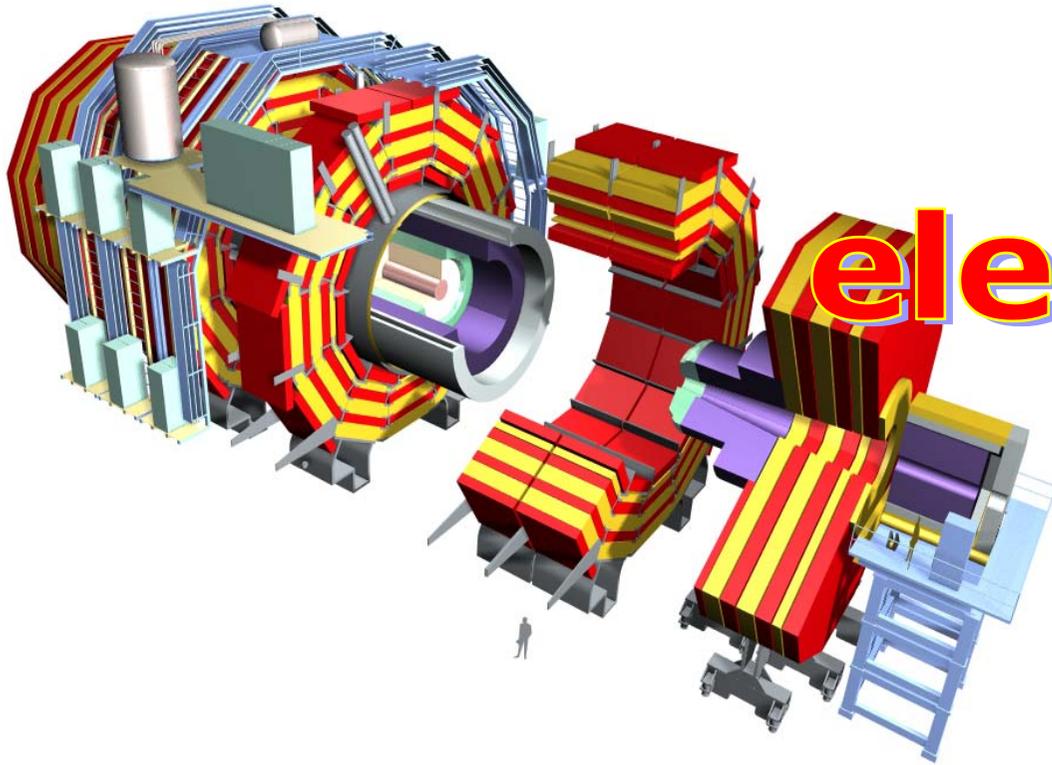
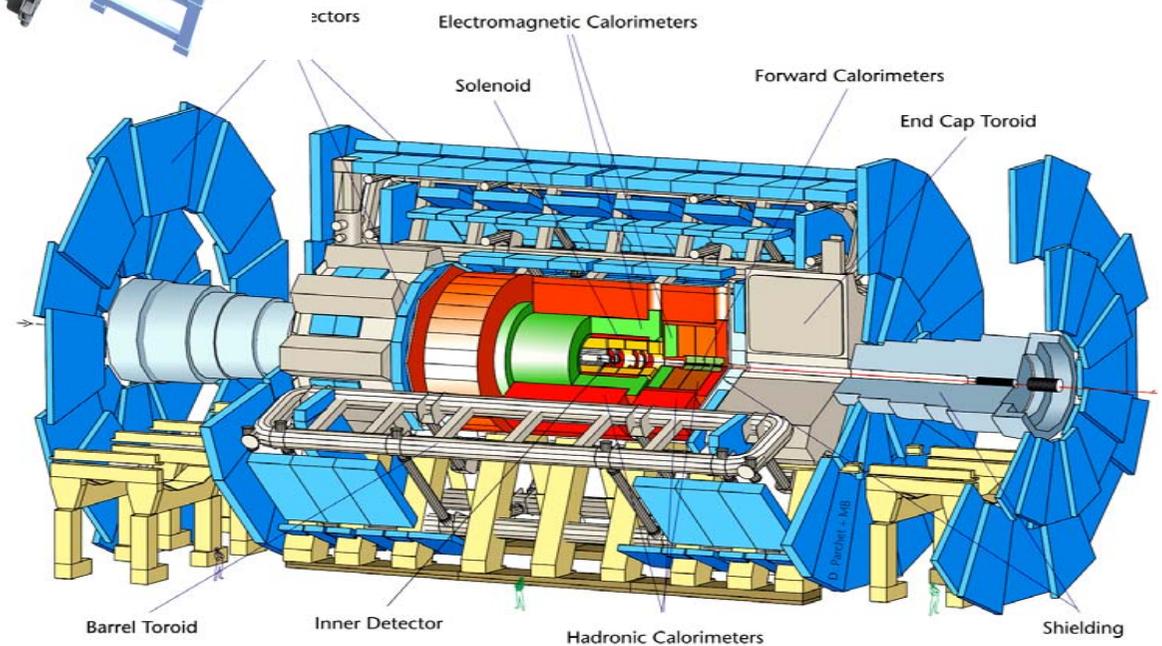


Fisica elettrodebole a LHC

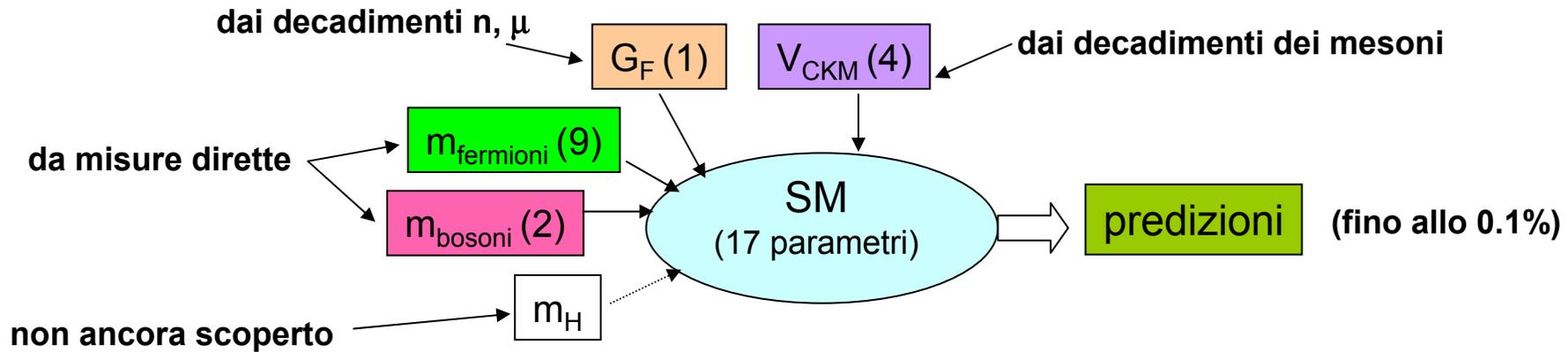
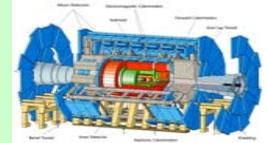


Andrea Giammanco
SNS & INFN Pisa



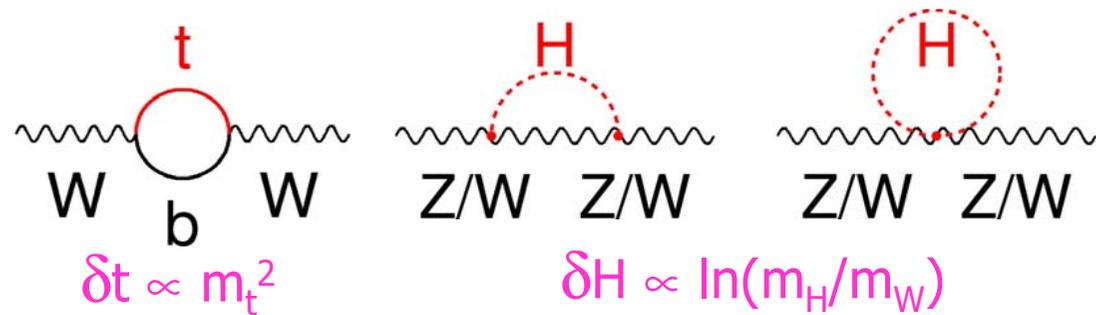


Cosa ci possono dire le misure di precisione



La dipendenza da m_H puo' manifestarsi da correzioni radiative.

Esempio: $m_W = m_W(m_t^2, \log(m_H))$

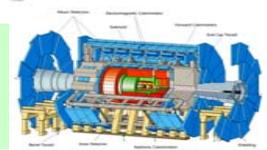


Da misure di precisione:

- indicazioni sul parametro mancante m_H
- test di validita' dello Standard Model



Il punto della situazione



Le incertezze del fit elettrodebole sono dominate da m_t , m_W

Ogni "osservabile"

($A_q, A_l, R_q, R_l, \Gamma, m, \sin\theta_W, \dots$)

puo' essere considerata funzione di:

$\Delta\alpha_{had}, \alpha_s(m_Z), m_Z, m_t, m_H$

$$\Rightarrow m_H = 91^{+58}_{-37} \quad (\delta m_H / m_H \approx 53\%)$$

$m_H < 211 \text{ GeV @95\% CL}$

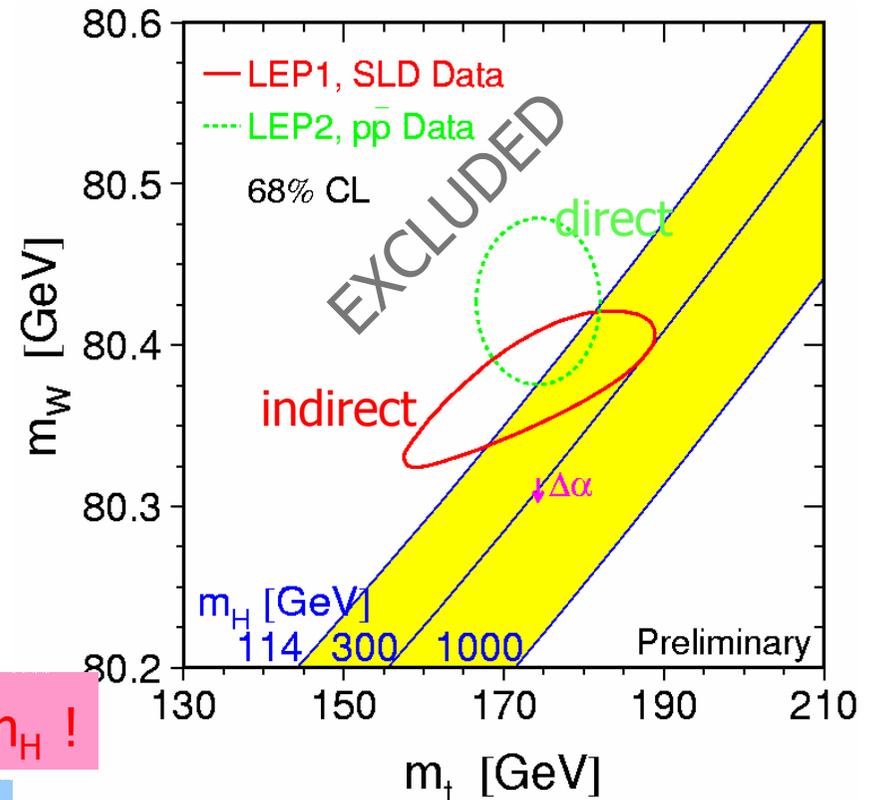
5 GeV (1σ) su m_t si traducono nel 35% su m_H !

Per avere lo stesso impatto su m_H : $\Delta m_W \approx 0.7 \times 10^{-2} \Delta m_t$

Attese per il run II di Tevatron:

$\delta m_t \leq 2.5 \text{ GeV}$; $\delta m_W \leq 25 \text{ MeV} \Rightarrow \delta m_H / m_H \leq 35\%$

Cosa ci aspettiamo ad LHC?



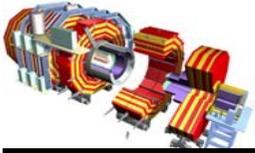
Stato attuale degli input:

$m_t = 178.0 \pm 4.3(\text{exp}) \text{ GeV}$

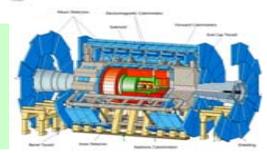
$m_W = 80.425 \pm 0.038(\text{exp}) \text{ GeV}$

$m_Z = 91.1876 \pm 0.0021(\text{exp}) \text{ GeV}$

$\Gamma_Z = 2.4952 \pm 0.0023(\text{exp}) \text{ GeV}$



Statistica a LHC



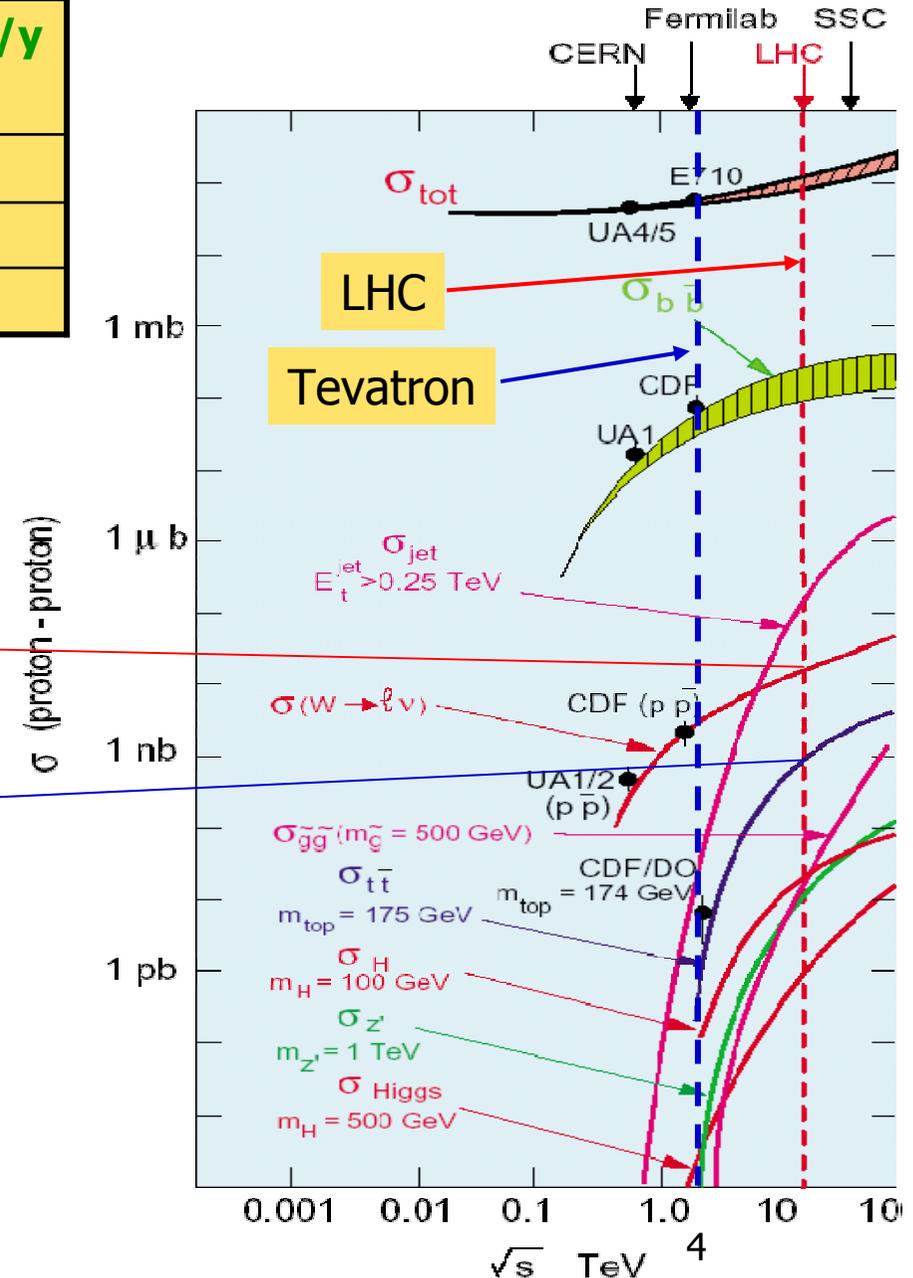
| | E_{CM} TeV | Lumi $cm^{-2}s^{-1}$ | Int. Lumi/y fb^{-1} |
|----------------|-----------------|-------------------------|--------------------------|
| TeVatron | 2 | $<10^{32}$ | 0.3 |
| LHC(low lumi) | 14 | 2×10^{33} | 10 |
| LHC(high lumi) | 14 | 10^{34} | 100 |

| process | $\sigma(pb)$ | Events/s | Events/y |
|----------------------|-------------------|--------------------|-----------------|
| bb | 5×10^8 | 10^6 | 10^{12} |
| $Z \rightarrow ee$ | 1.5×10^3 | ~ 3 | 10^7 |
| $W \rightarrow ev$ | 1.5×10^4 | ~ 30 | 10^8 |
| $WW \rightarrow evX$ | 6 | 10^{-2} | 6×10^3 |
| tt | 830 | ~ 2 | 10^7 |
| H(700 GeV) | 1 | 2×10^{-3} | 10^4 |

A bassa luminosita':

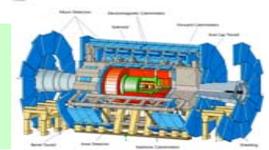
- 200 bosoni W
- 50 bosoni Z
- 1 coppia ttbar

al secondo!

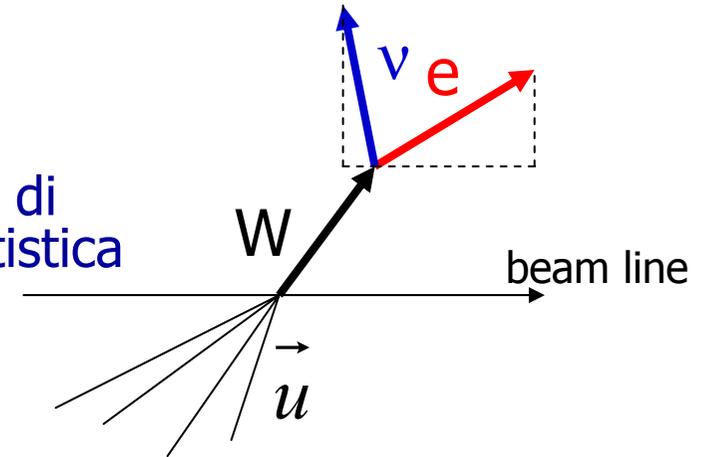




Massa del W

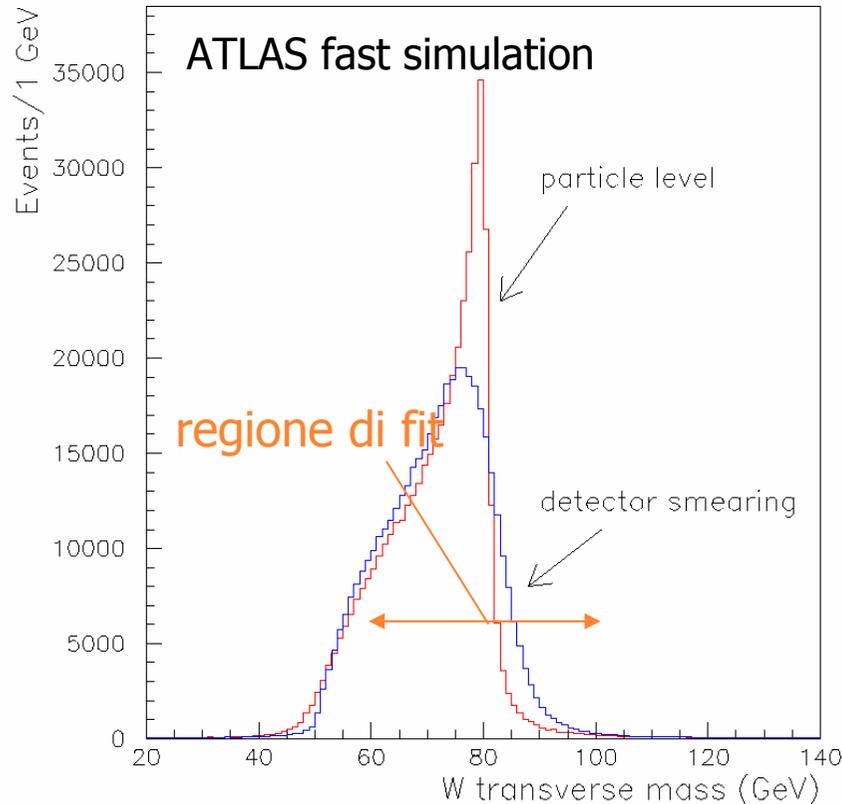


A LEP il "golden channel" era $WW \rightarrow l\nu qq$.
 Ma a LHC la sezione d'urto per questo processo e' bassa (12 pb) e i fondi molto piu' grandi.
 W singolo in $l\nu$: non e' possibile una misura diretta di m_W perche' il neutrino non e' ricostruito, ma la statistica e' enorme (3×10^4 pb).



$$m_W^T = \sqrt{2 p_l^T p_\nu^T (1 - \cos \Delta\phi)}$$

$$\vec{p}_\nu^T = - \left(\vec{p}_l^T + \vec{u} \right) \quad (\text{missing } p^T)$$

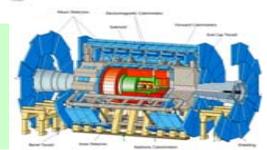


- Efficienza di selezione: $\sim 25\%$ con
- $p_T > 25$ GeV
 - $E_{T, \text{miss}} > 30$ GeV
 - Nessun jet con $p_T > 30$ GeV
 - Rinculo: $|u| < 20$ GeV

La statistica (dopo selezione) e'
 50 volte quella di Tevatron
 $\Rightarrow < 2 \text{ MeV/y}$ per esp. di incertezza statistica
 (e per quanto concerne i sistematici?)



Sistematici strumentali



E' realistico raggiungere una precisione dello 0.02% sull'energia del leptone...

- ⇒ $Z \rightarrow ee, \mu\mu$
- ⇒ $\Upsilon, J/\psi \rightarrow ee, \mu\mu$

significa ~ 15 MeV/y per esp. per leptone

... e un errore $\sim 1-2\%$ sulla risoluzione in E,p

- ⇒ larghezza della Z
- ⇒ dati dai test beam

~ 5 MeV/y per esp. per leptone

L'errore di estrapolazione $Z \rightarrow W$ e' piccolo

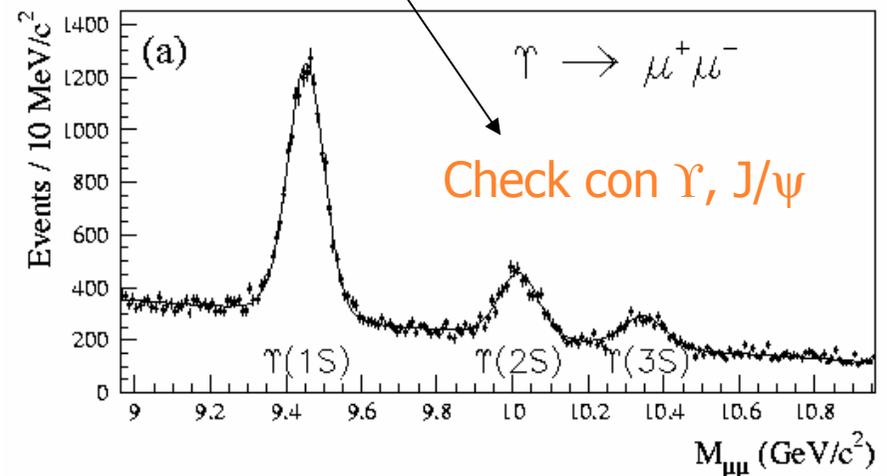
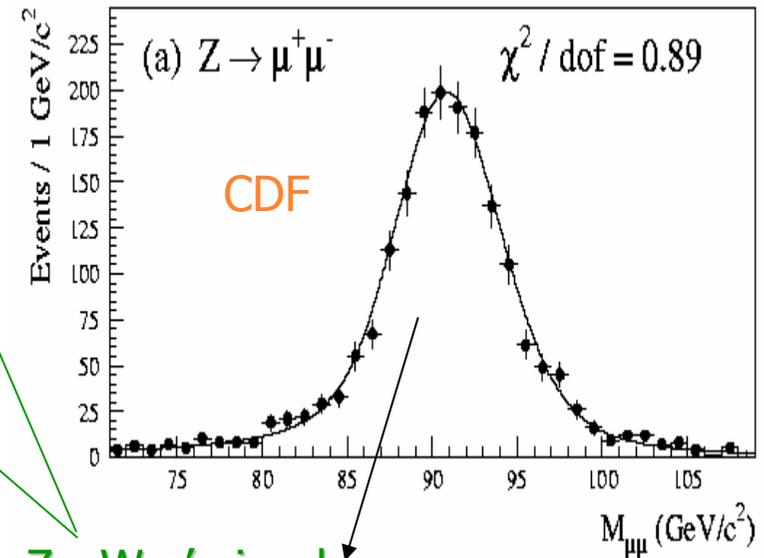
$$\delta(1/p_T) = (0.91 \pm 0.04) 10^{-3} \text{ GeV}^{-1}$$

$$m_Z^{\text{PDG}} / m_Z^{\text{CDF}} = 1.00085 \pm 0.00106$$

Recoil modelling (UE + rivelatore)

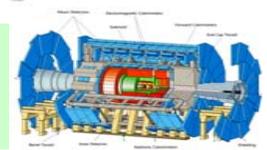
- ⇒ occorre conoscere la scala energetica e la risoluzione del sistema adronico che rincula contro il W (+UE); si usano Z+jets, con $Z \rightarrow ll$

~ 5 MeV/y per esp. per leptone
(scala con la statistica di Z)





Sistematici dalla fisica



Modellizzazione dell'emissione di gluoni soffici \otimes risposta del detector.
 \Rightarrow usare per quanto possibile i dati stessi per calibrazioni in-situ.

$p_T(W)$ \Rightarrow usare $p_T(Z)$ da $Z \rightarrow ll$, e riscaldare $p_T(W)$ a $p_T(Z)$ nei modelli MC.
 ~ 5 MeV/y per esp. per leptone

Incertezze sulle PDF

\Rightarrow Confronto di diversi modelli, usare dati da Z e W

~ 10 MeV/y per esp. per leptone

Larghezza del W \Rightarrow da misura di
 < 10 MeV/y per esp. per leptone

$$R = \frac{\sigma_W}{\sigma_Z} \times \frac{BR(W \rightarrow \ell \nu)}{BR(Z \rightarrow \ell \ell)}$$

Assunzione implicita che sia valido lo SM
Da LEP
Dalla teoria

Decadimenti radiativi

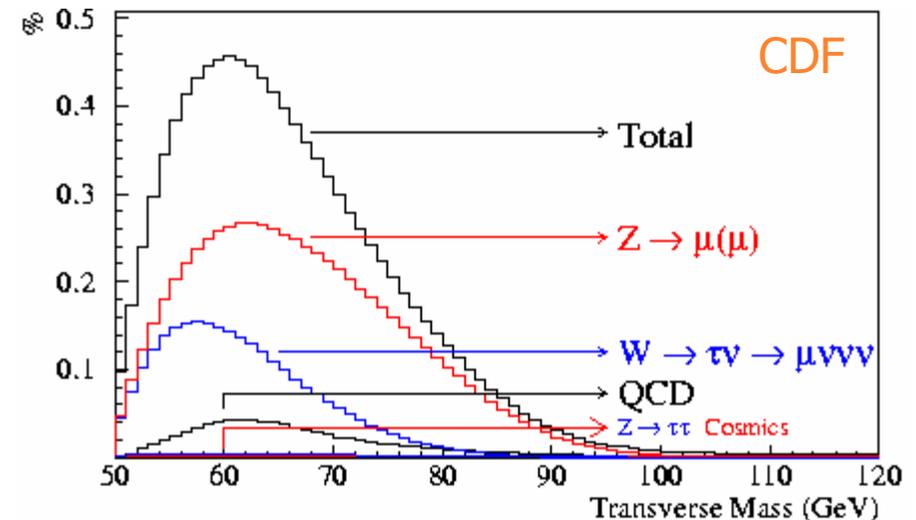
\Rightarrow cercare $W \rightarrow \ell \nu \gamma$

< 10 MeV/y per esp. per leptone
(occorrono nuovi calcoli dai teorici)

Background

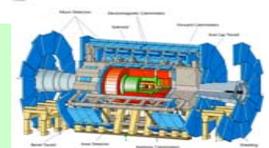
\Rightarrow checks su Z e $W \rightarrow \tau \nu$

< 5 MeV/y per esp. per leptone





Massa del W: Tevatron/LHC



Incertezze per esperimento
per anno e per leptone

| Fonte d'errore | CDF Run Ib | ATLAS |
|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| | 30k eventi, 84 pb ⁻¹ | 60M eventi, 10 fb ⁻¹ |
| Statistico | 65 MeV | < 2 MeV |
| Lepton scale | 75 MeV | 15 MeV |
| Risol. E,p | 25 MeV | 5 MeV |
| Recoil model | 33 MeV | 5 MeV |
| Largh. W | 10 MeV | 7 MeV |
| PDF | 15 MeV | 10 MeV |
| Dec. radiativi | 20 MeV | < 10 MeV |
| P _t (W) | 45 MeV | 5 MeV |
| Fondi | 5 MeV | 5 MeV |
| TOTALE | 113 MeV | 25 MeV |

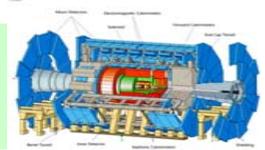
Il principale miglioramento;
l'errore statistico diventa
trascurabile

Calibrazione interna,
soprattutto da misure
con le Z.

Realistico, anche se non
facile. L'errore combinato
da LHC (tenendo conto
delle correlazioni)
sarebbe così di ~15 MeV.



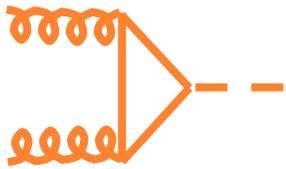
Parton Distribution Functions (PDF)



Ad alta energia, un urto pp e' un urto tra partoni:

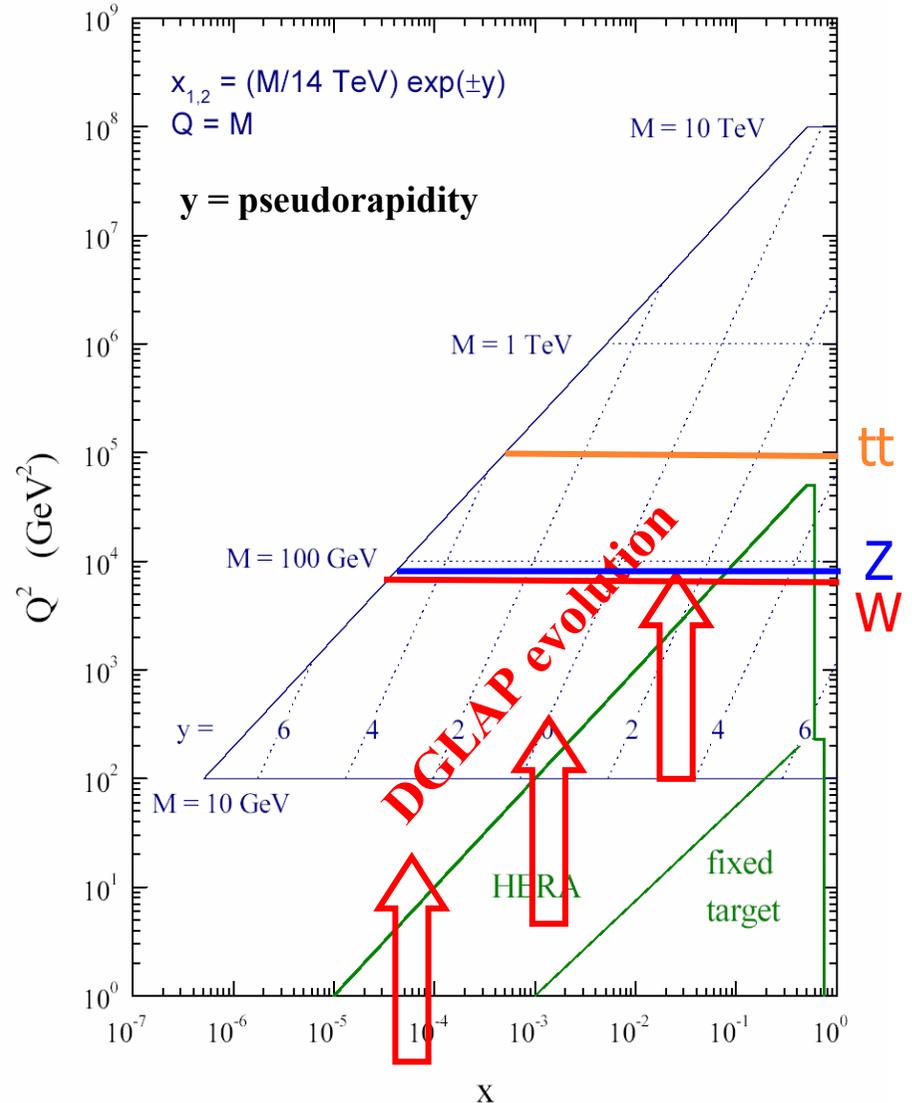
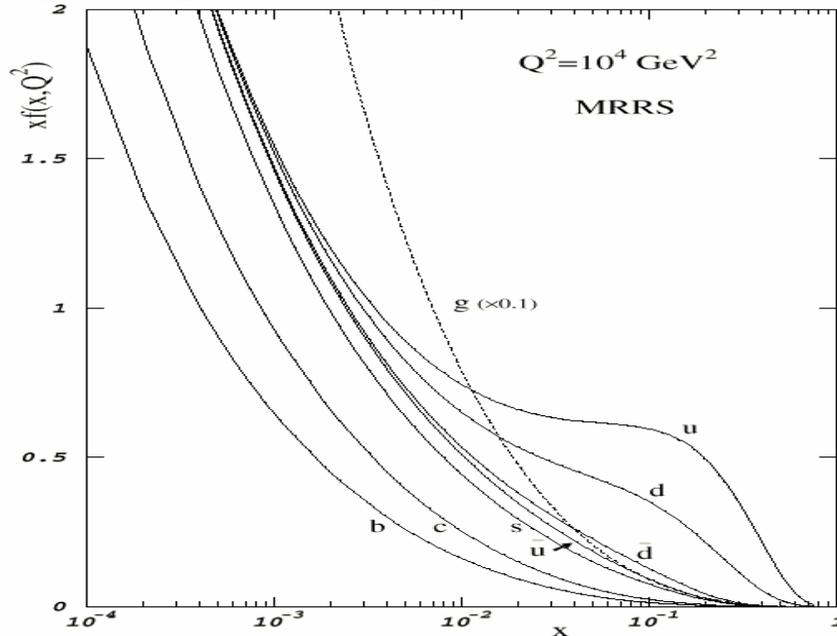


$$q\bar{q} \rightarrow W \rightarrow l\nu$$



$$gg \rightarrow H$$

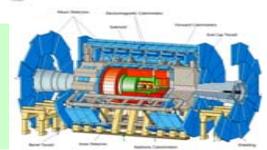
⇒ occorre conoscere $pdf(x, Q^2)$ per sapere l'energia nel c.m. dell'urto



Estrapolazione dei dati da HERA

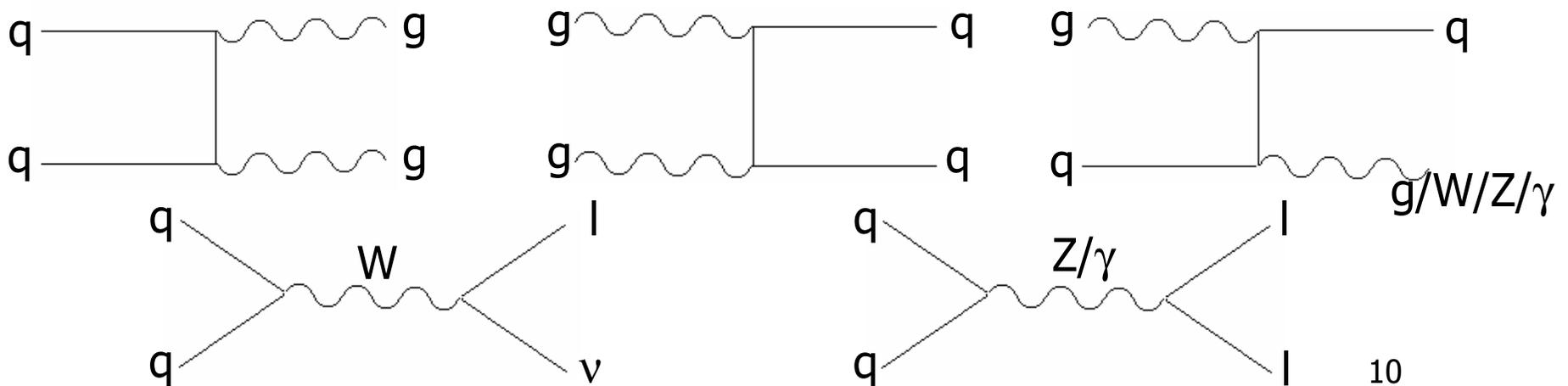


Parton Distribution Functions (PDF)



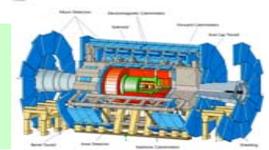
Quali eventi usare per sondare le PDF:

| Processo: | Limiti sulle PDF di: |
|--------------|----------------------|
| Di-jets | Quark e gluoni |
| Jet + fotone | Quark e gluoni |
| Jet + W/Z | Quark e gluoni |
| W e Z | Quark |
| Drell-Yan | Quark |



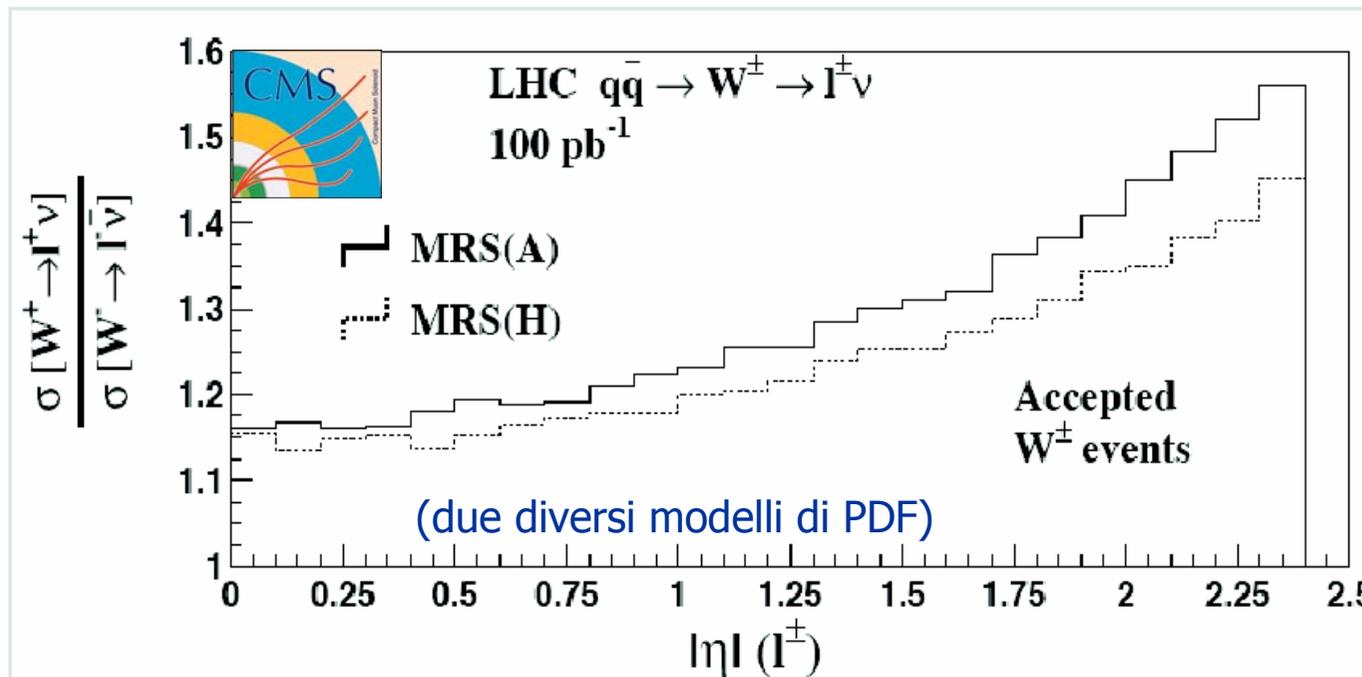


Studiare le PDF con W e Z



- le distribuzioni di p_T e rapidita' dipendono fortemente dalle PDF
- il rapporto tra le sezioni d'urto W^+/W^- e' una misura indiretta di $u(x)/d(x)$

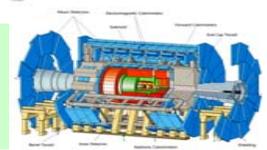
Esempio: con soli 0.1 fb^{-1} , ovvero $2 \cdot 10^6$ $W \rightarrow \mu\nu$ prodotte



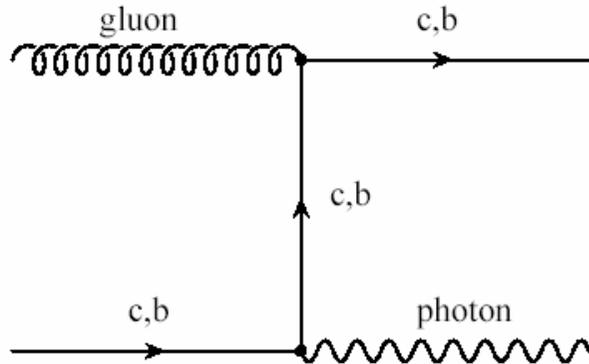
Sensibile a piccole differenze nella distribuzione di sea-quarks



PDF dei quark pesanti

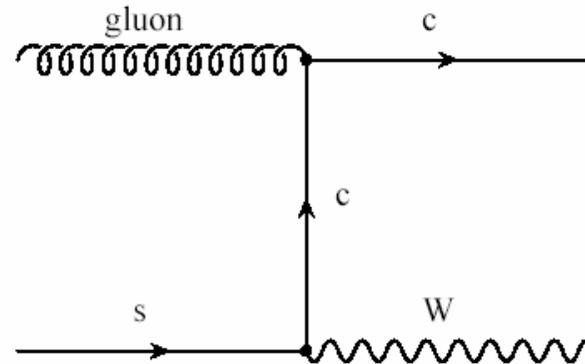


Fotone + jet da quark pesante (b,c)



γ isolato ad alto p_T
+ jet con μ non isolato

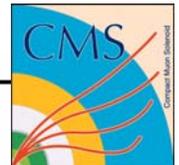
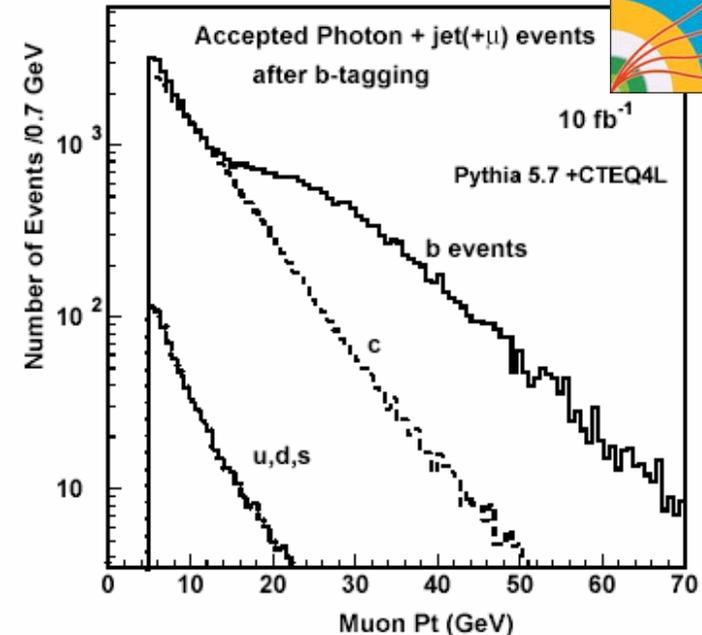
W + jet da quark c



e/μ isolato ad alto p_T
+ jet con μ non isolato

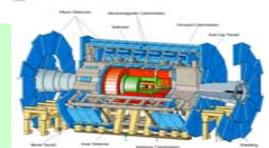
Analisi adatta per la fase a bassa luminosita'

Accuratezza stimata sulle PDF: 5-10%
Limitazione principale: incertezza sulle
funzioni di frammentazione

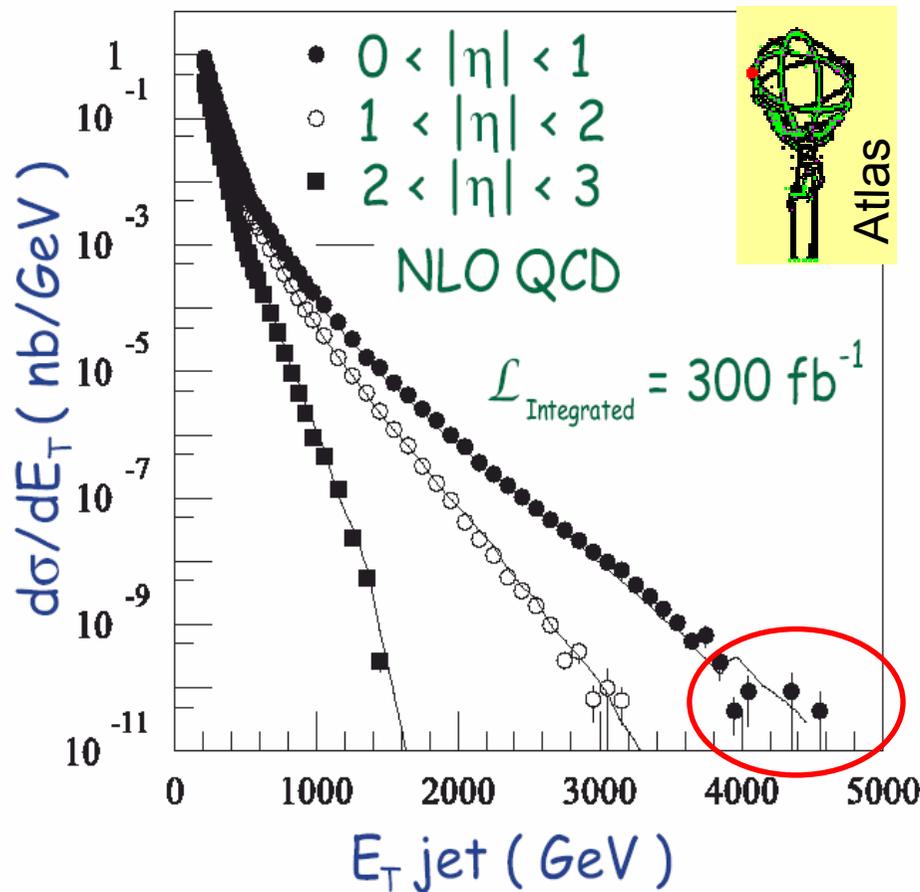




Jet di altissima energia



Sonda per le PDF, test di QCD ad altissima energia, fondo per nuova fisica (risonanze pesanti che decadono in di-jet).



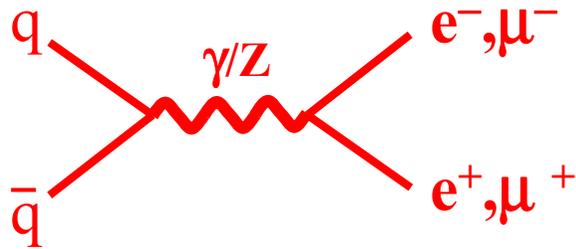
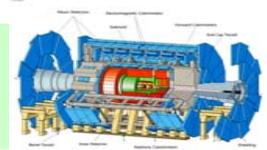
Per 300 fb^{-1} :

| E_T of jet | Events |
|-------------------|----------------|
| $> 1 \text{ TeV}$ | $4 \cdot 10^6$ |
| $> 2 \text{ TeV}$ | $3 \cdot 10^4$ |
| $> 3 \text{ TeV}$ | 400 |

Possibile arrivare a energie molto elevate...



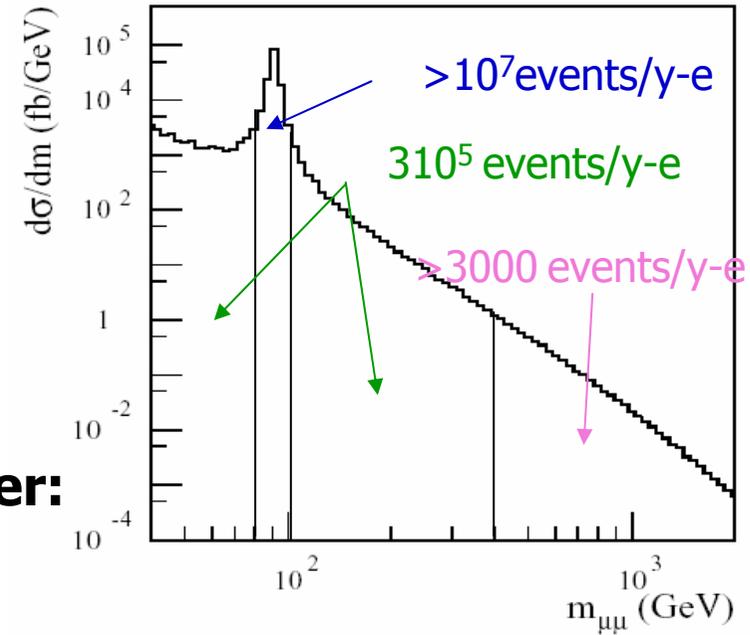
Coppie di leptoni Drell-Yan



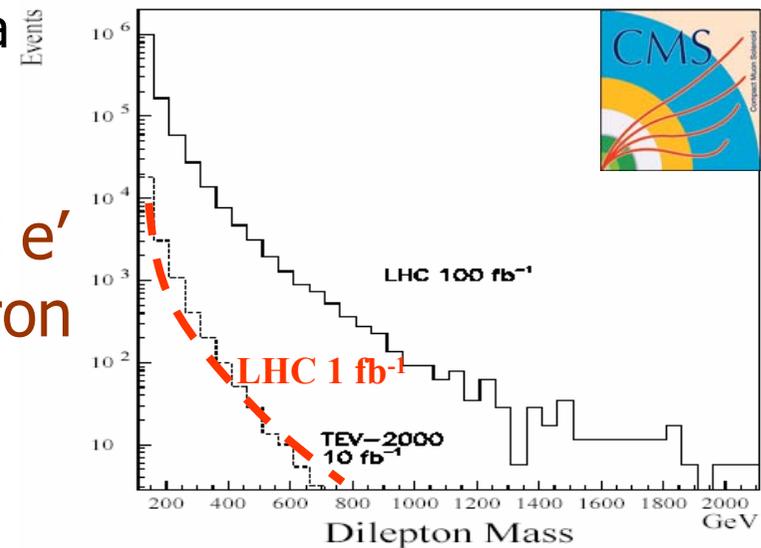
Inverso di $e^+e^- \rightarrow qq \bar{a}$ LEP

La sezione d'urto puo' essere usata per:

- informazioni sulle PDF
- estrazione della luminosita' partonica
- ricerca di Z' , extra dim., altra nuova fisica

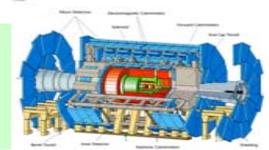


Il range di massa copribile da LHC e' molto maggiore di quello di Tevatron





Coppie di leptoni Drell-Yan



In linea di principio da questo processo si puo' misurare l'angolo di Weinberg.

A_{FB} attorno al picco della Z

- grande sezione d'urto a LHC:

$$\sigma(Z \rightarrow e+e^-) \approx 1.5 \text{ nb}$$

- errore statistico con 100 fb^{-1} :

$$\Delta \sin^2 \vartheta_W \approx 0.00014$$

(Ma grandi errori sistematici - ancora da valutare ma probabilmente dominanti sullo statistico - da PDF, accettazione dei leptoni, corr. radiative.)

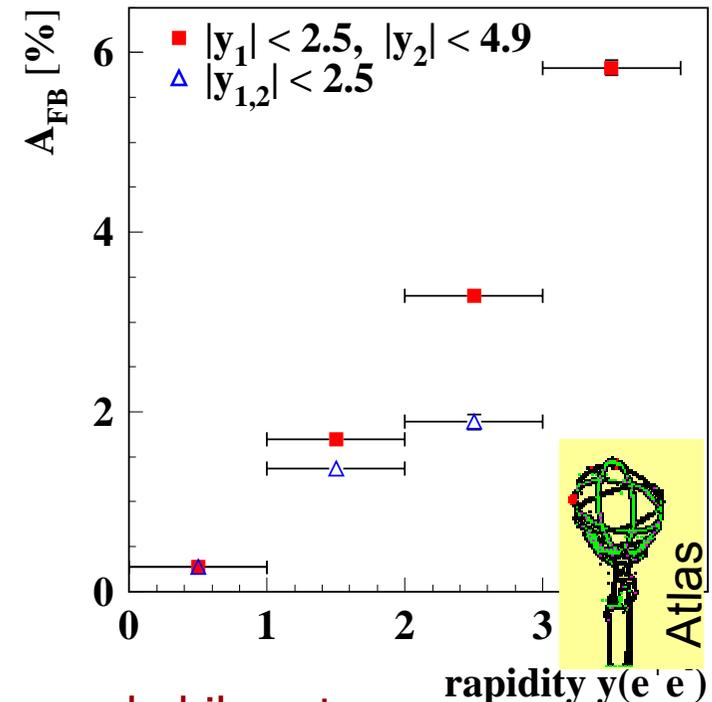
Fit simultaneo per estrarre PDF e angolo di Weinberg?

Per misurare un'asimmetria avanti-indietro occorre definire la direzione "in avanti". In un collider pp e' meno ovvio che a Tevatron.

Soluzione: i sea-(anti)quarks hanno impulso medio minore dei quark di valenza, quindi $y(l)$ dara' una misura della direzione del quark.

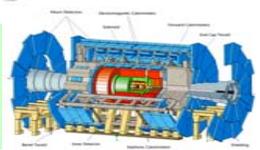
A_{FB} dipendera' da y , e sara' massimo in avanti

(occorrera' una buona lepton id a piccolo angolo)





Produzione di di-bosoni



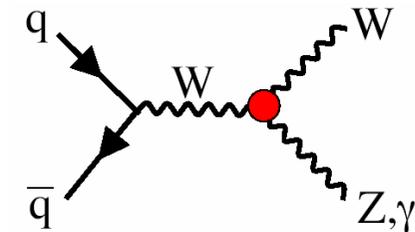
Da' una misura degli accoppiamenti di gauge tripli (TGC) e un test degli auto-accoppiamenti dei bosoni di gauge.

➤ I vertici $WW\gamma$ e WWZ fanno parte del Modello Standard

Richiedendo C,P ma non la invarianza di gauge

⇒ 5 parametri d'accoppiamento

| | | |
|----------------------|---|--------------------------|
| $\kappa_{\gamma,Z}$ | 1 | Dim4, $\propto \sqrt{s}$ |
| $\lambda_{\gamma,Z}$ | 0 | Dim6, $\propto s$ |
| g_1^Z | 1 | Dim4, $\propto \sqrt{s}$ |



➤ I vertici $ZZ\gamma$ e ZZZ sono proibiti dal Modello Standard

Richiedendo solo la simmetria di Lorentz e quella di Bose

⇒ 12 parametri d'accoppiamento

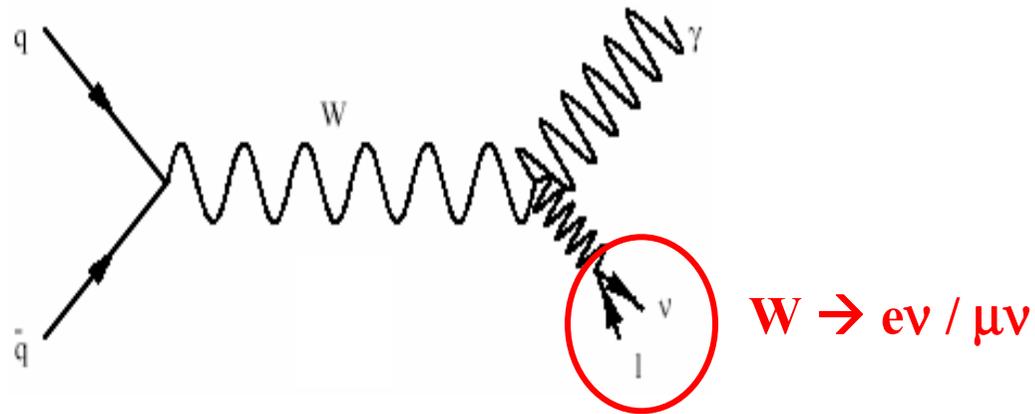
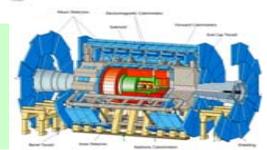
$$h_i^V, f_i^V \quad (V = \gamma, Z)$$

| | | |
|-------|-------------------------|---------------|
| h_1 | dim6, $\propto s^{3/2}$ | CP |
| h_2 | dim8, $\propto s^{5/2}$ | CP |
| h_3 | dim6, $\propto s^{3/2}$ | CP |
| h_4 | dim8, $\propto s^{5/2}$ | CP |
| f_4 | dim6, $\propto s^{3/2}$ | CP |
| f_5 | dim6, $\propto s^{3/2}$ | CP |

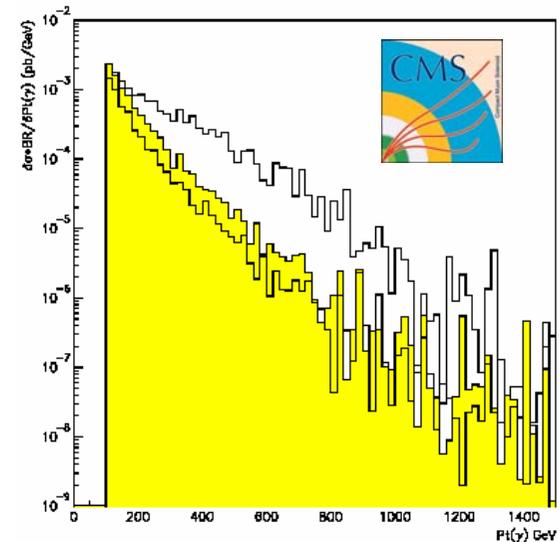
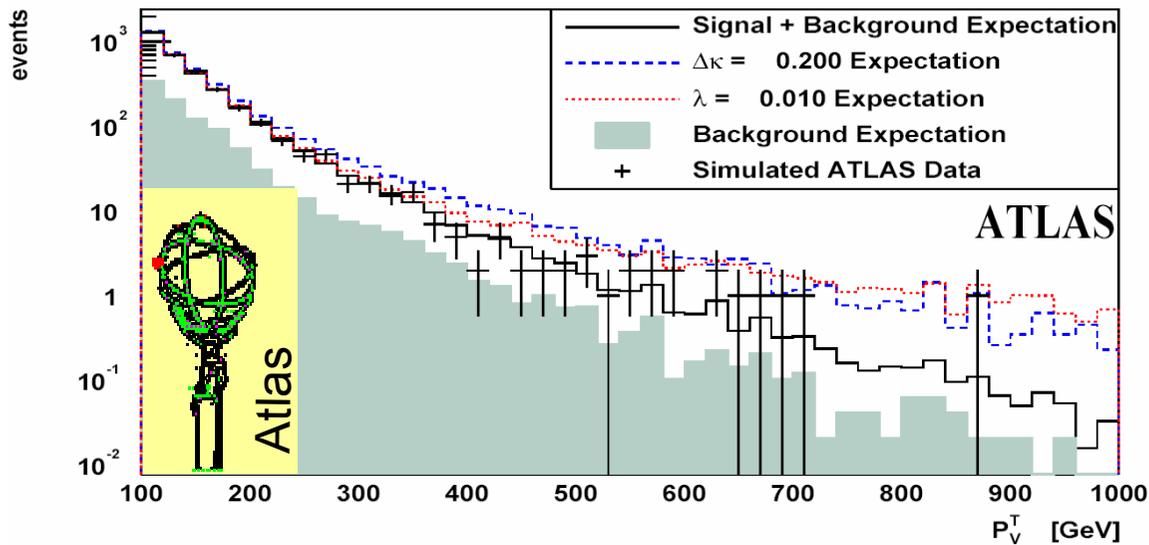
Grande vantaggio di LHC



WW γ

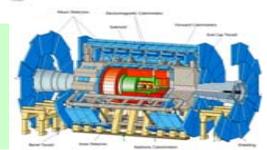


La sensibilita' agli accoppiamenti anomali viene dalla parte alta dello spettro in P_t dei due bosoni:

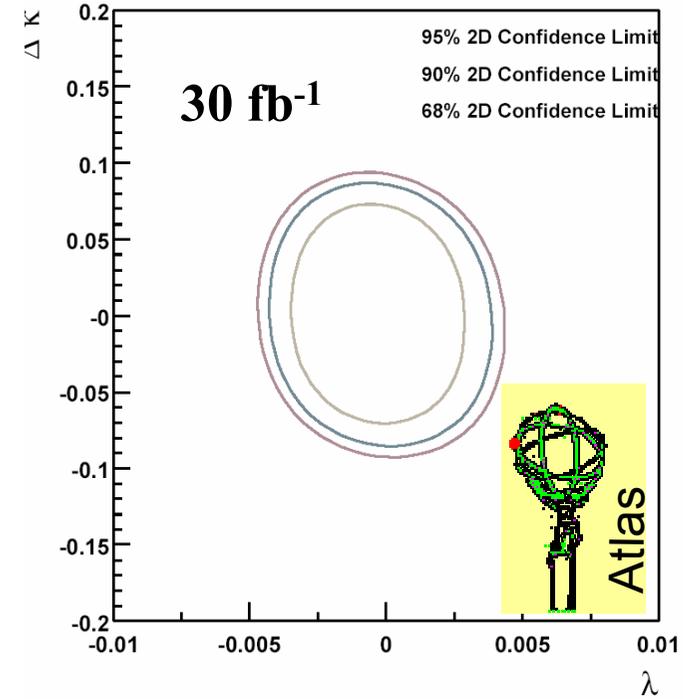
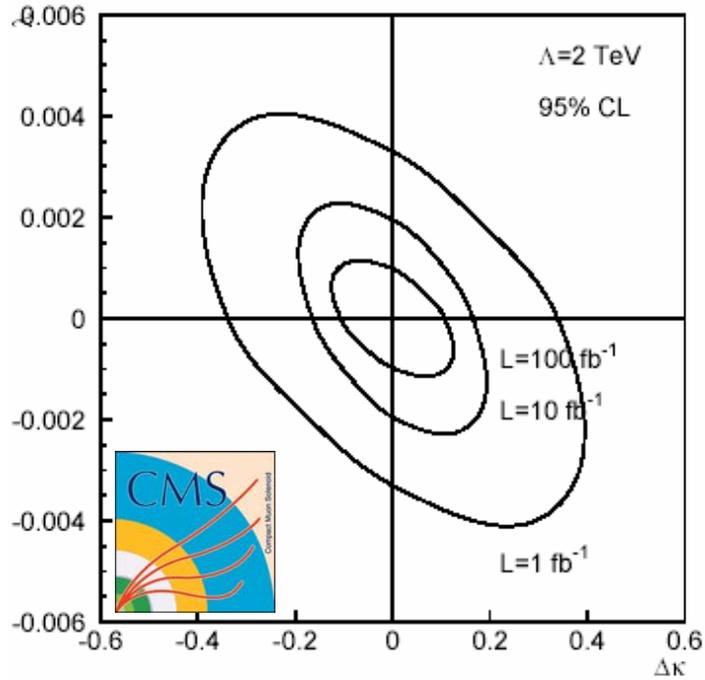




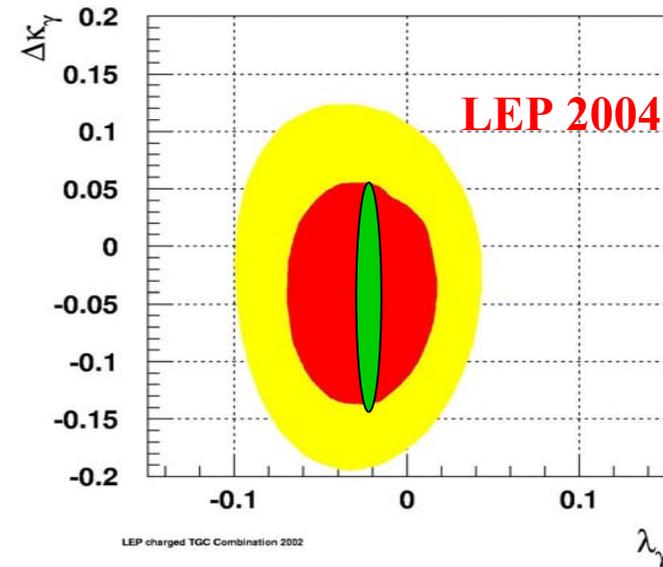
WW γ



Sensibilita' agli accoppiamenti:

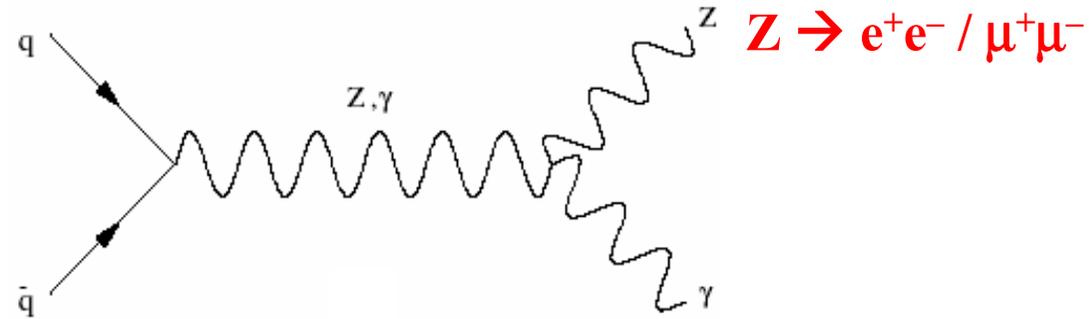
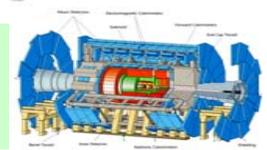


Come detto prima, la dipendenza da s da' per il limite su λ un enorme vantaggio a LHC rispetto agli acceleratori precedenti

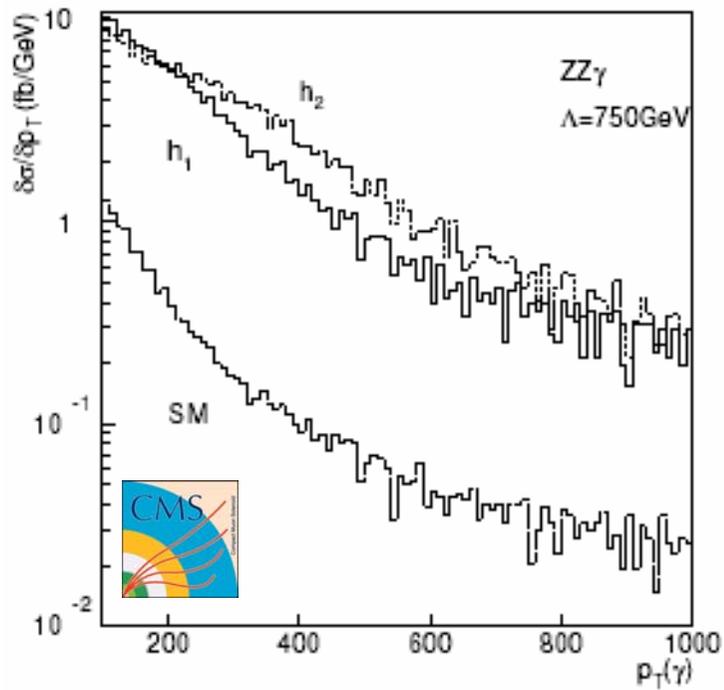




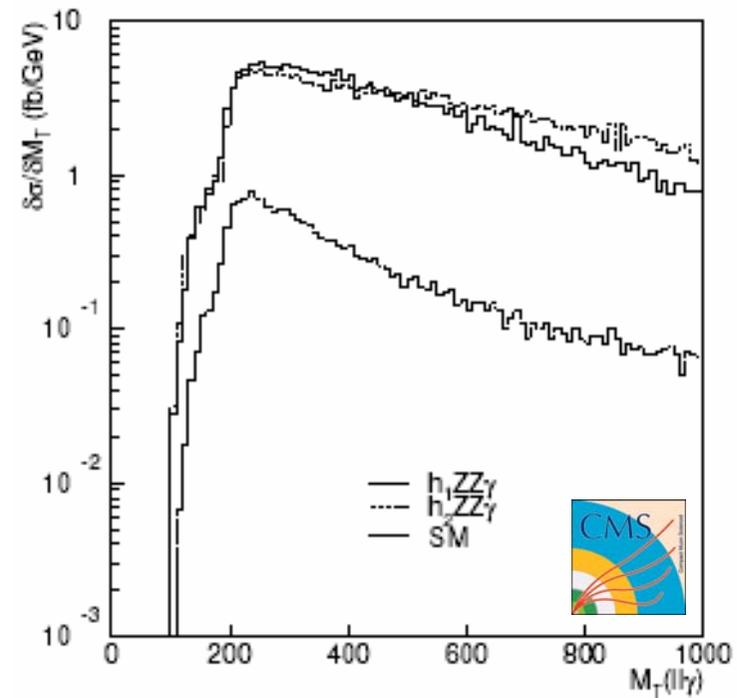
ZZ γ



Spettro in P_t del fotone:

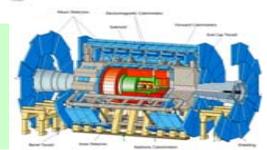


$M_T(l\gamma)$:



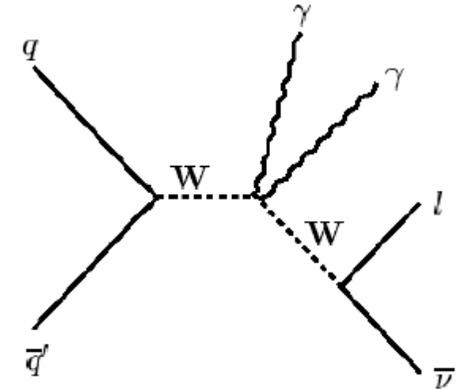


Produzione di tri-bosoni

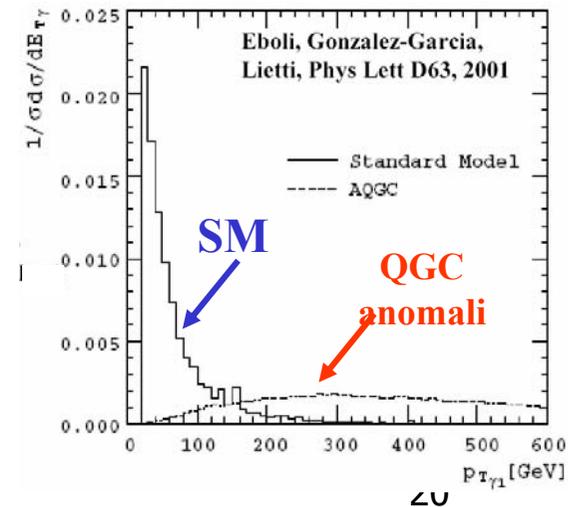
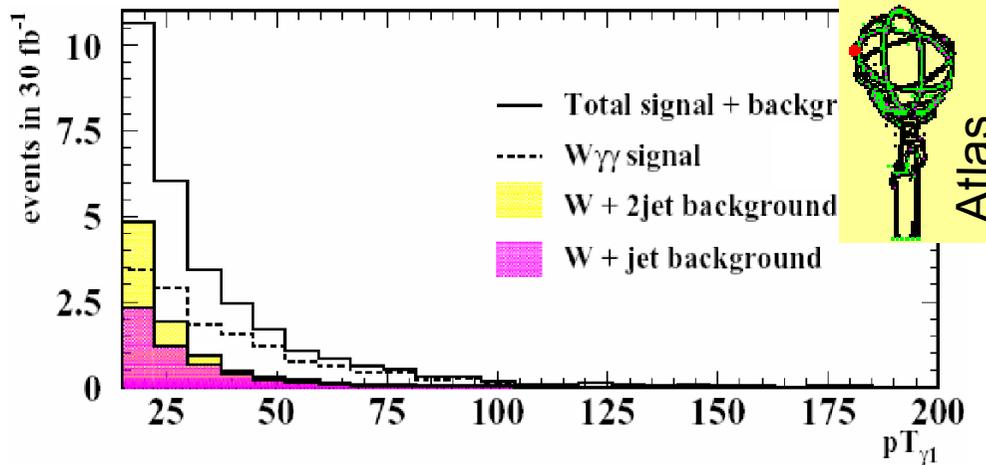


Misura gli accoppiamenti quartici (QGC)

| Events for 100 fb ⁻¹ (m _H = 200 GeV) | Produced (no cuts, no BR) | Selected (leptons, p _T > 20 GeV, η < 3) |
|---|------------------------------|---|
| pp → WWW (3 ν's) | 31925 | 180 |
| pp → WWZ (2 ν's) | 20915 | 32 |
| pp → ZZW | 6378 | 2.7 |
| pp → ZZZ | 4883 | 0.6 |
| pp → Wγγ | best channel for analysis | |

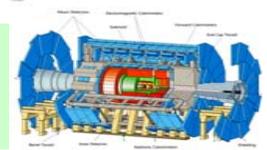


30 eventi Wγγ in 30 fb⁻¹





Conclusioni

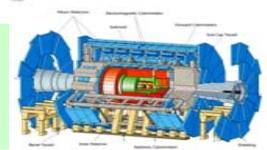


- Nonostante sia una “macchina da scoperte”, LHC puo’ permettere parecchia **fisica di precisione**, grazie all’altissima luminosita’ e alle sezioni d’urto molto alte di alcuni processi elettrodeboli alle sue energie.
- Il vantaggio in termini di statistica e’ pero’ compensato dai sistematici, sia strumentali che da fisica.
- Il principale sistematico dalla fisica e’ l’incertezza con cui sono conosciute le **PDF**.
- Le migliori “sonde” con cui cercare di conoscere meglio le PDF proverranno proprio dalla “zoologia” della fisica elettrodebole: W , Z , γ , Drell-Yan,...
- Allo stesso modo, le risonanze del Modello Standard fungeranno da **“candele standard” per le calibrazioni**, aiutando a ridurre anche i sistematici strumentali.

Ringraziamenti: Joachim Mnich, Roberto Chierici

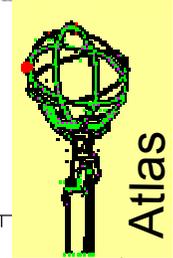
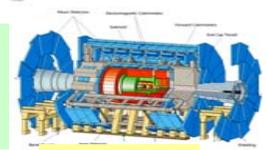


Trasparenze di backup

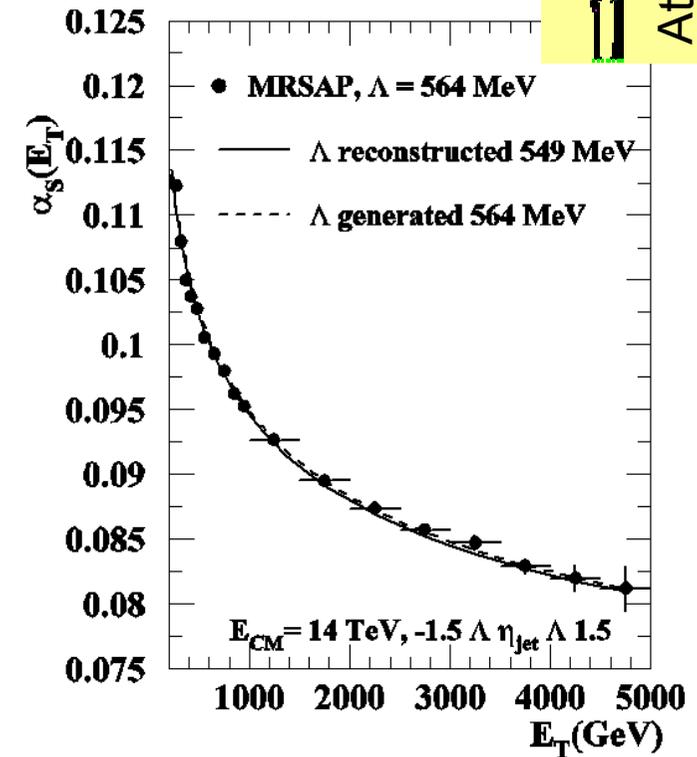




Misura di α_s

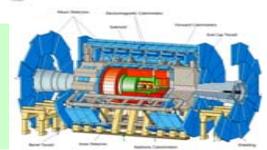


$$\frac{d\sigma}{dE_T} \sim \alpha_s^2(\mu_R)A(E_T) + \alpha_s^3(\mu_R)B(E_T)$$





Massa del W: Tevatron/LHC



| Source | Run IA | |
|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| | Δm_W (CDF) | Δm_W (ATLAS) |
| Statistics | 145 MeV | < 2 MeV |
| E - p scale | 120 MeV | 15 MeV |
| Energy resolution | 80 MeV | 5 MeV |
| Lepton identification | 25 MeV | 5 MeV |
| Recoil model | 60 MeV | 5 MeV |
| W width | 20 MeV | 7 MeV |
| Parton distribution functions | 50 MeV | 10 MeV |
| Radiative decays | 20 MeV | < 10 MeV |
| p_T^W | 45 MeV | 5 MeV |
| Background | 10 MeV | 5 MeV |
| TOTAL | 230 MeV | 25 MeV |

Incertezze per esperimento
per anno e per leptone

Il principale miglioramento;
l'errore statistico diventa
trascurabile

Calibrazione interna,
soprattutto da misure con Z .

Realistico, anche se non facile.
L'errore combinato da LHC
(tenendo conto delle
correlazioni) sarebbe così di
circa 15 MeV.