

Corso di Fisica Nucleare e Subnucleare II  
Prof. Carlo Dionisi

# Misura della luminosità al Large Hadron Collider

Ambra Provenza

Tutor: Andrea Messina

# Sommario

- Definizione di luminosità
- Misure di luminosità
  - ✓ Luminosità relativa
  - ✓ Luminosità assoluta: Metodo van der Meer
- Incertezze sistematiche
- Un esempio di detector: LUCID

# Luminosità

La **luminosità istantanea** è definita come

$$\mathcal{L} = \frac{R_{inel}}{\sigma_{inel}} \begin{array}{l} \longrightarrow \text{rate di collisioni inelastiche} \\ \longrightarrow \text{Sezione d'urto inelastica per il processo pp} \end{array}$$

La luminosità ha le dimensioni di un flusso  $cm^{-2}s^{-1}$

In un acceleratore la luminosità è una grandezza molto importante, poichè, fissata la sezione d'urto del processo, si riferisce al numero di particelle che attraversano la superficie di impatto per unità di tempo. Più è alta la luminosità, maggiore è il numero di conteggi nello stato finale.

La **luminosità integrata** è definita come

$$L = \int_0^t \mathcal{L}(t') dt'$$

Unità di misura:  $cm^{-2}$

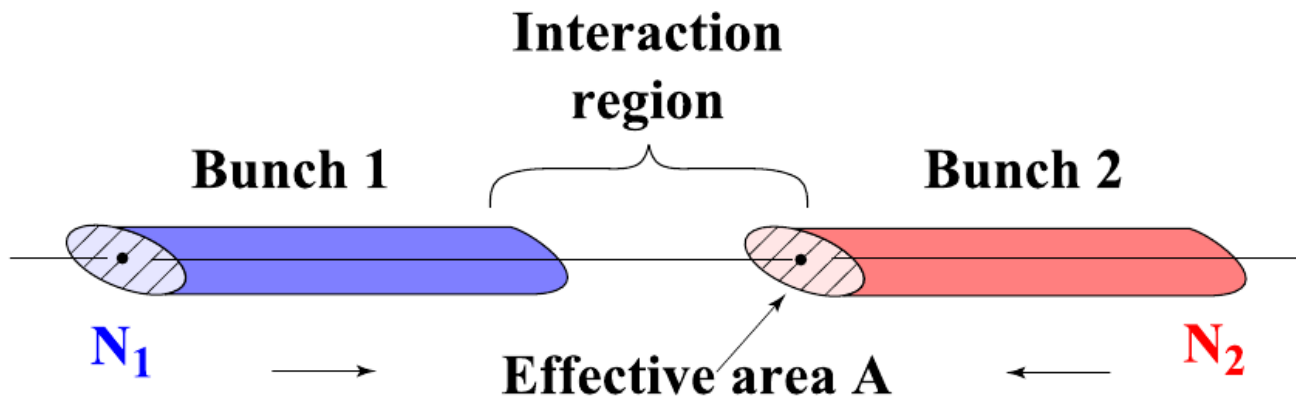
Unità di misura utilizzata:  $1 \text{ b}^{-1} = 10^{24} \text{ cm}^{-2}$

# Luminosità

La **luminosità** può essere determinata a partire dai parametri della macchina (caratteristiche geometriche e cinematiche del fascio)

$$\mathcal{L} = n_b \frac{N_1 N_2 f}{A_{eff}} \rightarrow$$

Sezione trasversa del fascio, misurabile con il metodo di Van der Meer



$N_1$  : Numero medio di particelle in ciascun pacchetto del fascio 1

$N_2$  : Numero medio di particelle in ciascun pacchetto del fascio 2

$n_b$  : Numero di pacchetti

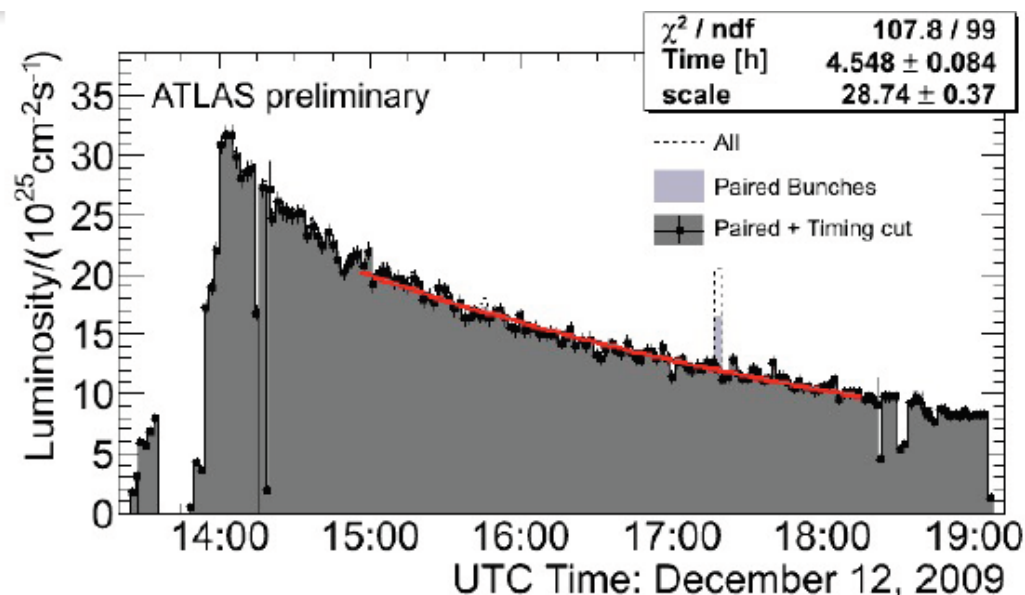
$f$  : Frequenza di rivoluzione dell'acceleratore

# Deterioramento della luminosità

A LHC la luminosità istantanea decresce circa dell' 1% ogni 10 minuti, secondo la legge esponenziale

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau \simeq 14 \text{ h}$$



Ipotesi: probabilità di deterioramento costante nel tempo.

Fattori che contribuiscono al deterioramento:

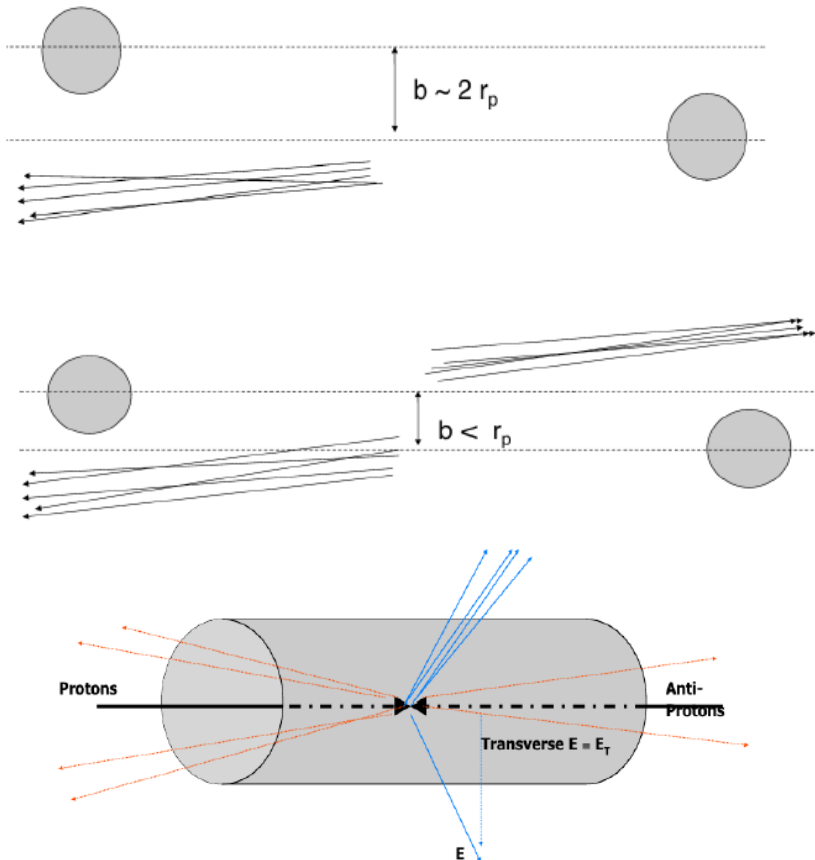
- decadimento dell'intensità del fascio per esempio particelle fuori orbita o collisioni con il gas
- aumento della sezione trasversa (*emittance growth*)

Attualmente  $\tau \sim 1\text{-}2$  giorni

# Scattering inelastico pp

Il processo fisico viene scelto in base a  $L$  da misurare. Per  $10^{27} < L < 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
 sezione d'urto grande  $\longrightarrow$  processo ad alta rate ( $R = L\sigma$ )  $\longrightarrow$  alta statistica

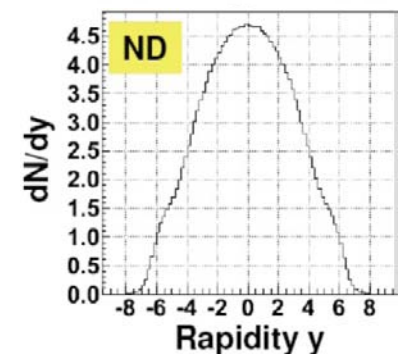
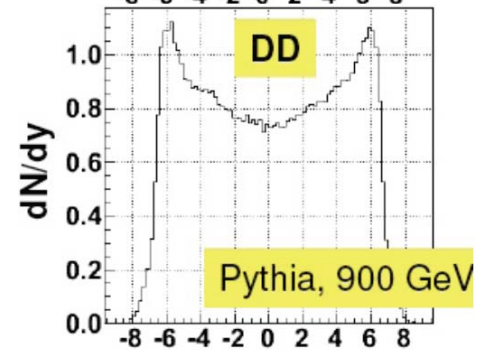
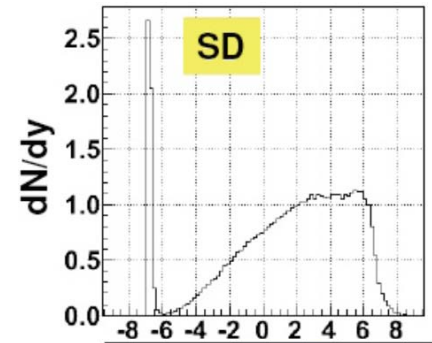
Processo utilizzato: **scattering inelastico** pp ( $\sigma \sim 100 \text{ mb}$ )



• Single Diffractive

• Double Diffractive

• Non diffractive



# Misura relativa della luminosità

Abbiamo definito  $\mathcal{L} = \frac{R_{inel}}{\sigma_{inel}}$

Se l'acceleratore opera alla frequenza di rivoluzione

$$\mathcal{L} = \frac{\mu n_b f_r}{\sigma_{inel}} = \frac{\mu^{vis} n_b f_r}{\epsilon \sigma_{inel}} = \frac{\mu^{vis} n_b f_r}{\sigma_{vis}}$$

Ciò che possiamo misurare!

$\mu$  : Numero medio di interazioni inelastiche

$\sigma_{inel}$  : Sezione d'urto inelastica

$\epsilon$  : Efficienza per una interazione inelastica pp che soddisfa determinati criteri di selezione

$\mu^{vis} = \epsilon \mu$  : numero medio di interazioni visibili per *Bunch Crossing* (BC)

$\sigma_{vis}$  : sezione d'urto visibile. E' la costante che lega la quantità misurabile  $\mu^{vis}$  alla luminosità

# Misura relativa della luminosità

Una misura della luminosità relativa si ottiene a partire da  $\mu^{vis}$ , che non viene misurato direttamente. Si misura una grandezza che è funzione di  $\mu^{vis}$ , cioè la rate di eventi visti da un rivelatore. Tecnica di conteggio :

Event counting : si determina la frazione di pacchetti durante i quali un determinato detector registra un **evento**



Usato da ATLAS



Almeno una interazione per attraversamento viene rivelata da almeno un detector



# Event Counting

**Problema:** Vogliamo determinare la relazione che ci permette di ricavare  $\mu$  a partire dal numero di conteggi.

E' più facile ragionare in termini di eventi vuoti (senza interazione).



$$P(\text{interazione}) = 1 - P(\text{non interazione})$$

La probabilità di avere 0 interazioni è:

$$P_{\mu}(0) = \frac{e^{-\mu} \mu^0}{0!} = e^{-\mu}$$

La probabilità di osservare 0 interazioni quando ce ne sono n è

$$P_{\mu}^{0count}(n > 0) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\mu} \mu^n}{n!} (1 - \epsilon)^n = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\mu} \frac{(\mu(1 - \epsilon))^n}{n!} - e^{-\mu} = e^{-\mu\epsilon} - e^{-\mu}$$

La probabilità di osservare 0 interazioni per BC è

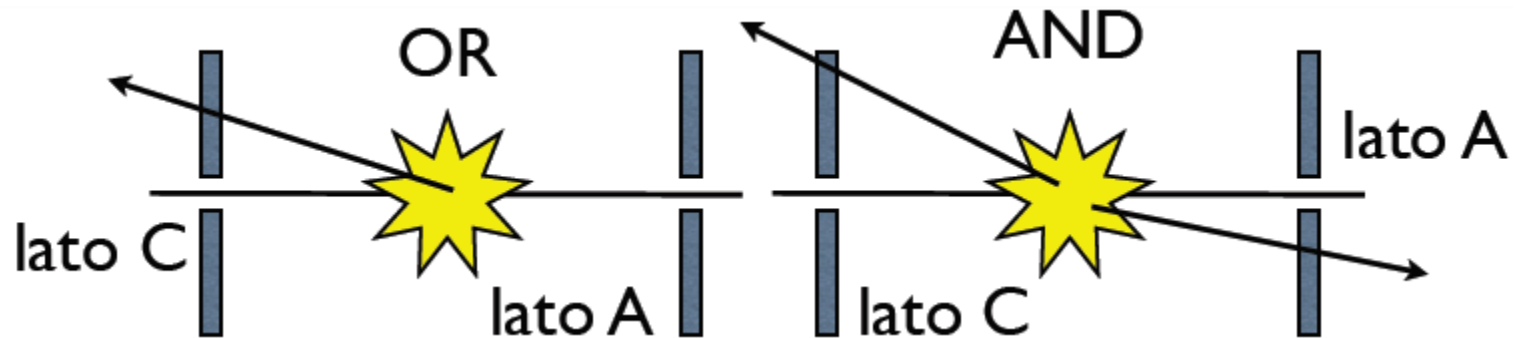
$$P_{\mu}^{0count} = P_{\mu}(0) + P_{\mu}^{0count}(n > 0) = e^{-\mu\epsilon}$$

# Event Counting

Possiamo farlo con algoritmi di tipo

**Event\_Or**: vengono contati gli eventi sopra una determinata soglia in un dato rivelatore su almeno uno dei due lati del rivelatore;

**Event\_And**: vengono contati gli eventi sopra una determinata soglia in un dato rivelatore su entrambi i lati del rivelatore



Ipotesi:

- Il numero di interazioni pp in ogni pacchetto segue la statistica di Poisson;
- L'efficienza per determinare una singola interazione inelastica pp è costante, cioè non cambia se si hanno più interazioni nello stesso pacchetto.

# Event\_OR

La probabilità di osservare 0 eventi per BC è

$$P_0(\mu^{vis}) = e^{-\mu^{vis}} = e^{-\mu \epsilon^{OR}}$$

La probabilità di osservare almeno un evento è

$$P_{\text{Event\_OR}}(\mu^{vis}) = \frac{N_{OR}}{N_{BC}} = 1 - P_0(\mu^{vis}) = 1 - e^{-\mu^{vis}}$$

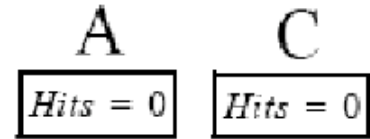
Con:

$N_{OR}$  : Numero di pacchetti, in un dato intervallo di tempo, in cui almeno una interazione pp soddisfa i criteri di selezione dell'algoritmo OR considerato

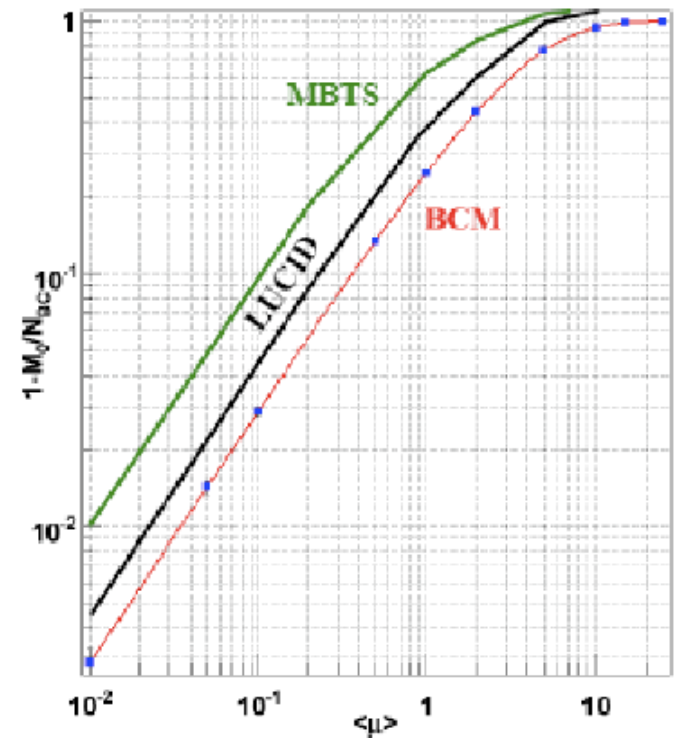
$N_{BC}$  : Numero totale di pacchetti nello stesso intervallo di tempo

Da cui

$$\mu^{vis} = -\ln\left(1 - \frac{N_{OR}}{N_{BC}}\right)$$



Measured empty-event probability



Più alta è  $\epsilon$  prima il rivelatore satura

# Luminosità assoluta

La misura della rate permette di determinare  $\mu$ , ma per misurare  $\mathcal{L}$  è necessario conoscere la sezione d'urto.

**Problema:** la sezione d'urto per lo scattering inelastico protone - protone a 7 TeV non è stata misurata.

**Soluzione:** calibrare la tecnica dei conteggi utilizzando la luminosità assoluta, determinata con il metodo di van der Meer.

# Metodo di van der Meer

In termini dei parametri dei fasci incidenti la luminosità è definita come

$$\mathcal{L} = n_b f_r n_1 n_2 \int \hat{\rho}_1(x, y) \hat{\rho}_2(x, y) dx dy = n_b \frac{n_1 n_2}{A_{eff}} f_r$$

$f_r$  nota;  $n_b$   $n_1$   $n_2$  misurati dai *Beam Current Transformer* (BCT)

$\hat{\rho}_{1(2)}(x, y)$  = Densità dei fasci, tale che  $\int \int \rho(x, y) dx dy = 1$

$I_{x,y} = \int \hat{\rho}_1(x, y) \hat{\rho}_2(x, y) dx dy = \frac{1}{A_{eff}}$  E' l'integrale di sovrapposizione ed è ciò che ricaviamo con il metodo di van der Meer

Assumendo che le densità dei fasci siano scorrelate in  $x$  e  $y$

$$\mathcal{L} = n_b f_r n_1 n_2 I_x(\rho_1(x), \rho_2(x)) I_y(\rho_1(y), \rho_2(y))$$

# Metodo di van der Meer

Il metodo proposto da Van der Meer per misurare la luminosità assoluta consiste nel misurare direttamente l'integrale di sovrapposizione

Consideriamo la direzione  $x$ . Nel caso in cui i due fasci non sono in asse ma i loro centri siano separati di una distanza  $\Delta x$  si ha:

$$R(\Delta x) = C I_x(\rho_1(x)\rho_2(x - \Delta x))$$

Dove  $R(\Delta x)$  è la *rate* di eventi quando i fasci sono separati da una distanza  $\Delta x$  e  $C$  è una costante da determinare. van der Meer dimostrò che

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} R(\Delta x) d(\Delta x) &= C \int_{-\infty}^{\infty} d(\Delta x) \int_{-\infty}^{\infty} (\rho_1(x)\rho_2(x - \Delta x)) dx = \\ &= C \int_{-\infty}^{\infty} \rho_1(x) \left( \int_{-\infty}^{\infty} \rho_2(x - \Delta x) d(\Delta x) \right) dx = C \int_{-\infty}^{\infty} \rho_1(x) dx = C \end{aligned}$$

# Metodo di van der Meer

Facendo un ragionamento analogo per la direzione y otteniamo

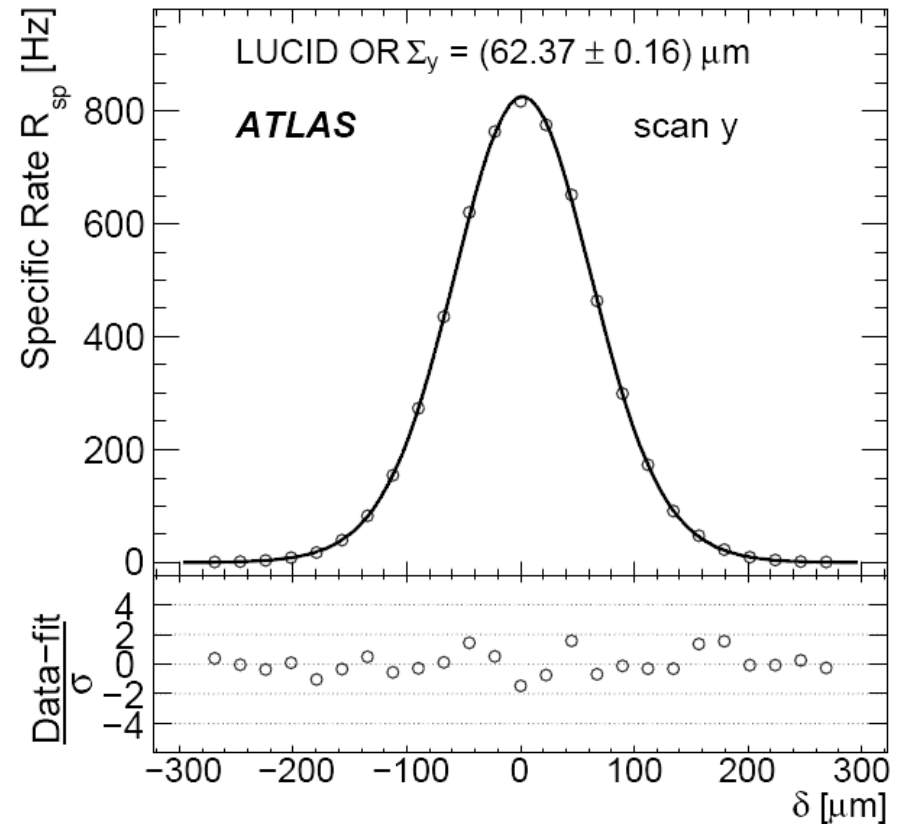
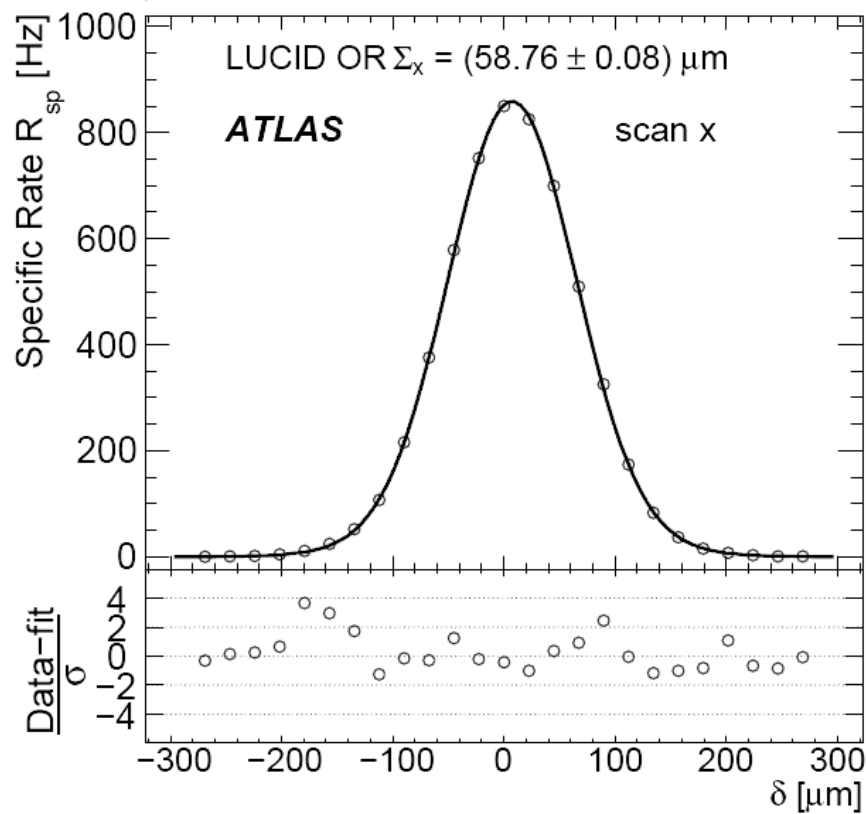
$$A_{eff} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} R(\Delta x) d(\Delta x) \int_{-\infty}^{\infty} R(\Delta y) d(\Delta y)}{R(0,0)}$$

Abbiamo scritto l'area effettiva in termini di quantità misurabili.

Sperimentalmente si misura la rate di interazione in funzione della separazione tra i due fasci. Per ciascuna direzione si ottiene una curva che ha un massimo per  $\Delta x = 0$  ( $\Delta y = 0$ ). Si calcola l'area sotto la curva e l'area effettiva sarà il rapporto tra questa ed il valore della curva a  $\Delta x = 0$  ( $\Delta y = 0$ ).

I fasci possono avere uno spostamento massimo dal centro pari a  $270 \mu m$ .  
Ad ogni scan i fasci vengono lasciati fermi per 30s e viene monitorata la luminosità.

# Metodo di van der Meer



Risultato dello scan nelle direzioni x e y per il detector LUCID. Nel pannello sottostante è mostrata la differenza tra la rate misurata e il valore predetto dal fit (doppia Gaussiana) normalizzato alle incertezze statistiche dei dati.



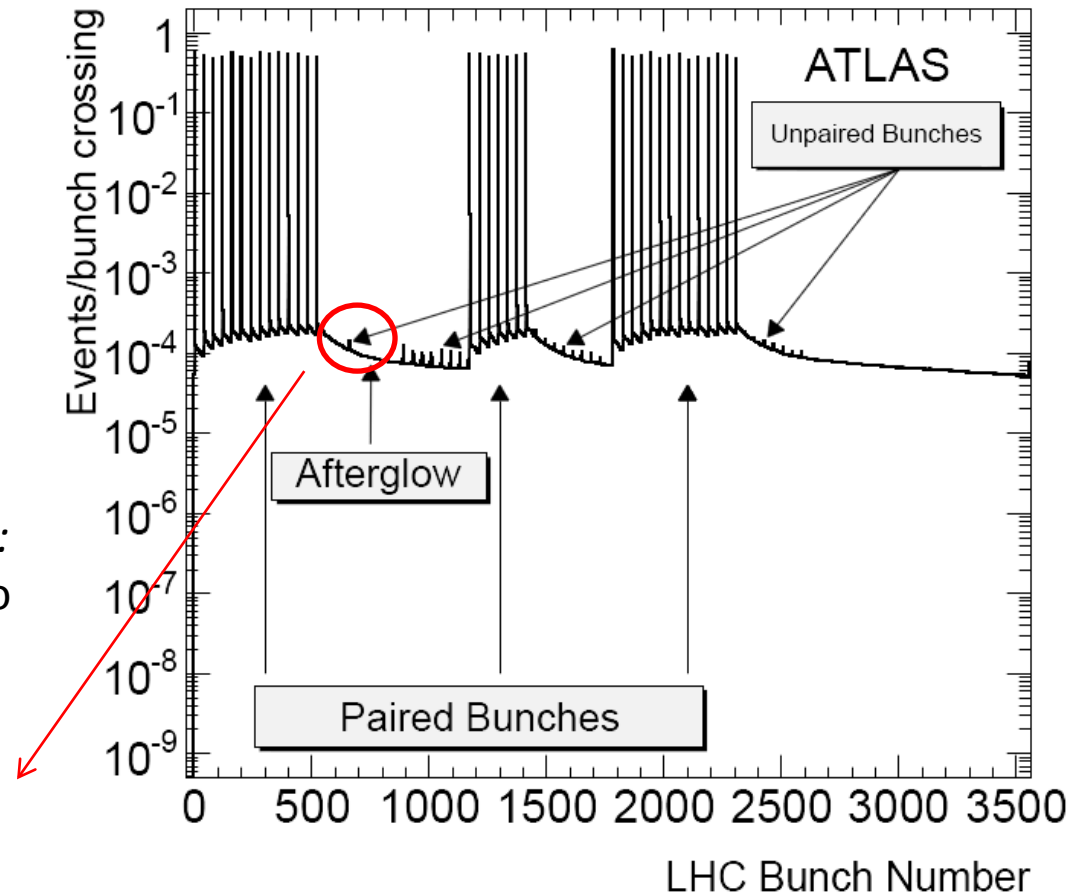
# Fondo

In LHC si possono avere massimo 2808 pacchetti.  
Pacchetti non collidenti *unpaired bunch*;  
pacchetti collidenti *paired bunch*.

Informazioni sul fondo si possono ottenere confrontando la rate di paired e unpaired bunch

Paired bunch seguiti da code (*Afterglow*): prodotti delle collisioni pp che colpiscono i rivelatori in avanti e vengono scatterati per decine di  $\mu S$

Unpaired bunch collidono con molecole residue del gas o con i residui delle collisioni precedenti



# Incertezze sistematiche

Le principali incertezze sistematiche nella misura della luminosità riguardano:

- L'intensità dei fasci
- Calibrazione della scala delle lunghezze
- Decentramento dei fasci
- Aumento della sezione trasversa del fascio (Emittance Growth)
- Dipendenza di  $\mu$  dalla rate di conteggi
- Scelta del fit

# Intensità dei fasci

La misura delle correnti  $n_2$  e  $n_1$  è affidata ai *DC Current Transformer* (DCCT) che misurano la corrente totale e ai *Fast Beam Current Transformer* (FBCT) che la misurano pacchetto per pacchetto

Spostamento baseline dovuto a effetti di temperatura, vibrazioni meccaniche, campi elettrici e magnetici

Incertezza di calibrazione

Errore commesso nel misurare la carica in ogni singolo pacchetto.

Il riempimento dei bunch non è omogeneo. La carica fuori i bunch (ghost charge) è comunque misurata dai DCCT

Scan Number	VII–VIII
Fill Number	1783
DCCT baseline offset	0.1%
DCCT scale variation	2.7%
Bunch-to-bunch fraction	1.3%
Ghost charge	0.2%
Total	3.0%

Carica per i fasci 1 (2)

$$n_{1/2}(i) = (N_{\text{tot}}^{\text{DCCT}} - N_{\text{ghost}}) \cdot \frac{S_i^{\text{FBCT}}}{\sum S_i^{\text{FBCT}}}$$

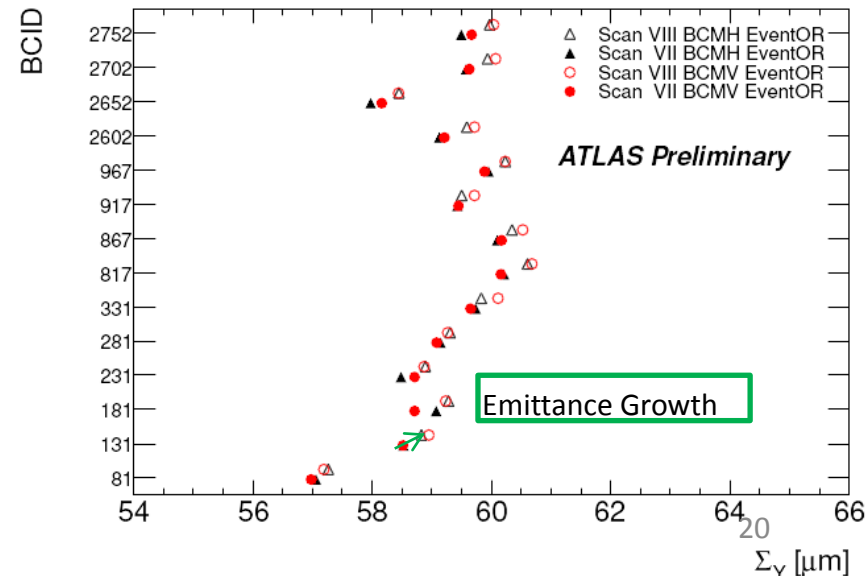
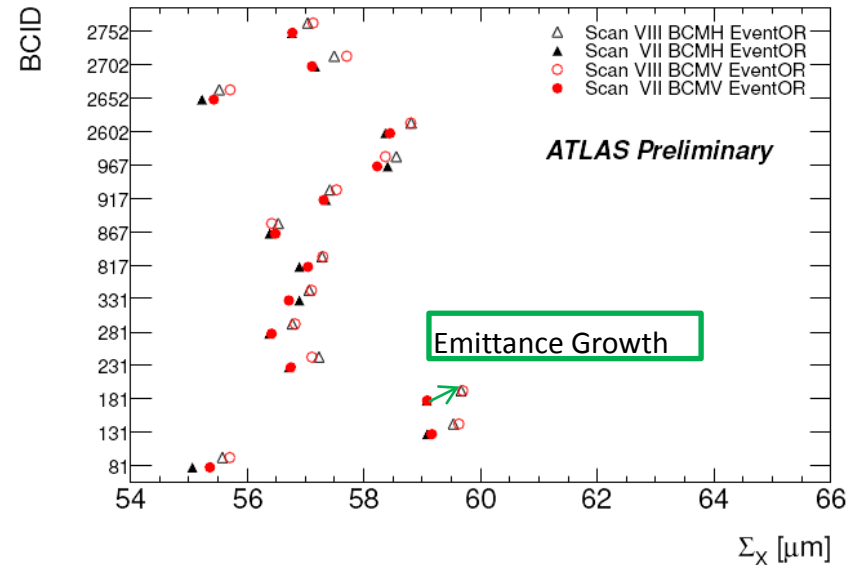
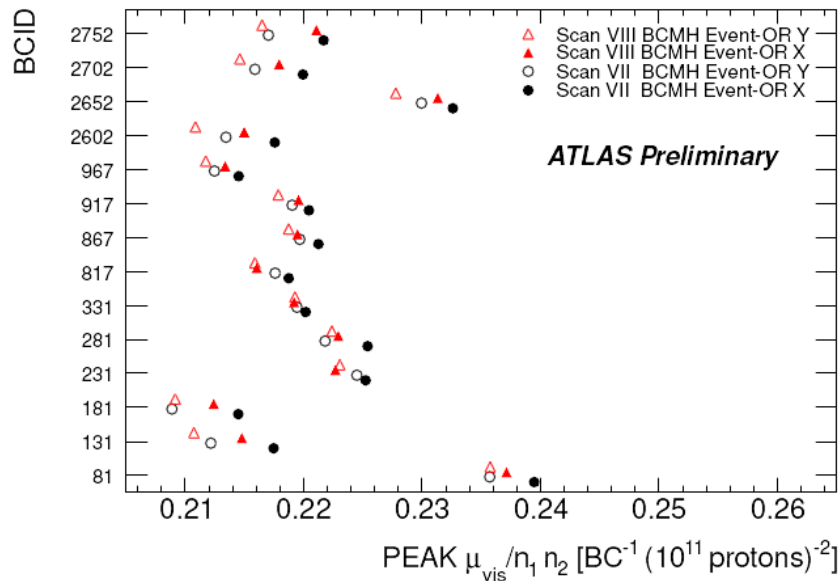
$S_i^{\text{FBCT}}$  : segnale osservato dagli FBCT

# Emittance Growth

Aumento nel tempo della sezione trasversa del fascio comporta una degradazione della luminosità tra uno scan e il successivo.

Vengono misurate indipendentemente le sezioni dei fasci  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ .

Incertezza attribuita 0,4%



# Altre sistematiche

**Calibrazione della scala delle lunghezze:** Incertezza attribuita 0,3%

Per utilizzare il Metodo Van der Meer è necessario conoscere la separazione tra i fasci ad ogni scan.

Sono stati fatti una serie di scan separando i fasci su un range di  $\pm 120 \mu m$

I fasci sono rimasti in collisione  $\rightarrow$  la posizione della regione luminosa può essere determinata con grande precisione

**Decentramento dei fasci:** Incertezza attribuita: 0,1%

Se i fasci non sono allineati nella direzione ortogonale a quella dello scan la rate osservata sarà più bassa di quella misurata se i fasci fossero allineati.

Per stimare l'incertezza: si considera lo spostamento del picco di posizione dallo zero che viene calibrato riallineando il fascio all'inizio di ogni scan.

# Altre sistematiche

**Dipendenza di  $\mu$  dalla rate:** Incertezza attribuita 0,5%

Il numero medio di interazioni/BC cambia lungo lo scan e  $\mu_{max}$  si ha quando i fasci sono centrati  $\Delta x = \Delta y = 0$ .

L'incertezza sistematica sulla rate attesa in funzione di  $\mu$  viene studiata con le simulazioni MC.

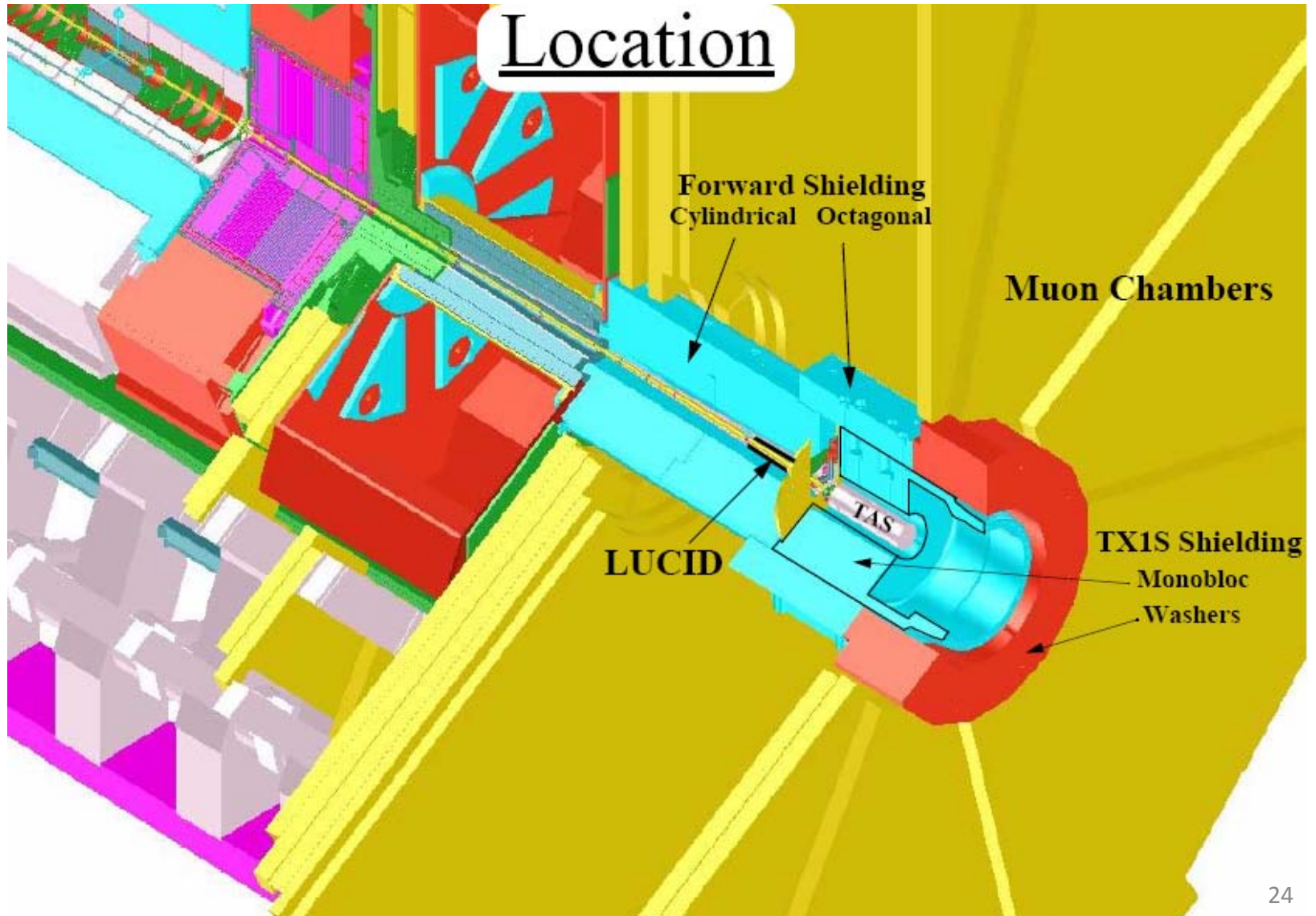
**Scelta del fit:** Incertezza attribuita 0,8%

I dati raccolti durante lo scan vengono fittati con una Gaussiana più un termine costante di fondo. I dati sono ri-fittati offline con una funzione “spline” e si confrontano le  $\sigma_{vis}$  ricavate dai due fit.

# Tabella incertezze sistematiche

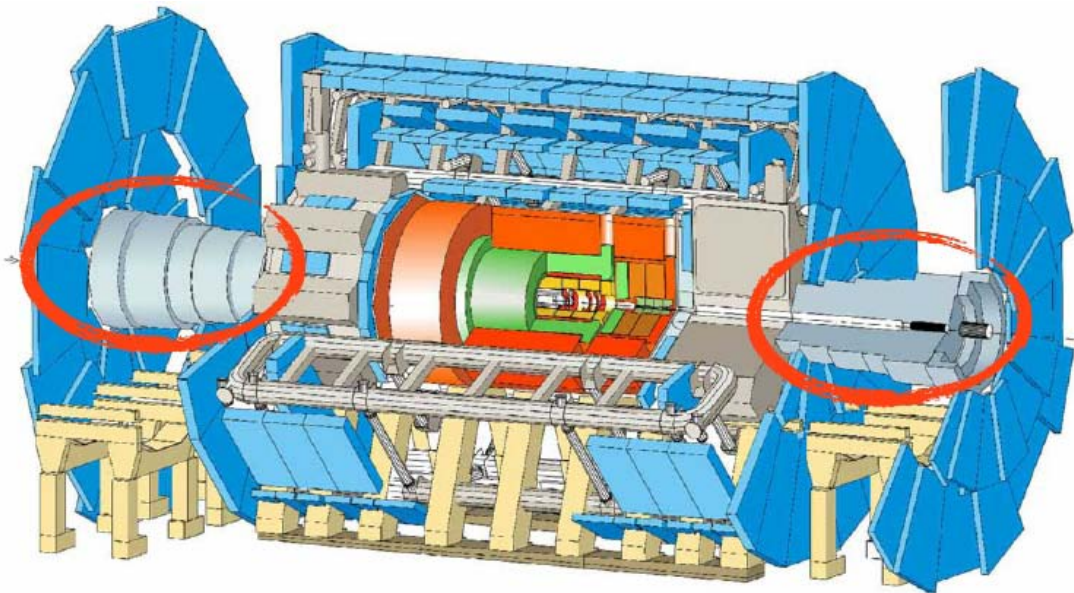
Source	Relative Uncertainty
Bunch charge product	3.0%
Beam centering	0.1%
Emittance growth and other non-reproducibility	0.4%
Beam-position jitter	0.3%
Bunch-to-bunch $\sigma_{\text{vis}}$ consistency	0.4%
Length scale calibration	0.3%
Absolute ID length scale	0.3%
Fit model	0.8%
Transverse correlations	0.5%
$\mu$ dependence	0.5%
BCM consistency	0.7%
Total	3.4%

# Luminosity Cherenkov Integrating Detector (LUCID)





# Luminosity Cherenkov Integrating Detector (LUCID)



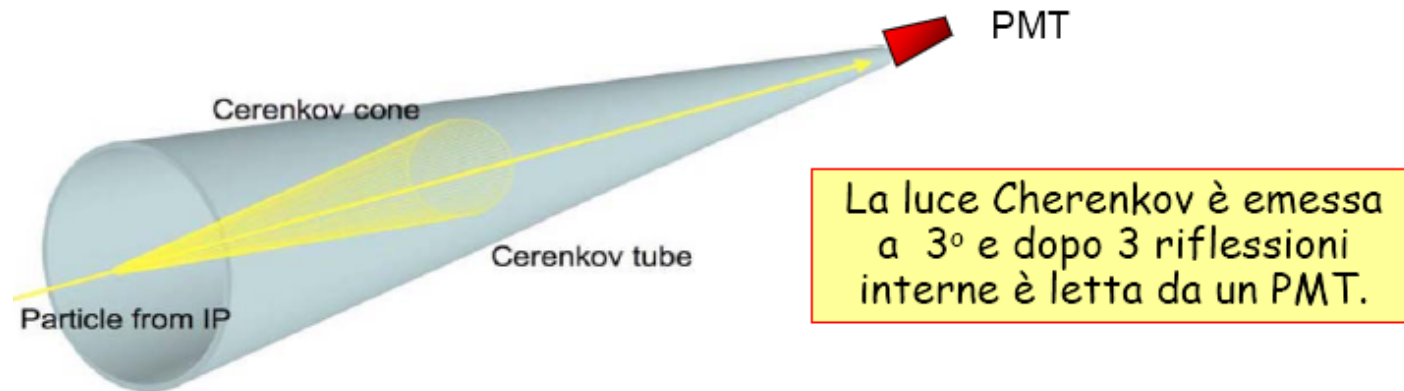
2 rivelatori simmetrici, a 17 m dal punto di interazione.

Coprono la regione con  $5.6 < |\eta| < 6.0$

16 tubi di alluminio riflettenti, riempiti di  $C_4F_{10}$  gas alla pressione di 1.1 bar che circondano la beampipe

Funzionamento tra  $10^{27} < L < 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

# Luminosity Cherenkov Integrating Detector (LUCID)



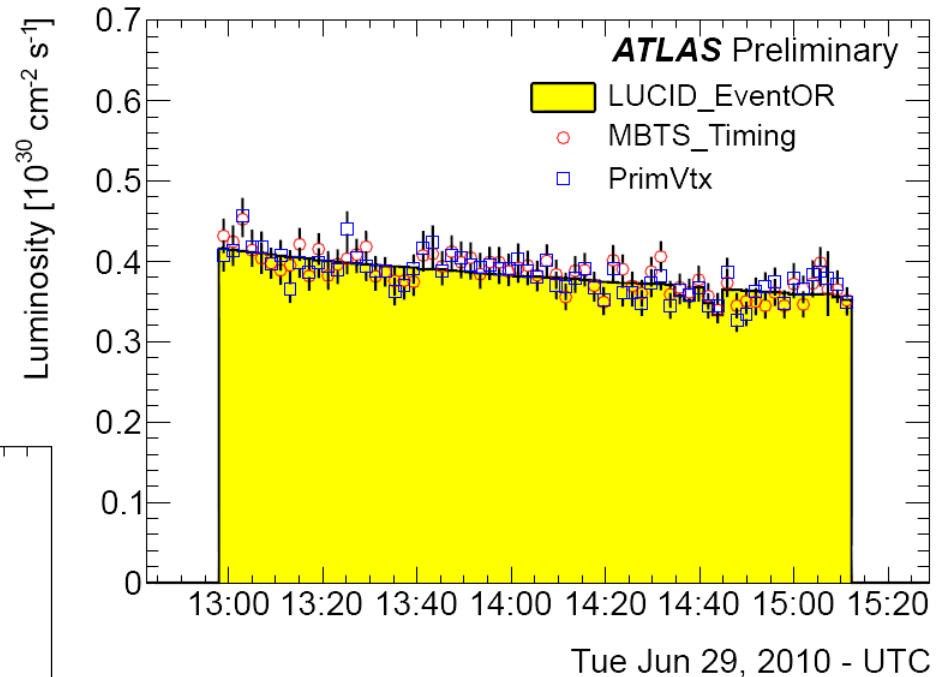
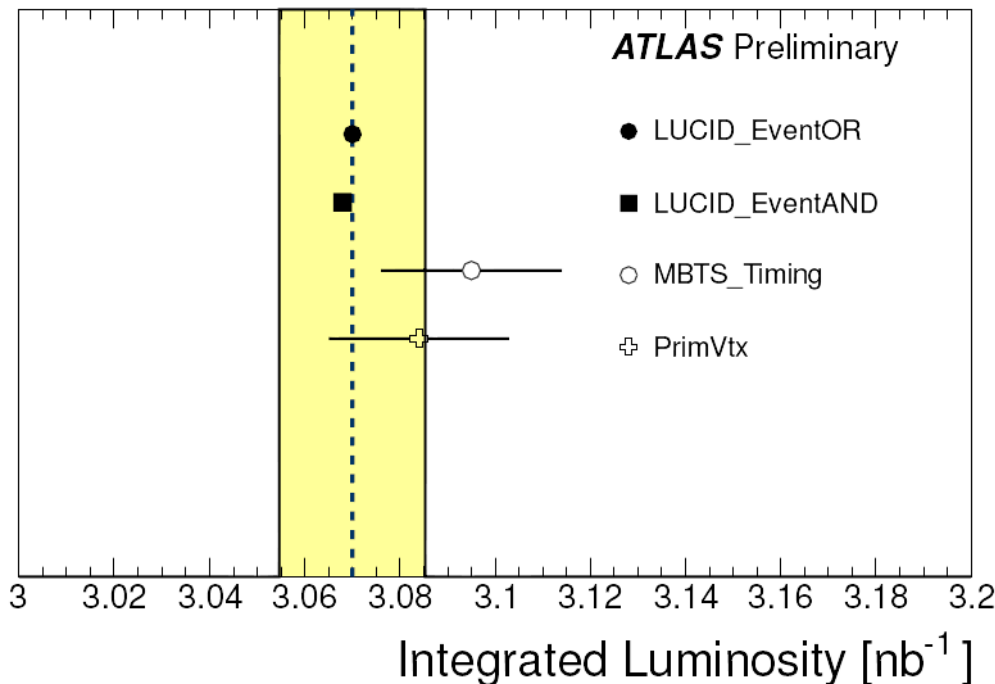
**Idea:** contare il numero di interazioni attraverso il numero di particelle cariche prodotte in ogni collisione entro l'accettazione di LUCID.

La luce Cherenkov creata nel gas produce circa 60-70 fotoelettroni. LUCID ha una finestra di quarzo, le particelle che la colpiscono generano circa 40 fotoelettroni che si aggiungono al segnale.

Dopo l'amplificazione il segnale passa in un discriminatore (soglia corrispondente a 15 fotoelettroni). L'uscita dei discriminatori viene inviata all'elettronica LUMAT programmabile con diversi algoritmi.

# Luminosity Cherenkov Integrating Detector (LUCID)

Confronto tra luminosità misurate con diversi algoritmi.  
L'errore è solo statistico.



Confronto tra luminosità integrata misurate con diversi algoritmi.  
L'errore è solo statistico.

Valore di L  $6,6 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Molto vicino al quello da raggiungere  $\sim 10^{34}$

# Bibliografia

- Luminosity Determination in pp Collision at  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$  Using the ATLAS Detector at LHC, arXiv: 1101.2185.v1 [hep-ex]
- ATLAS-CONF-2011-116, 19 August 2011

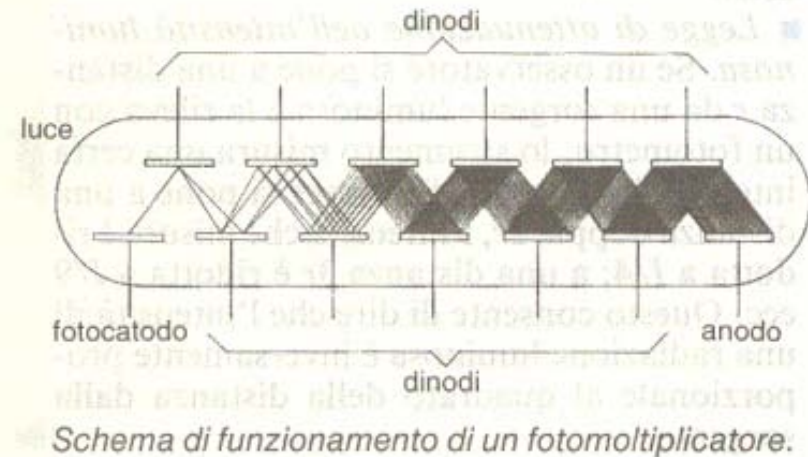
Backup

# Fotomoltiplicatore

Processi alla base: effetto fotoelettrico;  
emissione secondaria.

Formato da un tubo di vetro in cui è fatto il vuoto e al cui interno ci sta un anodo ed elettrodi (dinodi).

- Fotone entra dal fotocatodo, formato da materiale che favorisce effetto fotoelettrico.



- Elettroni emessi guidati da elettrodo verso **stadio di moltiplicazione**, elettrodi a cui sono applicati potenziali via via crescenti.

l' elettrone emesso per effetto fotoelettrico viene accelerato a causa del campo elettrico, acquista energia cinetica. Urta elettrodo successivo ed emette elettroni con energia minore. Questi fanno la stessa cosa. Si innesca n processo a catena.

- Alla fine degli elettrodi gli elettroni urtano un anodo che invia un segnale elettrico che indica il rivelamento del fotone

# Misura relativa della luminosità

Una misura della luminosità relativa si ottiene a partire da  $\mu^{vis}$ , che non viene misurato direttamente. Si misura una grandezza che è funzione di  $\mu^{vis}$ , cioè la rate di eventi visti da un rivelatore. Tecniche di conteggio :

- Event counting : si determina la frazione di pacchetti durante i quali un determinato detector registra un **evento**



Usato da ATLAS



Almeno una interazione per attraversamento viene rivelata da almeno un detector

- Hit Counting : si conta il numero di eventi accettati per BC in un certo detector

- Particle Counting : si determina il numero di particelle per BC da quantità osservabili che riflettono il flusso di particelle (ad esempio la corrente totale estratta dal calorimetro ad argon liquido)