# Misura della luminosità in ATLAS e CMS

IV Workshop Italiano sulla Fisica di ATLAS e CMS

Paolo Bartalini e Laura Fabbri







### Sommario:

- Misure di Luminosità
  - Motivazioni
  - Luminosità Integrata ed Istantanea
- Processi fisici coinvolti
- Strategie sperimentali di ATLAS e CMS
- Problemi aperti / Conclusioni





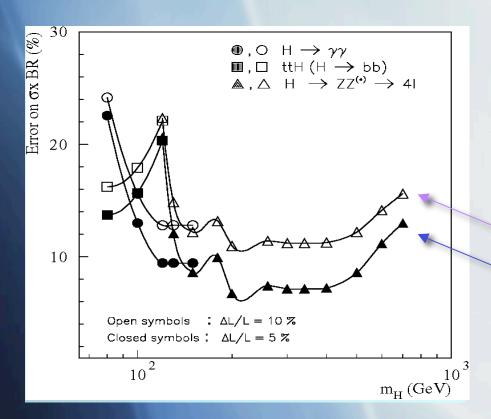
### Motivazioni

- Fornire un valore di luminosità integrata da utilizzare nell'analisi di tutti i campioni e per tutti i periodi di acquisizione.
  - Misura della sezione d'urto di processi noti
    - ttbar
    - W/Z
    - ...
  - Scoperta di nuova fisica
    - Eventuali deviazioni dalle predizioni SM per sezioni d'urto di produzione di processi noti
  - Misure di processi di produzione di Higgs
    - Sezioni d'urto di produzione
    - tanβ in MSSM Higgs, ...
- Monitorare la luminosità istantanea per un utilizzo efficiente del fascio e un'ottimizzazione del rendimento
  - Ottimizzazione dei Trigger (pre-scaler)
- Controllo veloce delle condizioni di running e del background relativo al fascio (monitorare la struttura temporale del fascio, ...)

Luminosità Integrata *£* 



# Importanza della Misura di Luminosità Integrata



Errore relativo su  $\sigma_H \times BR$  per vari canali in funzione di  $m_H$ , a  $\int Ldt = 300$  fb-1.

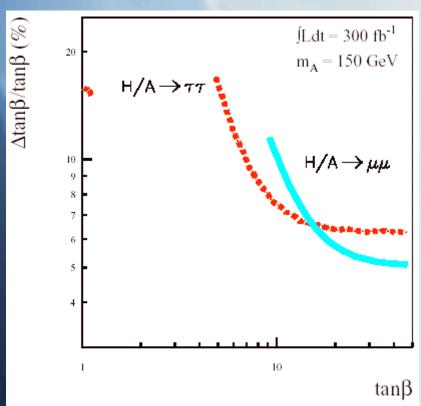
Il sistematico dominante deriva dalla misura della luminosità:

10% (open symbols)
5% (solid symbols)
[ATLAS-TDR-15, May 1999]





# Importanza della Misura di Luminosità Integrata II



Errore relativo su  $tan(\beta)$  per H/A $\rightarrow \tau\tau$  ed H/A $\rightarrow \mu\mu$  in funzione di  $tan(\beta)$  a  $\int Ldt = 300$  fb-1.

Il sistematico dominante deriva dalla misura della luminosità

[ATLAS-TDR-15, May 1999]





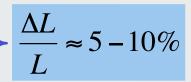
### Luminosità di LHC

La luminosità dipende unicamente dai parametri del fascio:

$$L = \frac{f \sum_{i=1}^{k_b} N_{1i} N_{2i}}{\text{Superficie Impatto}} = \frac{f \sum_{i=1}^{k_b} N_{1i} N_{2i}}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*} = \frac{f k_b N^2}{4\pi \varepsilon_N \frac{\beta^*}{\gamma}}$$

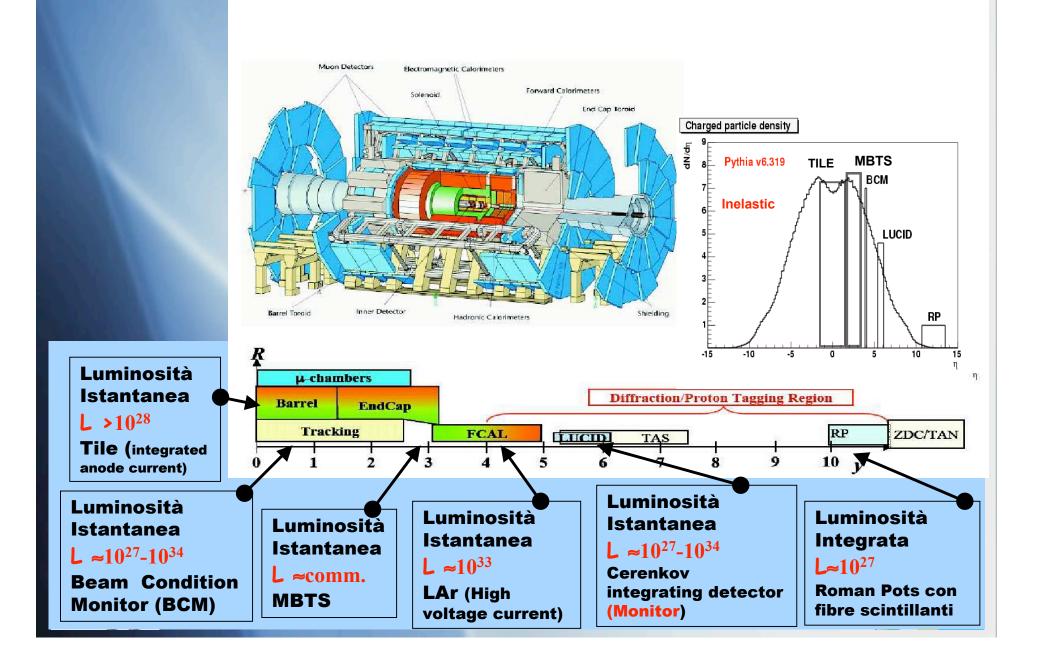
f = frequenza di rivoluzione (11.2 kHz);  $N_{ni}$  = # di protoni per bunch;  $k_{b}$  = # di bunch;  $\epsilon_{N} = \sigma_{x}^{*}\sigma_{y}^{*}\gamma/\beta$  emittanza normalizzata;  $\beta^{*}$  = funzione  $\beta$  nel punto di impatto;  $\gamma$  = E /m<sub>p</sub>

- Fattori che limitano l'accuratezza della misura:
  - Capacità di estrapolare  $\sigma_x^*$  e  $\sigma_y^*$  nel punto di interazione dai parametri del fascio  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$
  - Conoscenza dell'ottica dell'acceleratore (β\*)
  - Precisione nella misura della corrente del fascio
  - Altri effetti nel punto di interazione (angolo relativo fra i due fasci,...)

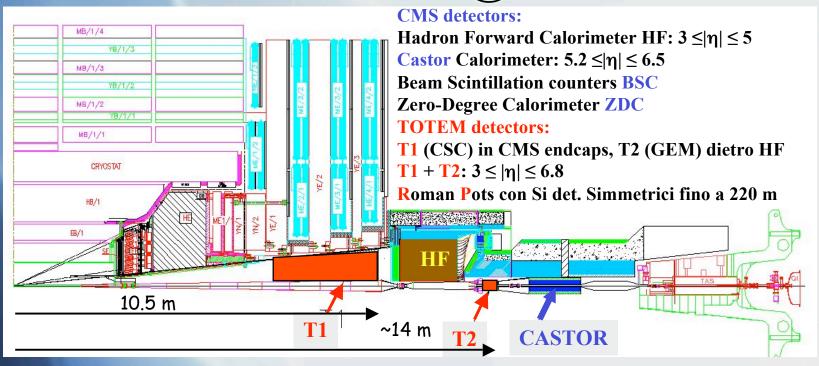


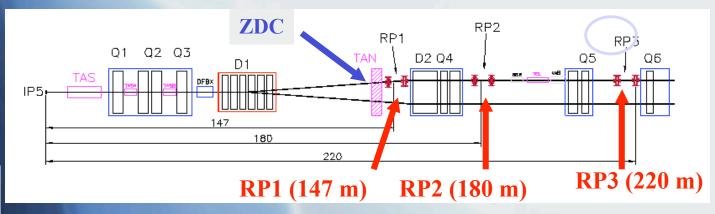


# Forward Detectors @ ATLAS

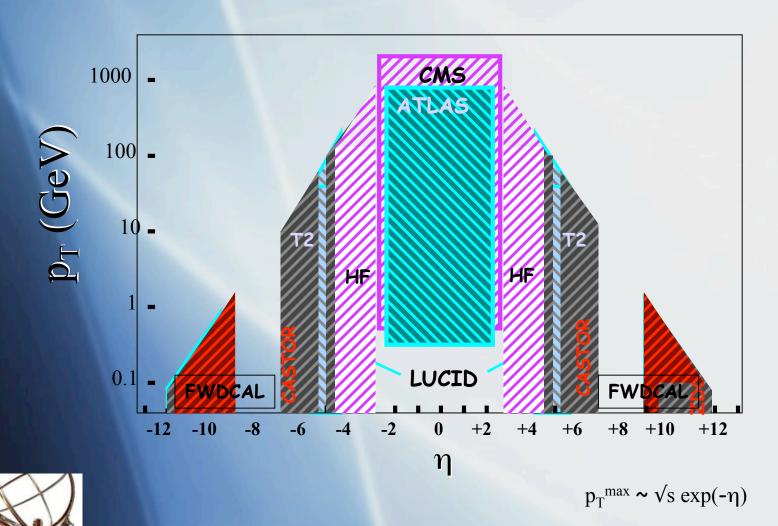


# Forward Detectors @ CMS/Totem





# ATLAS-CMS: Copertura p<sub>T</sub>-η

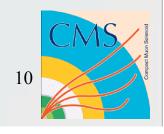




# Importanza della Misura di Luminosità Istantanea

- Controllare il deterioramento del fascio
- Monitorare il numero di interazioni per bunch crossing
- Fornire intervalli temporali a luminosità nota (Luminosity Block) da associare ai dati sperimentali





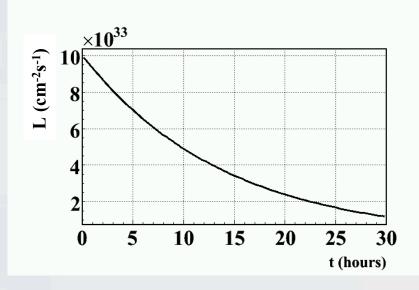
#### Deterioramento del fascio

La luminosità istantanea della macchina decresce

esponenzialmente come:

$$L = L_0 e^{-t/\tau} \quad \tau \approx 14 \,\mathrm{h}$$

- Dovuto a:
  - Scattering tra i bunch (IBS)
  - Interazioni tra i fasci
  - Interazioni con il gas residuo
  - Radiazione di sincrotrone



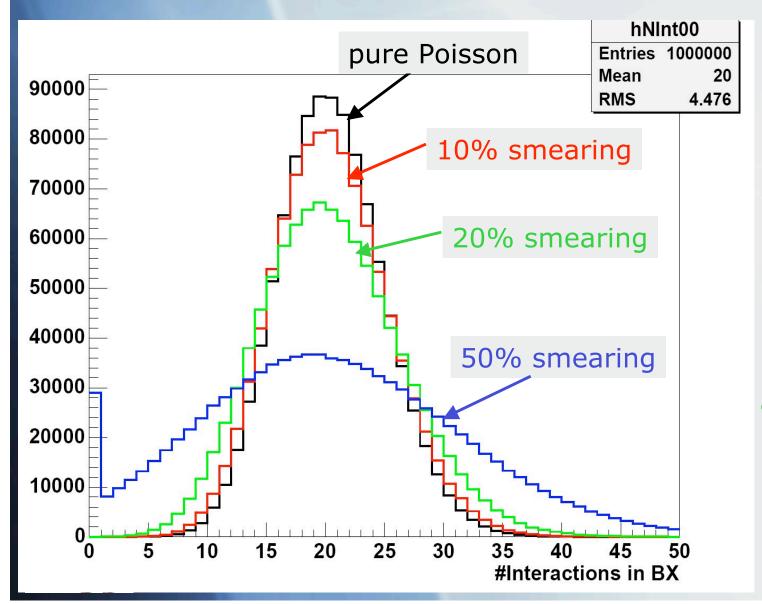
[LHC Design Performance, EDMS CERN-0000020013]

Deterioramento atteso ~ 1% in 10 min

⇒ Taratura dei pre-scaler



# Numero di interazioni per BX



Effetto di uno Smearing Gaussiano ad Alta Luminosità

→ Pile-up non Poissoniano

Elevato numero di interazioni per Bunch crossing



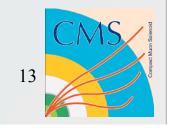
## Luminosity Block

LB: Intervallo temporale per cui è possibile definire un valore di luminosità istantanea costante (~ min)

- Per poter definire tali intervalli temporali è necessario avere un buon controllo della luminosità del fascio istante per istante (L)
- I dati acquisiti in ogni LB faranno riferimento al relativo valore di luminosità integrata







#### Misura della luminosità

 Ogni processo fisico avviene con una frequenza (R) uguale al prodotto della sua sezione d'urto (σ) per la luminosità istantanea (L)

$$N = \sigma \times \mathcal{L}$$

$$R = \sigma \times \mathsf{L}$$

Misurare la luminosità significa determinare per un dato processo sia R (N) corretto per le efficienze (trigger ed accettanza) che σ

- Da un processo le cui sezione d'urto ed efficienze siano ben note ed il rate abbastanza grande è possibile ricavare la luminosità
  - LEP: QED Bhabha scattering
  - HERA: ep bremsstrahlung





### Misura della luminosità ad LHC

- Interazioni pp calcolabili con buona precisione
  - QED, EW, QCD
  - Piccolo errore statistico (<1%)</li>
    - → campioni omogenei di almeno 10K 100K eventi
- Teorema Ottico
  - frequenza di scattering elastico a piccolo angolo + frequenza totale di scattering
  - Scattering Coulomb

#### **Obiettivo**

- misurare  $\mathcal{L}$  con un'incertezza  $\leq 2-3\%$
- informazione ridondante





# Interazioni pp di riferimento

#### QED: $\sigma_{OED}$ piccola

$$-pp \rightarrow (p+\gamma^*)+(p+\gamma^*)\rightarrow p+(\mu-\mu+)+p$$

■ Bassa frequenza (<< 1 Hz) anche a L=10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> No Monitor Online

16

■ Processo calcolabile con un'accuratezza ~1%

#### **I** W: W/Z → leptoni

- Processi ben calcolabili da un punto di vista teorico (NNLO disponibile)
- Alta frequenza: ~6Hz per Z→  $\mu^+\mu^-$ , ~60Hz W→  $\mu$ V a L=10<sup>34</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>
  - Monitor online solo ad alta luminosità
  - $(\Delta \mathcal{L}/\mathcal{L})_{\text{sist}} \sim 4-6\%$ ;  $(\Delta \mathcal{L}/\mathcal{L})_{\text{stat}} \sim 1-5\%$

#### QCD: $\sigma_{tot} \sim 100 \text{ mb}$

- Misurata con ottima precisione (TOTEM:  $\Delta \sigma_{tot} \sim 1\%$ )
- Metodo basato sul conteggio dei bunch crossings con interazioni e/o privi di interazioni pp
  - Monitor online principalmente a basse luminosità

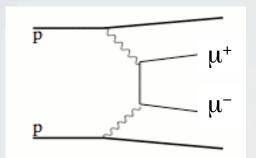
### QED:

1500

1000

500

background



Segnale

Pondo

 $pp \rightarrow (p+\gamma^*)+(p+\gamma^*) \rightarrow p+(\mu^-+\mu^+)+p$ 

400

200

25

25

 $p_{T}^{(1)}=p_{T}^{(2)}$ 

- $\sigma_{\mu\mu} \sim 1 \text{ pb} \ (\sim 0.01 \text{ Hz a } \mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$ ⇒  $\mathcal{L} > 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- segnale: coppia μμ con
  - $m_{\mu\mu} \sim GeV$ ,  $p_T(\mu\mu) \simeq 0$
  - $p_T(\mu)$ ≥5-6 GeV,  $|\eta(\mu)|$ <2.5,
- Fondi:
  - Drell-Yan
  - Decadimenti semileptonici dei quark pesanti
- → tagli offline

 $\Delta \mathcal{L}/\mathcal{L} \sim 2\%$  per 10 fb<sup>-1</sup>



 $(p_t^{(1)} - p_t^{(2)})/\sigma_{pt}$ 

[ATLAS-TDR-15, May 1999]

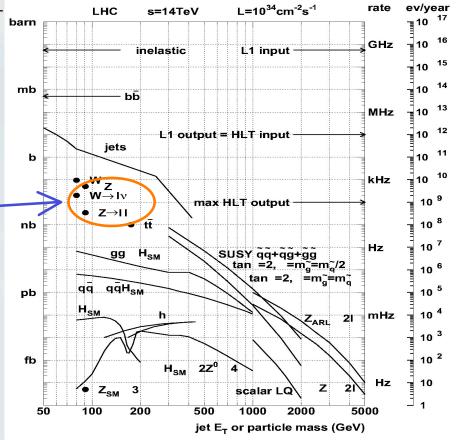
φ (rad)



### Normalizzazione con W e Z

$$pp \to W \to \ell \nu$$
 &  $pp \to Z \to \ell^+ \ell^-$  barn

- Alti rates (O(10) Hz ad alta L)
- Ricostruzione molto precisa (alte efficienze, fondi trascurabili etc.)
- PDF e sezioni d'urto partoniche conosciute ~ 4-5% al NNLO
  - Assunzione sulle sezioni d'urto per misurare la luminosità o vice-versa
  - Metodo quantitativo per la valutazione simultanea di  $\mathcal{L}$  e di  $\sigma(Z)/\sigma(W)$  tramite l'utilizzo di PDFs error sets e Confidence Levels [hep-ph/0104053]





$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} (pp \rightarrow Z + X \rightarrow \mu^+ \mu^- + X) = 0.13 \% \pm 2.3 \% \pm \text{lumi uncert.}$$

CMS Note-2006/124

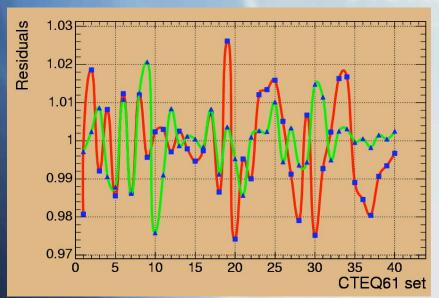
CMS Note-2006/082

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma}(pp \rightarrow W + X \rightarrow \mu \nu + X) = 0.04\% \pm 3.3\% \pm \text{lumi uncert.}$$



### Incertezze da PDF e scale QCD

σ(ZZ->4μ)/σ(Z→2μ) vs σ(ZZ->4μ) Normalizzazione a Drell Yan



Nella Regione di ricerca H->4μ: 195 – 203 GeV

 $P_{T}\mu > 16 \text{ GeV}$ M( $\mu + \mu$ -)>12 GeV

Normalizzando  $\sigma(ZZ -> 4\mu)$  a  $\sigma(Z -> 2\mu)$  si ha una riduzione di un fattore  $\sim 2$  delle incertezze teoriche  $\Delta(QCD)$  e  $\Delta(PDF)$ 

1.000	$\sigma(ZZ->4\mu)$	$\sigma(Z->2\mu)$	$\sigma(ZZ->4\mu)/\sigma(Z->2\mu)$
	195 GeV $<$ $M_{4\mu}$ $<$ 203 GeV	PTμ > 7 GeV	$195 \text{ GeV} < M_{4\mu} < 203 \text{ GeV}$
	1.12 fb	924 pb	1.24*10-6
Δ (QCD scale)	±3.5%	±4.4%	±1.9%
Δ (PDF)	±4.9%	± 4.3%	±2.3%



#### [CMS Note 2006/068]



### CD: Rates di Minimum Bias (MB)

Numero medio di interazioni: 
$$\mu = \frac{\langle N \rangle}{BX} = \frac{\sigma_{mb}L}{f}$$

#### Conteggio diretto (tipicamente adottato per μ<<1)</p>

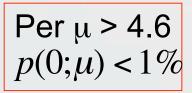
- Esempi di richiesta:
  - almeno una torre calorimetrica con  $E_T > E_{T0}$  (HF in CMS)
  - segnale negli scintillatori/tubi Cerenkov (BSC e MBTS, BCM e LUCID)

#### Conteggio indiretto (tipicamente adottato per μ~1)

- Probabilità BX privi di interazione:  $p(0;\mu) = e^{-\mu}$
- Esempi di richiesta:
  - tutte le torri con  $E_T < E_{T0}$
  - nessun segnale negli scintillatori/tubi Cerenkov

#### Misura del segnale

- $\Sigma E_{T}$
- monitoraggio della corrente anodica (TileCal e LAr)
- Numero di scintillatori/tubi colpiti





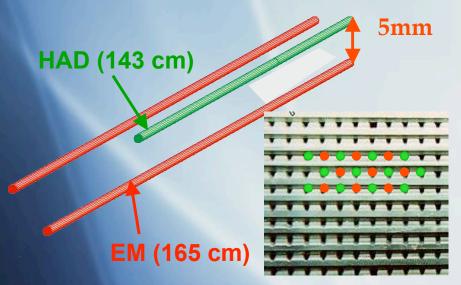




### Il calorimetro Hadron Forward di CMS (HF)

#### Caratteristiche principali:

- Risposta veloce
- Dimensioni trasversali dello sciame

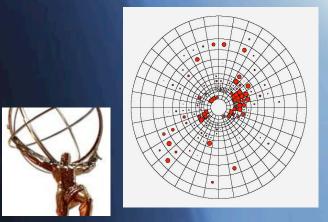


Parte attiva in fibra al quarzo per tollerare gli alti livelli di radiazione (>1 Grad accumulati in 10 anni)

Sensibile alla Luce Cherenkov

- L'energia visibile e' trasportata da particelle cariche relativistiche.
- La larghezza dello sciame dipende dal raggio di Moliere, non da  $\lambda_i$
- La luce e' generata principalmente a 45°

25pppritteractions:



Segmentazione  $\Delta \eta \times \Delta \phi = 0.175 \times 0.175$ Copertura 3  $\langle |\eta| < 5$ 1728 torri, i.e. 2 x 432 torri per EM e HAD

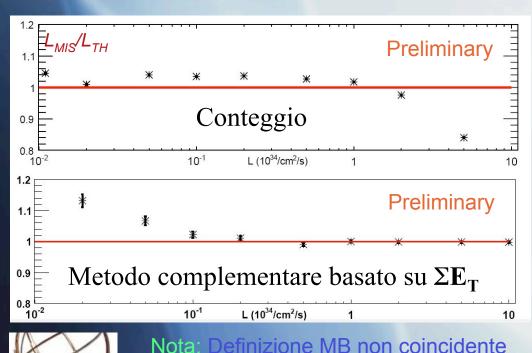


**FERRO** 

### Rates di Minimum Bias in CMS

- Monitor di luminosità indipendente da DAQ & Trigger
  - Campionamento dei rates 1 ÷ 10 Hz
- Misura basata sul calorimetro adronico forward HF 3<η<5
- Soglia per torre  $\Delta \eta \times \Delta \phi \sim 0.175 \times 0.175$ 
  - 6 FADC, ovvero ~ 2 foto-elettroni
  - 8 GeV di energia incidente:  $0.13 \text{ GeV} < E_{T0}(\eta) < 0.75 \text{ GeV}$

[CMS PTDR Vol. 1, Chapter 8]



Pythia 6.227 inclusi diffrattivi + Simulazione dettagliata CMS

- Effetto beam-gas trascurabile
- Ulteriore lavoro necessario per lo studio dei sistematici da modellizzazione degli eventi e dai rapporti delle sezioni d'urto hard / soft (in particolare SD and DD)

(efficienze comunque molto alte per tutti i processi)

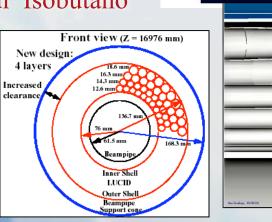
22

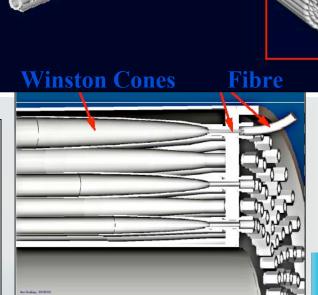
con quella del trigger specifico

### LUCID: monitor di luminosità

LUCID: "LUminosity measurement using Cerenkov Integrating Detector

- Misura relativa della luminosità (bunch per bunch ed integrata);
- Copertura in  $\eta$  per misure di fisica diffrattiva ( $\eta$ =[5.5,6.1])
- ~17 m dal punto di interazione
- Due rivelatori simmetrici disposti attorno alla beam pipe
- 168 tubi di Al riempiti di Isobutano
  - ⇒ luce Cerenkov









#### LUCID

#### Conteggio dei segnali

- Ad alti valori di μ è importante distinguere il numero di tracce per tubo
- $\Delta L/L \leq 5\%$

#### Conteggio degli zeri:

$$\mu=25$$
:  $N_{zero}/N_{BX} = 2.8 \ 10^{-8}$   
 $N_{zero}/N_{BX} = 5.5 \ 10^{-8}$ 

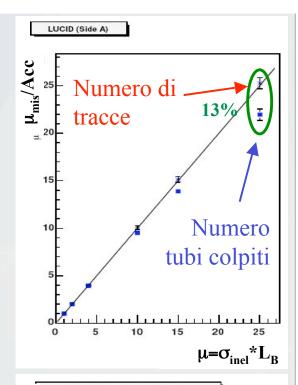
Coinc	4h50min	30 min	
NoCoinc	2h30min	15 min	
ΔL/L	1%	3%	

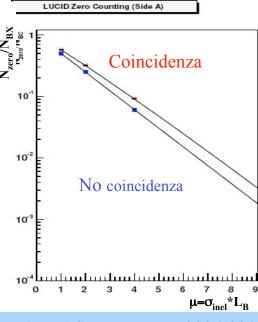
Ad alto pile-up è preferibile il conteggio dei segnali



Coincidenza = no segnale in almeno uno dei due moduli

IV Workshop Italiano sulla Fisica di ATLAS e CMS





[ATLAS-LUM-PUB-2006-001]

### Teorema Ottico

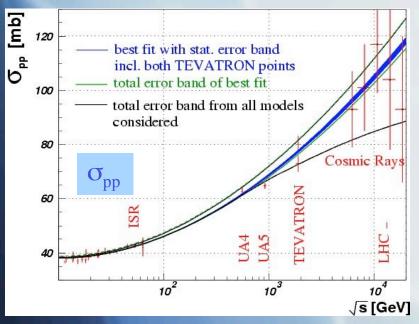
$$\begin{cases}
\frac{d\sigma_{\text{el}}}{dt}\Big|_{t=0} = (1+\rho^2)\frac{\sigma_{\text{tot}}}{16\pi} \\
\sigma_{\text{tot}} = \frac{N_{\text{inel}} + N_{\text{el}}}{L}
\end{cases} \qquad \begin{cases}
L = \frac{(1+\rho^2)}{16\pi} \frac{N_{\text{tot}}^2}{\frac{dN_{\text{el}}}{dt}\Big|_{t=0}} \\
\sigma_{\text{tot}} = \frac{N_{\text{tot}}}{L}
\end{cases}$$

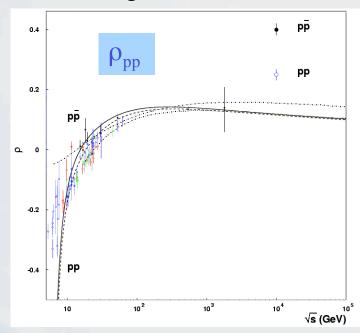
- Misurando la frequenza totale dell'interazione  $(N_{tot})$  e quella del solo scattering elastico in avanti  $(dN_{el}/dt \mid_{t=0})$  è possibile ricavare sia L che  $\sigma_{tot}$ 
  - $N_{\text{tot}}$  = misura dell'interazione totale ⇒ grande copertura in accettanza |η|~ 7-8
  - $N_{\rm el}$  = frequenza di protoni deflessi a piccolo angolo ⇒ Roman Pot
  - $-\rho = \text{Re F}(0)/\text{Im F}(0)$  noto con sufficiente accuratezza da non alterare la misura per più dello 0.5%



# Il parametro p

- $\rho = \text{Re F}(0)/\text{Im F}(0)$  si lega alla sezione d'urto totale tramite la relazione di evoluzione
- Sensibile alla sezione d'urto totale oltre l'energia a cui  $\rho$  è misurata  $\Rightarrow$  è possibile fare predizioni di  $\sigma_{tot}$  a energie maggiori di LHC
- La relazione di evoluzione vale ancora all'energia di LHC?







Predizione LHC  $\rightarrow \sigma_{\text{tot}} = 111.5 \pm 1.2 \stackrel{+4.1}{-2.1} \text{ mb}$ 

[Cudell et al., PRL 89 201801 (2002)]



# Scattering Coulomb

A t ≈ 0 la sezione d'urto diventa sensibile all'interazione elettromagnetica tramite l'interferenza Coulomb e quindi il rate di eventi può essere espresso come:
Interazione

$$\left. \frac{dN}{dt} \right|_{t=0} = L\pi \left| f_C + f_N \right|^2 \approx L\pi \left| \frac{2\alpha_{\text{EM}}}{|\mathbf{t}|} + \frac{\sigma_{\text{tot}}}{4\pi} (i+\rho) e^{-b^{|t|}/2} \right|^2$$

- Scattering Coulomb + Teorema Ottico  $N_{tot}$ Le  $\sigma_{tot}$
- Raggiungere la regione di scattering Coulomb è un compito molto arduo in quanto molto vicina al fascio



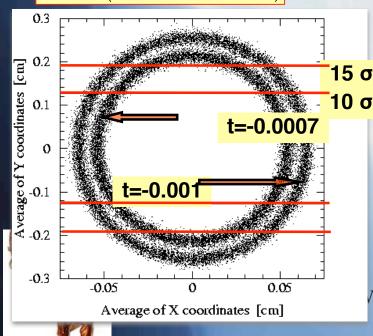
forte

### Roman Pots in ATLAS

ATLAS e CMS

- Misura della luminosità integrata basata sullo scattering Coulomb
- 240 m dal punto di interazione
- Utilizzo di ottiche speciali ad alto β\*
- Utilizzabile solo a L≈10<sup>27</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

$$-t = (p\theta^*)^2 = p^2(\overline{\theta}_x^2 + \overline{\theta}_x^2)$$
$$= p^2 \left( \left( \frac{\overline{x}}{L_{eff,x}} \right)^2 + \left( \frac{\overline{y}}{L_{eff,y}} \right)^2 \right)$$



Precisione su 0.17mm  $\Delta \mathcal{L}/\mathcal{L} \sim 2-3\%$ reference  $Al_2O_3$ edge in linea con i ceramic substrate requirements! y-measurement detector scintillator plate x-measurement for triggering detector Roman Pot window (0.2mm)  $10-15 \sigma \text{ or } >= 1.5 \text{ mm}$ Vorkshop Italiano sulla Fisica di

spacers

#### Conclusioni

ATLAS e CMS misurano sia luminosita' istantanea (L) che luminosita' integrata ( $\mathcal{L}$ ) con metodologie ridondanti e un ricco apparato sperimentale, in particolare nella regione forward

#### Monitor di luminosità L (oltre all'informazione LHC)

- Basato sulla precisa misura di σ<sub>tot</sub> da parte di TOTEM
  - Principalmente tramite LUCID in ATLAS e HF in CMS
- Ad alte luminosita' anche i rates di W e Z sono utilizzabili

 $(\Delta L/L)_{\rm stat}$   $\sim 1-5\%$ 

#### Misura di luminosità L

- Alto β\* (10<sup>27</sup> cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)
  - ATLAS userà il metodo della normalizzazione Coulomb per calibrare i monitor di luminosità (LUCID e BCM)
  - CMS ricorrerà alla misura di TOTEM

 $(\Delta \mathcal{L}/\mathcal{L})_{\text{syst}}$ 

- >1-10 fb<sup>-1</sup>
  - ATLAS e CMS utilizzano normalizzazione a processi di sezione d'urto calcolabili con buona precisione: W/Z -> leptoni, pp->ppμμ





# Backup



### Run di calibrazione a 900 GeV

Roadonablo						
k <sub>b</sub>	43	43	156	156		
intensity per beam	8.6 1011	1.7 10 <sup>12</sup>	6.2 1012	1.6 10 <sup>13</sup>		
Luminosity (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	2 10 <sup>28</sup>	7.2 10 <sup>28</sup>	2.6 10 <sup>29</sup>	1.6 10 <sup>30</sup>		
event rate <sup>1</sup> (kHz)	0.4	2.8	10.3	64		
W rate <sup>2</sup> (per 24h)	0.5	3	11	70		
Z rate <sup>3</sup> (per 24h)	0.05	0.3	1.1	7		

1.	Assuming 450GeV inelastic cross section	40 mb
2.	Assuming 450GeV cross section $W \rightarrow lv$	1 nb
3.	Assuming 450GeV cross section $Z \rightarrow ll$	100 pb



[R.Tenchini]

Reasonable

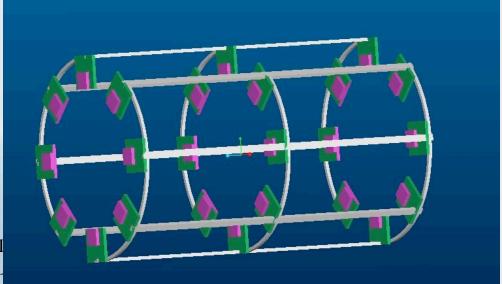


**Maximum** 

# Pixel Luminosity Telescope (PLT) (proposto per CMS)

#### Misura della luminosita' istantanea

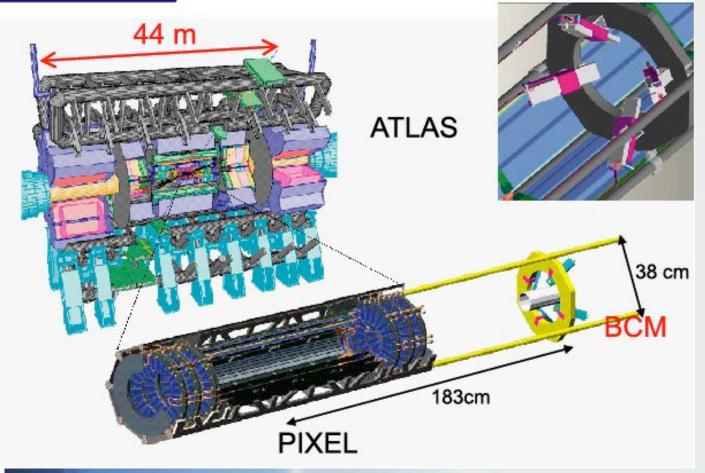
- Telescopi a piccolo angolo angolo (~1°)
- Tre piani di sensori al diamante (8 mm x 8 mm)
- Sensori collegati al CMS pixel ROC tramite bump bonding
- Coincidenze tra 3 sensori dal segnale veloce del ROC
- Telescopi collocati a r = 4.5 cm, z = 175 cm
- Lunghezza totale 20 cm
- 8 telescopi per parte





### Beam Condition Monitor

#### Realisation





### BCM Offline Studies

#### **BCM** triggered ATLAS Events:

- BCM triggered (luminosity) events are pre-scaled to meet the allowed event rate for the luminosity data stream
- The trigger information in the event can be used to get the BCM multiplicity in case such triggers are used.
- Luminosity studies can be made offline also using other detectors, e.g. particle counting using the ID etc.
- CTP trigger info and Offline data can be used to study TDAQ (dead-time) corrections
- •Even without BCM data in the ATLAS event, a BCM LVL1 trigger is already good
- Allows for luminosity studies:
  - On-line studies from the CTP information (even per BCID)
  - · Offline studies using other detectors and trigger information
  - · Both synchronized to LBs



