

L'allineamento del *Tracker* di CMS con raggi cosmici

Marco Musich

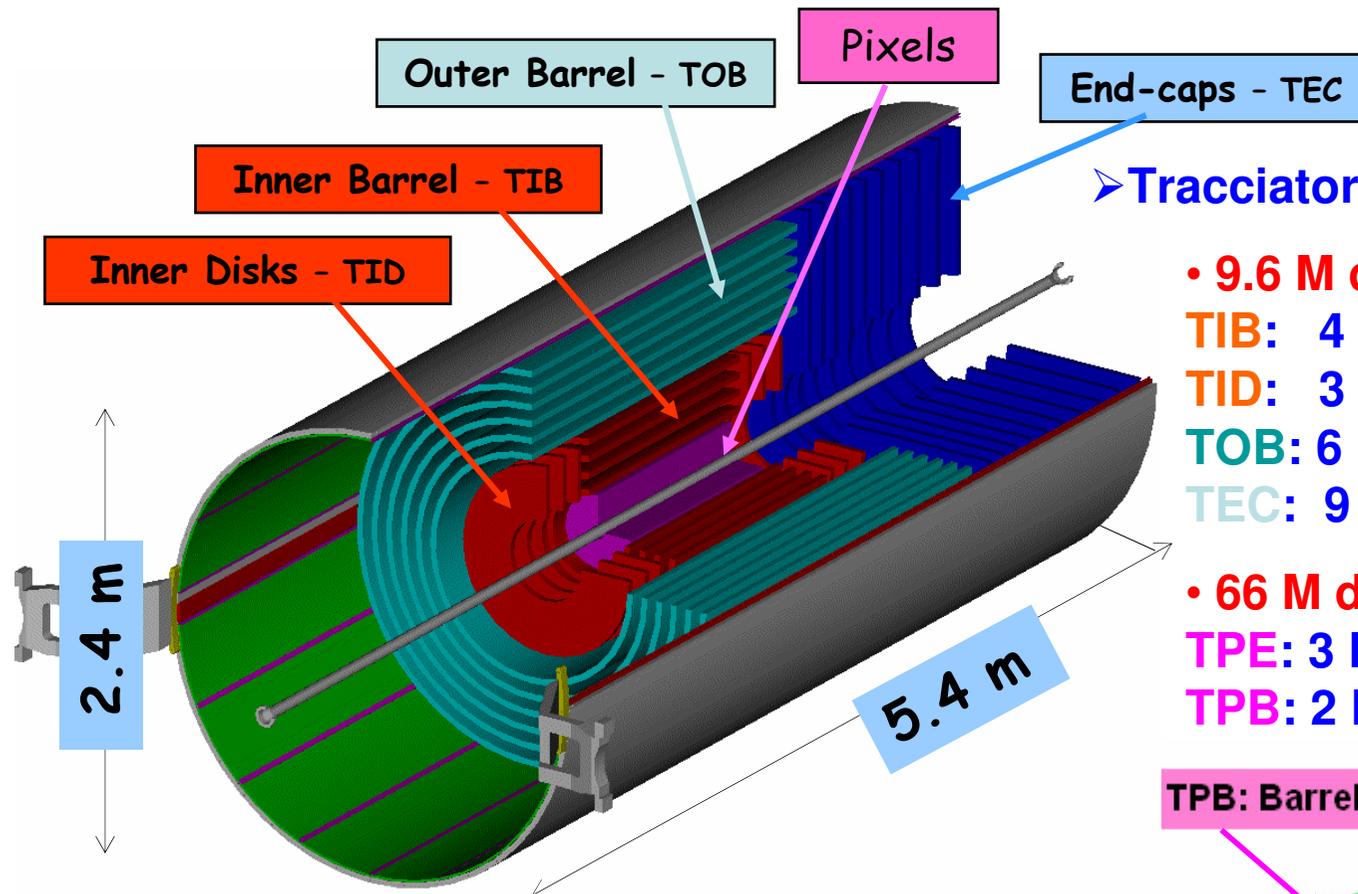
per

la collaborazione CMS Tracker

Outline

- **Il Silicon Tracker di CMS**
- **Allineamento in CMS**
 - Formalismo
 - Metodi
 - L'allineamento basato su tracce
 - Algoritmi di allineamento
- **Allineamento alla *Tracker Integration Facility* (TIF) :**
 - Setup sperimentale
 - Selezione di eventi per l'allineamento
 - Risultati – χ^2 e residui
 - Risultati – stabilità
 - Conclusioni
- **Allineamento ai *Global Runs***

Il Tracker di CMS



➤ Tracciatore totalmente in silicio:

• 9.6 M di strip (80 – 180 μm)

TIB: 4 Layers (2 stereo)

TID: 3 Layers (2 stereo)

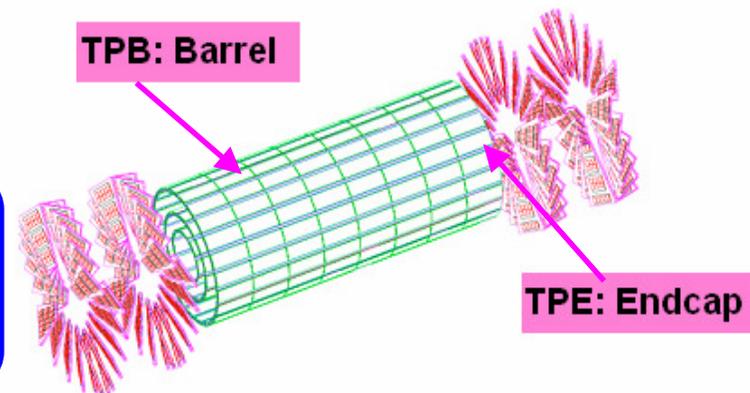
TOB: 6 Layers (2 stereo)

TEC: 9 Layers (3 stereo)

• 66 M di pixel (100x150 μm^2)

TPE: 3 Layers

TPB: 2 Layers



Per raggiungere la risoluzione di disegno è necessario determinare le posizioni di $O(15k)$ sensori con accuratezza $\sim 10 \mu\text{m}$

Formalismo dell'allineamento

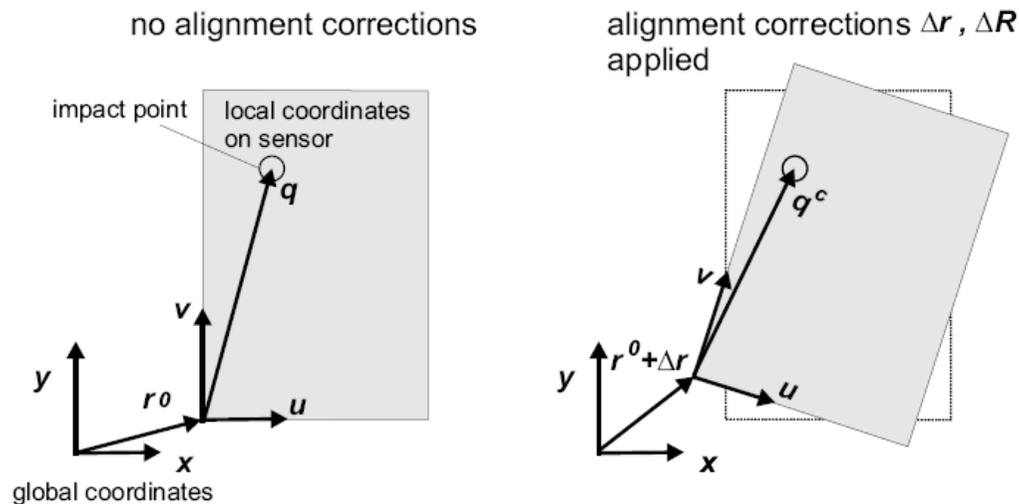
- La posizione di un hit vale \mathbf{q} nel riferimento locale del modulo e \mathbf{r} nel riferimento globale collegati dalla trasformazione (rototraslazione, r_0 posizione modulo, R^T orientamento):

$$\mathbf{r} = R^T \mathbf{q} + r_0$$

- La procedura di allineamento determina la correzione alla trasformazione iniziale attraverso una rototraslazione aggiuntiva:

$$\mathbf{r} = R^T \Delta R (\mathbf{q} + \Delta \mathbf{q}) + r_0$$

- I parametri di allineamento per le traslazioni sono le componenti di $\Delta \mathbf{q} = (\Delta u, \Delta v, \Delta w)$ e per le rotazioni gli angoli α, β, γ della matrice ΔR .

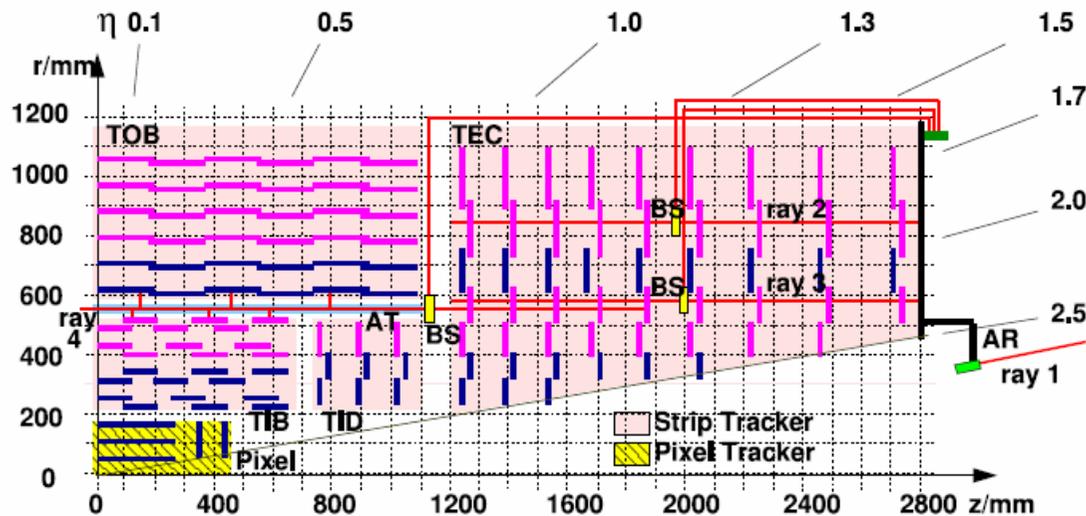
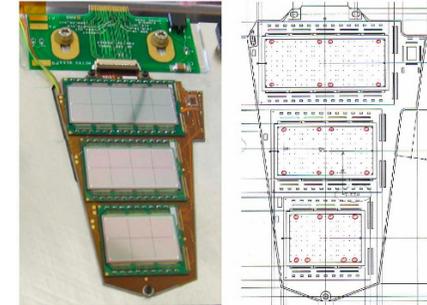


Scopo finale allineamento:

determinare per ognuno dei 13252 moduli i sei parametri ($u, v, w, \alpha, \beta, \gamma$) tre traslazioni + tre rotazioni che ne definiscono la posizione

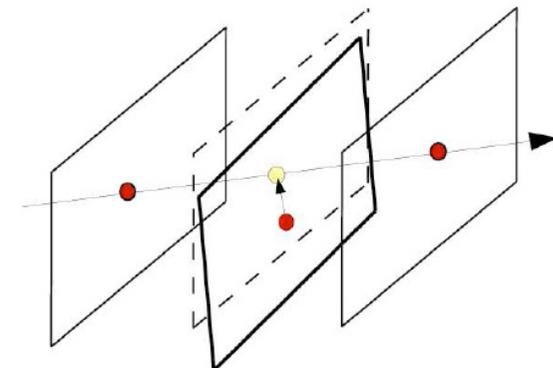
Metodi di allineamento

Survey del detector (spostamenti misurati rispetto alla geometria di disegno): attraverso CMM (coordinate measurement machine), touch probe, fotogrammetria.



LAS: Laser Alignment System
obbiettivo: allineare il detector con risoluzione pari a $\sim 100\mu\text{m}$
Utilizza raggi laser infrarossi per allineare tra di loro grandi strutture (Dischi della TEC, TEC vs TIB vs TOB, etc.)

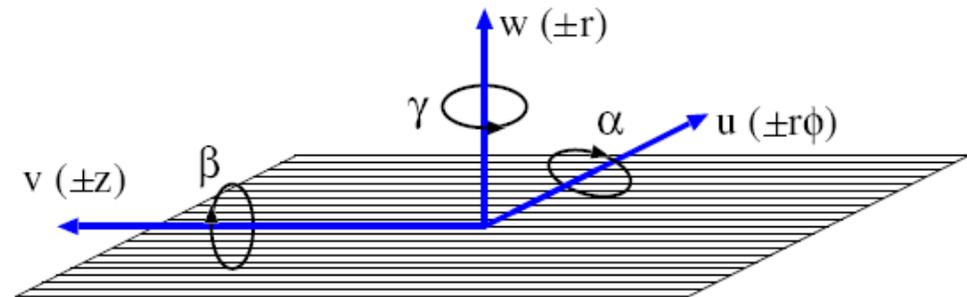
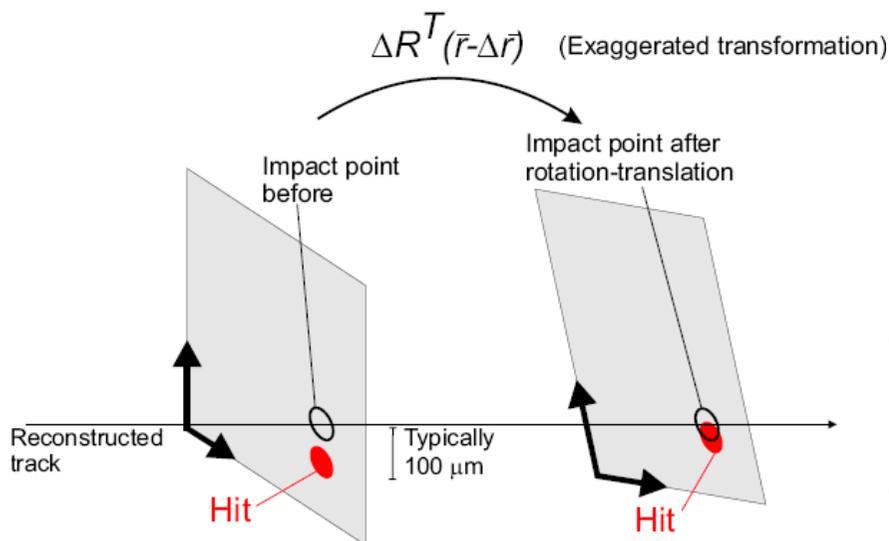
Allineamento basato su tracce: precisione $\sim O(10\mu\text{m})$
basato sulla riduzione del χ^2 associato al **fit di traccia**,
riducendo l'incertezza e il bias sui parametri delle tracce.
Si effettua per via algoritmica minimizzando il χ^2 .



Allineamento basato sulle tracce

- Le posizioni misurate delle hit $\mathbf{u}_k^{\text{hit}}$ e le posizioni estrapolate dalla traiettoria $\mathbf{u}_k^{\text{fit}}$ sono **sistematicamente spostate** se la posizione del modulo non è conosciuta correttamente.
- Il vettore differenza tra la hit e la traccia estrapolata è detto **Residuo** \mathbf{r}_k
- L'obiettivo dell'allineamento è minimizzare i residui:

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{u}_k^{\text{hit}} - \mathbf{a} \cdot \mathbf{d}_k = \mathbf{u}_k^{\text{hit}} - \mathbf{u}_k^{\text{fit}}$$



$\mathbf{u}_k^{\text{hit}}$ = coordinata misurata
 $\mathbf{a} = (\Delta u, \Delta v, \Delta w, \alpha, \beta, \gamma) = (\Delta R, \Delta r)$ correzioni
 \mathbf{d}_k = coordinate locali

Allineamento basato sulle tracce

- Minimizzare i residui \rightarrow minimizzare χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_i \mathbf{r}_i^T(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i) \mathbf{V}_i^{-1} \mathbf{r}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q}_i)$$

$\mathbf{r}_i(\mathbf{p}, \mathbf{q})$ = residui:

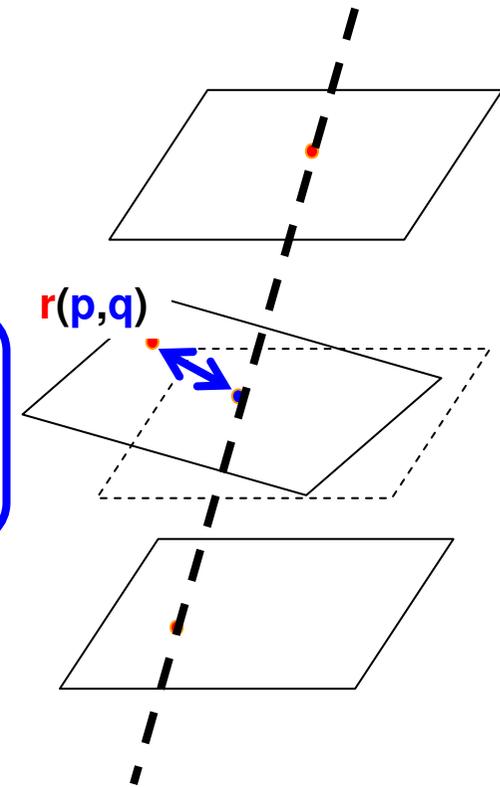
\mathbf{p} = parametri globali
(posizione e orientamento)

\mathbf{q}_i = parametrizzazione di traccia

\mathbf{V}_{ij} = matrice di covarianza
costruita a partire dal fit
delle tracce

$$\Delta \mathbf{p} = (\Delta u, \Delta v, \Delta w, \alpha, \beta, \gamma) = \mathbf{a}$$

Parametri determinati dall'allineamento



L'allineamento di tutto il tracker

$O(15k \cdot 6 \text{ dof}) \sim 100k$ parametri

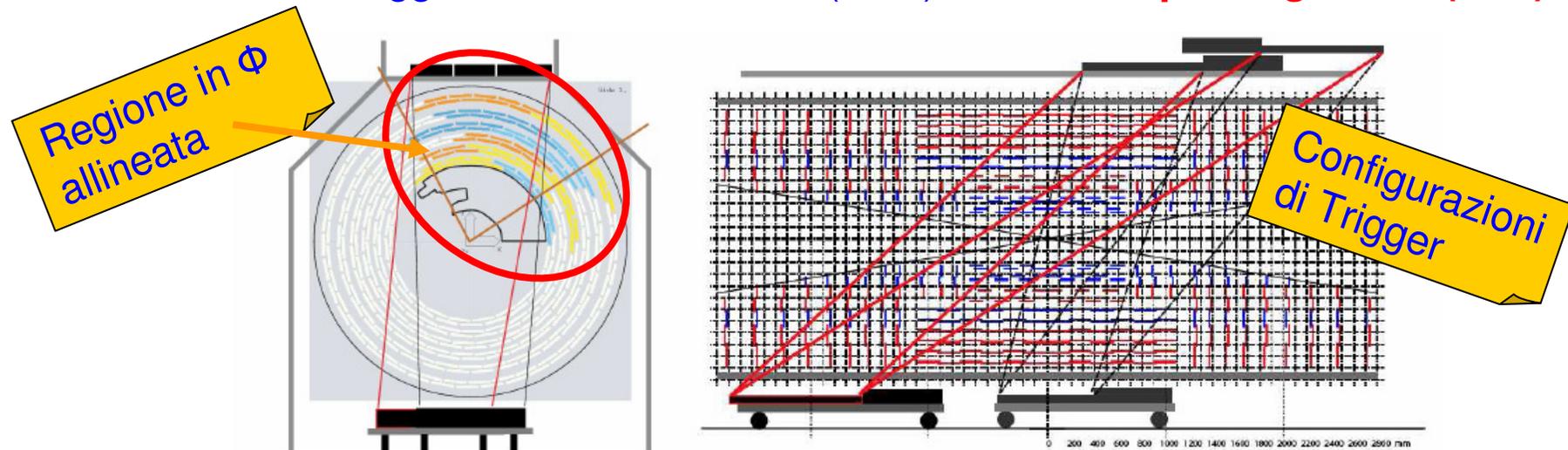
Necessità di algoritmi **rapidi ed efficienti**

ALGORITMI DI ALLINEAMENTO in CMS:

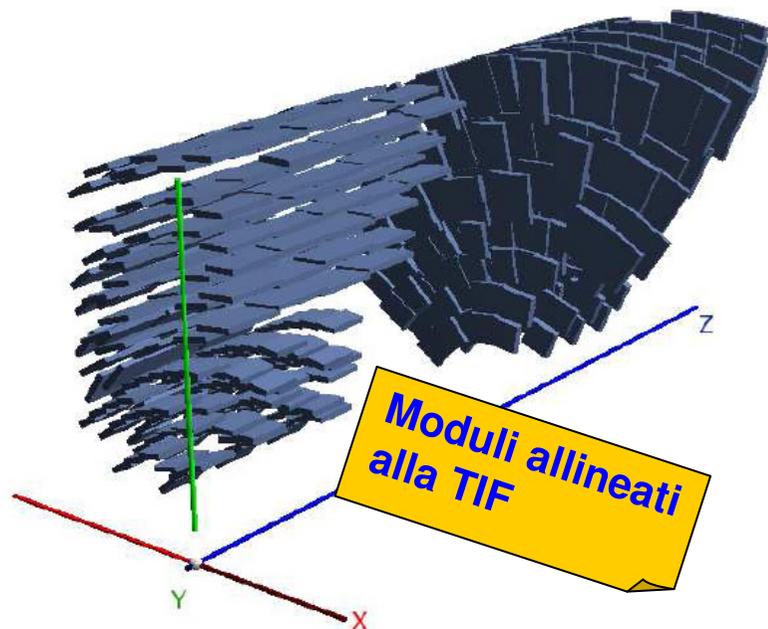
- HIP (Hit and Impact Point)
- MILLEPEDE II
- Kalman Filter

Allineamento alla Integration Facility (TIF)

- Primo tentativo di allineare il Tracker di CMS alla *Tracker Integration Facility* (TIF) con muoni cosmici (15% di moduli accesi)
- Utilizzo delle informazioni dai **survey ottici**, allineamento **laser** e allineamento **basato su tracce**.
- Testata la stabilità del Tracker a stress termici e a differenti configurazioni di trigger
- Quattro **scintillatori plastici** (due superiori, due inferiori) per triggerare eventi di cosmici
Assorbitori di piombo assorbono muoni con **$p < 200 \text{ MeV}/c$**
- Presi circa **5 M** di trigger con TIB, TOB, TID (TEC) **senza campo magnetico ($B=0$)**.



Selezione del campione



5 milioni di trigger in totale, presi:

- In un periodo di 4 mesi
- con **differenti condizioni ambientali** (da $T = [+15, -15]$ °C) e **meccaniche** (TEC a $z < 0$ inserita durante DAQ)
- Divisi in run a seconda della configurazione sperimentale
- 1 campione di **~1M** di trigger usato per l'allineamento

- **Selezione degli eventi / hits**

- Una sola traccia nell'accettanza geometrica ($-1.5 < \eta_{tk} < 0.6$ && $-1.8 < \varphi_{tk} < -1.2$ rad)
- χ^2_{tk} della traccia < 4
- almeno **5 hits** di cui **2 da moduli double-sided**
- hit provenienti da cluster con carica totale non inferiore a **50 ADC**
- hit isolati (no altre hit nel raggio di **8mm**) e con residuo $e = r^T V^{-1} r < 5$
- **Efficienza di Selezione ~ 8.3 %**

Parametri allineati

- L'allineamento track-based è mirato a minimizzare la funzione globale χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_j^{\text{tracks}} \mathbf{r}_j^T(\mathbf{p}, \mathbf{q}_j) \mathbf{V}_j^{-1} \mathbf{r}_j(\mathbf{p}, \mathbf{q}_j)$$

\mathbf{r} = residui delle hit

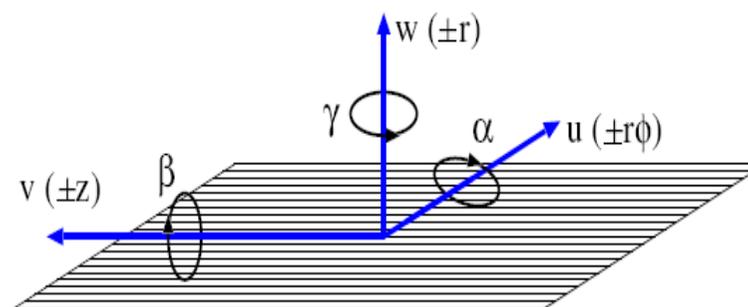
\mathbf{p} = parametri di allineamento

\mathbf{q} = parametri di traccia

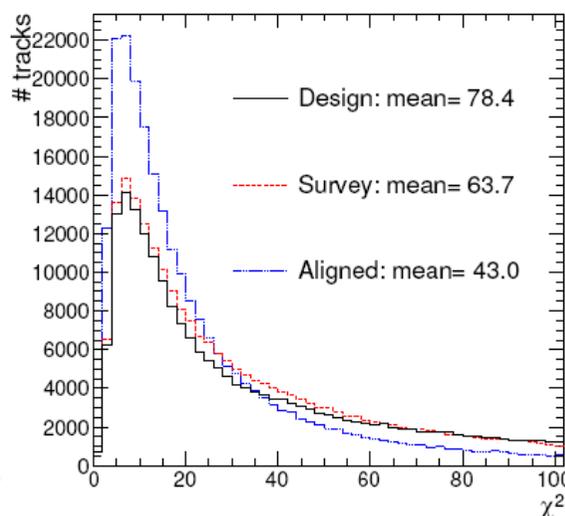
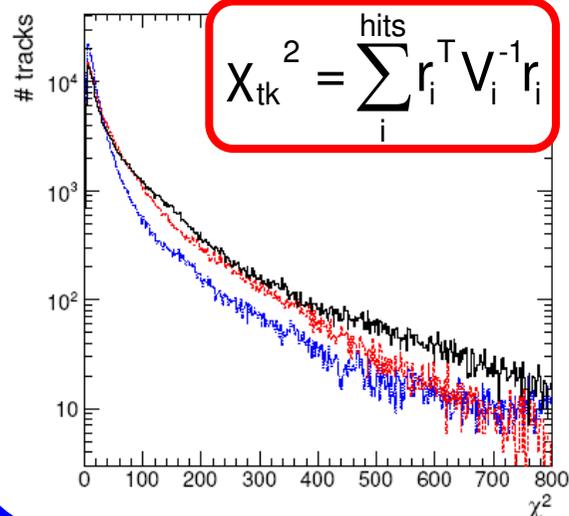
- I parametri \mathbf{p} differenti per ciascun subdetector:
 - TIB/TOB: **alta statistica** → allineati al livello di **singolo modulo**
 - $\mathbf{p} = \{u, w, \gamma\}$ ($\{u, v, w, \gamma\}$ per moduli double-sided)
 - TEC: **bassa statistica** → allineata al livello di **dischi**
 - $\mathbf{p} = \{\gamma\}$
 - TID: **statistica molto bassa** → non allineato

- **Altra sfide alla TIF:**

- tracce parallele → deformazioni χ^2 -invarianti
- **Nessun campo magnetico ($B=0$)** per misurare il p_T delle tracce → incertezze sulla stima dell'effetto del multiple scattering

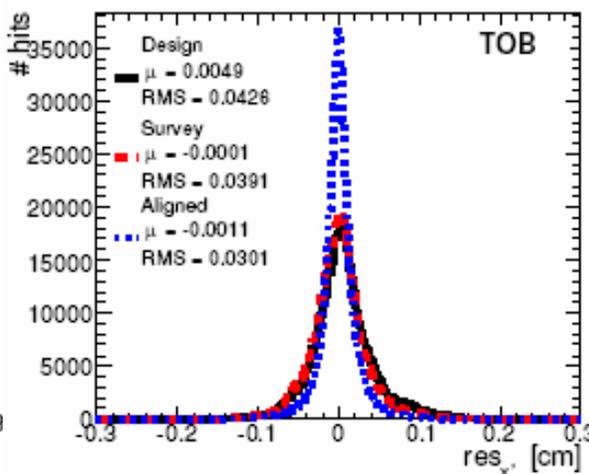
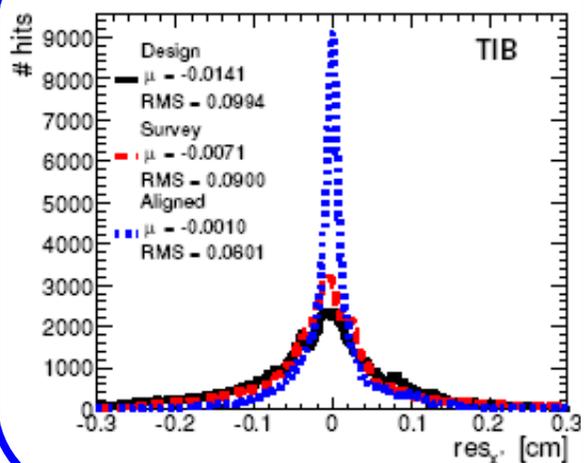


Risultati alla Integration Facility (TIF)



Distribuzione del χ^2 delle tracce per 3 descrizioni della geometria:

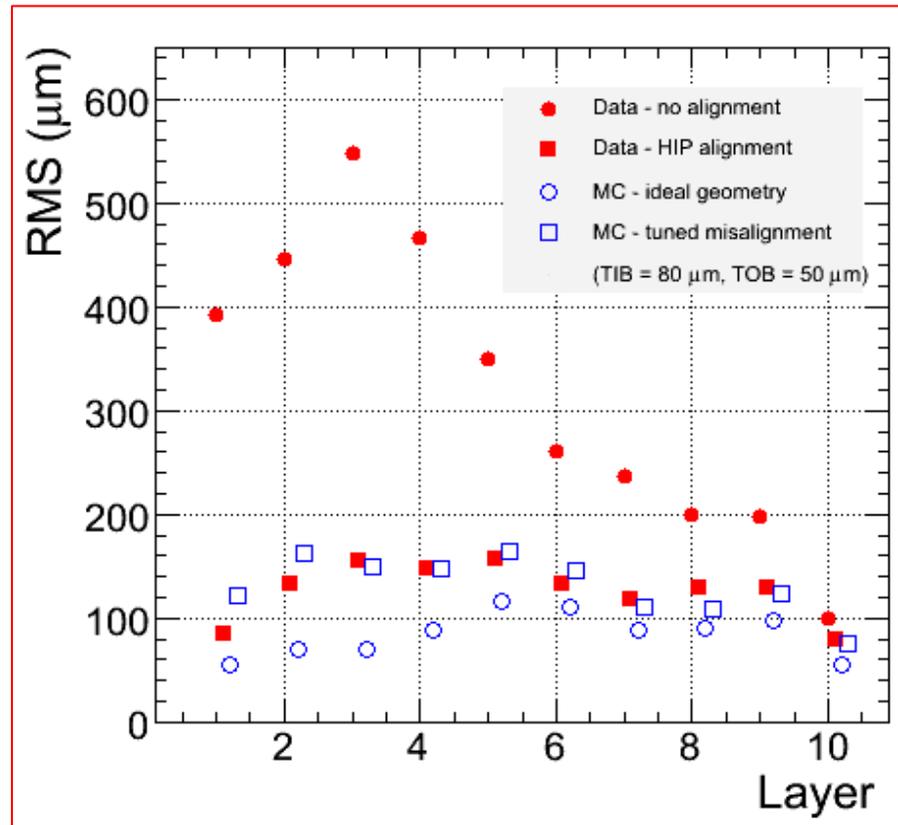
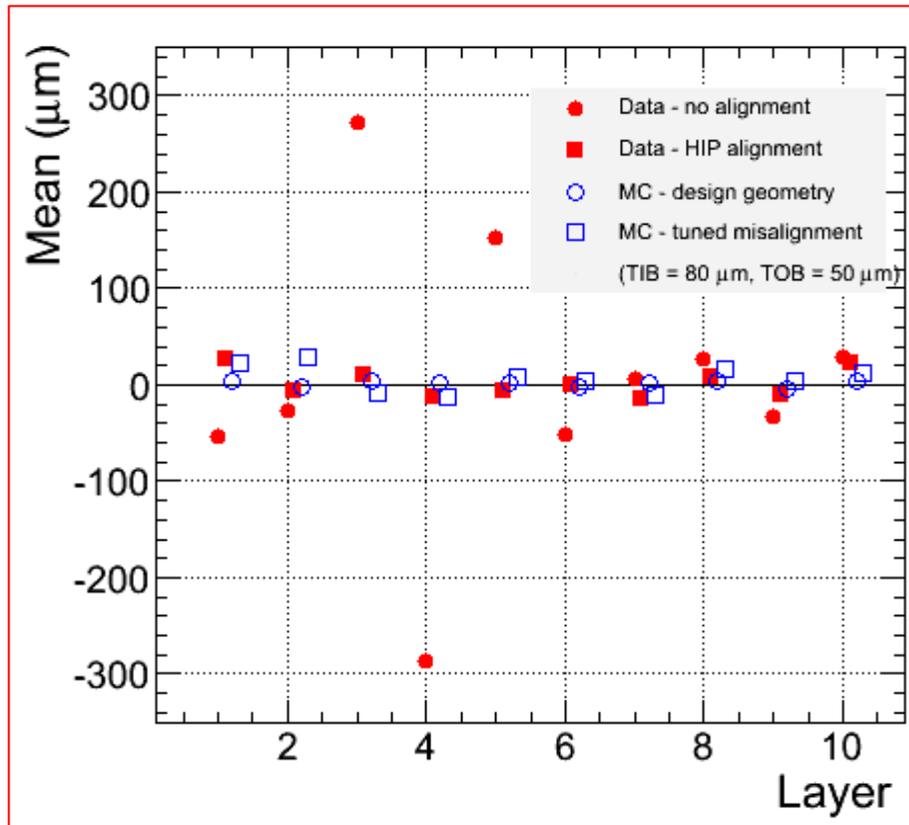
- **Disegno**
- **Survey**
- **Allineata**



Distribuzione dei residui delle tracce nel barrel (TIB/TOB) per le tre geometrie sopra considerate:

$$r_k = u_k^{hit} - a \cdot d_k = u_k^{hit} - u_k^{fit}$$

Risultati alla Integration Facility (TIF)

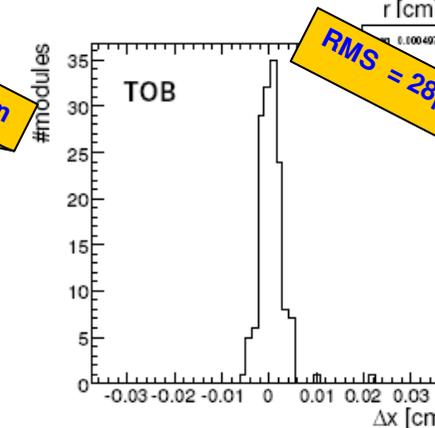
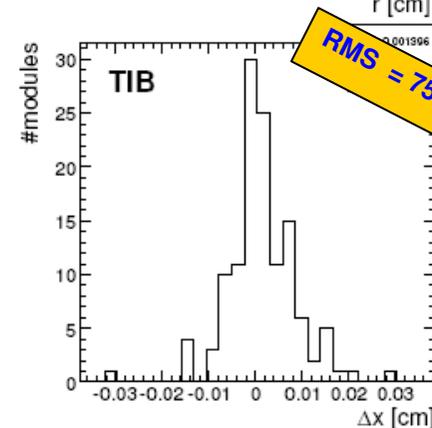
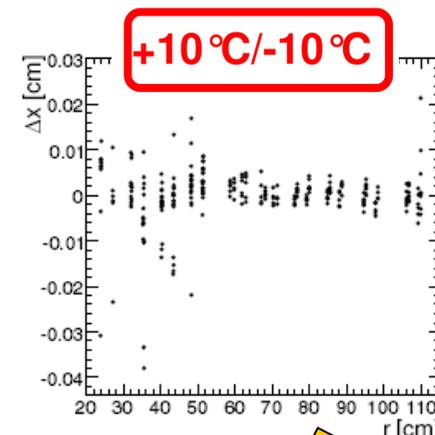
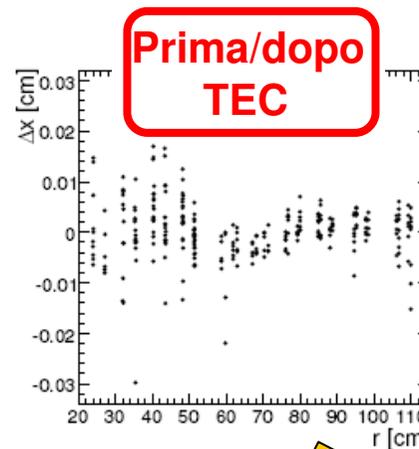
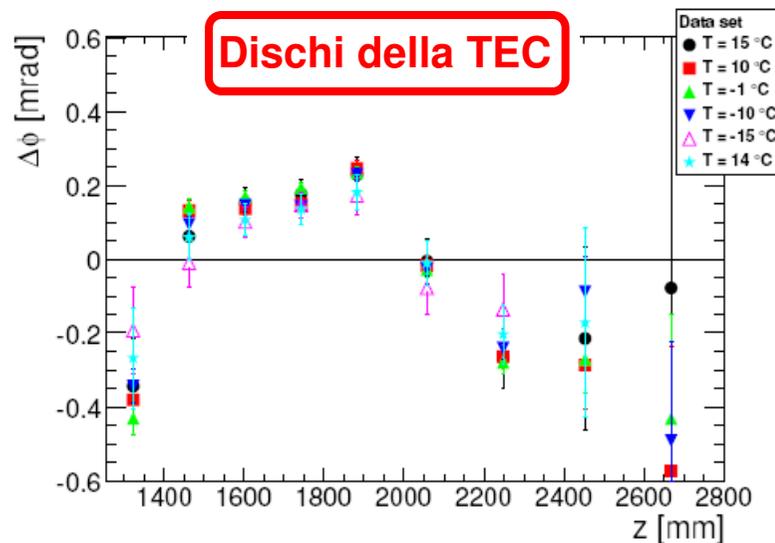


Paragone di **medie** e **RMS** dei residui tra dati e Monte Carlo per i 10 Layer del Barrel

Il disallineamento che è necessario introdurre sul Monte Carlo per riprodurre i risultati sui dati indica una risoluzione effettiva di $\sim 80 \mu\text{m}$ nel TIB e $\sim 50 \mu\text{m}$ nel TOB

Stabilità

- L'allineamento alla TIF è stato effettuato su diversi campioni di dati per indagare la sensibilità a:
 - Operazioni meccaniche (paragone prima/dopo inserimento TEC $z < 0$)
 - Cambiamenti di temperatura (paragone $+10^\circ\text{C}$ / -10°C)
- Indizi di una torsione dopo l'inserimento della TEC (distribuzione Δx ($r\Delta\phi$) vs. z)
- **Nessuna sensibilità ai cambiamenti di temperatura**



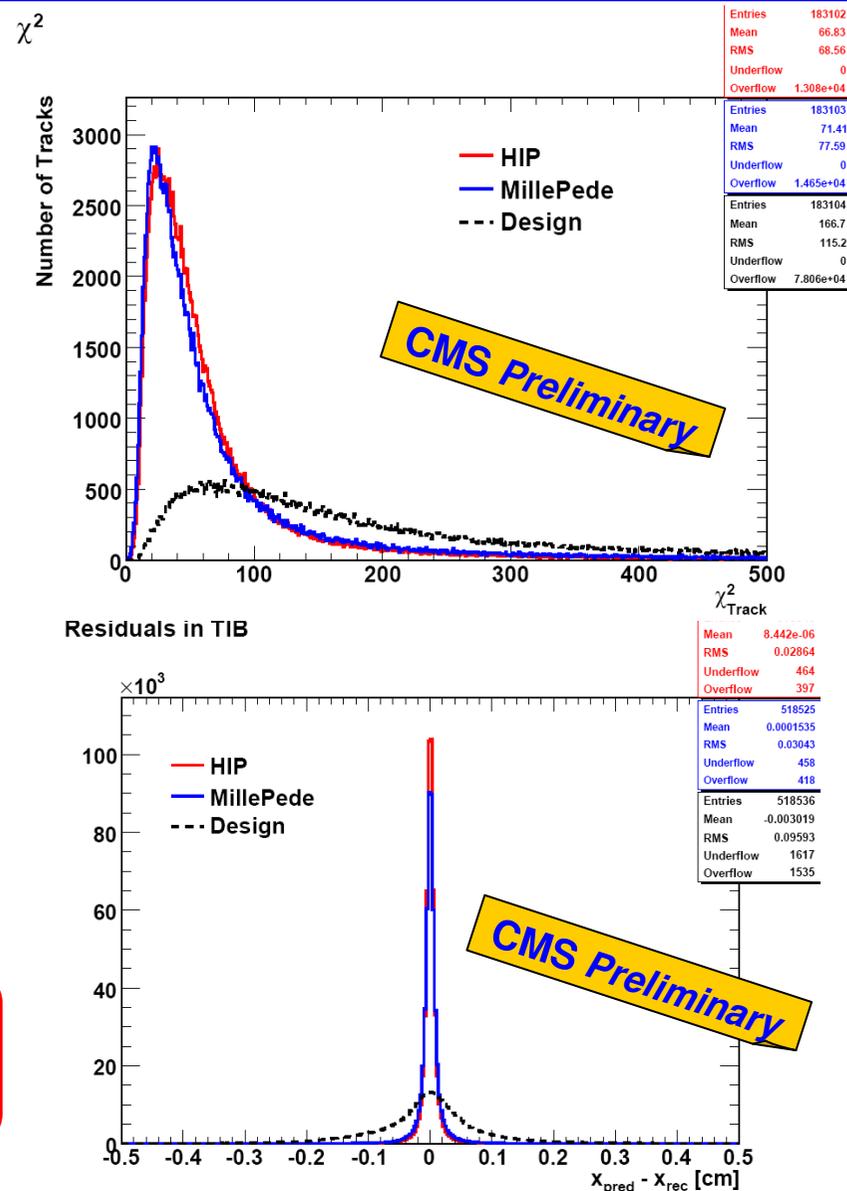
Conclusioni allineamento alla TIF

- Usando dati da **raggi cosmici** alla TIF, è stato effettuato il primo allineamento su larga scala del Tracker di CMS:
 - L'applicazione delle misure dei **survey** ottici **migliora le performance** della tracciatura
 - Gli algoritmi di allineamento basato su tracce sono stati testati con successo su **dati veri** e sul **tracciatore reale**:
 - **Miglioramenti** dei residui nel barrel rispetto alla geometria di disegno e al survey
 - Una grossolana **stima della risoluzione** a partire da studi Monte Carlo è **~ 50-80 μm** , dominata da una stima approssimata del multiple scattering
 - Non sono stati riscontrati significativi cambiamenti tra le diverse condizioni di funzionamento (trigger, temperatura)
 - Il sistema di allineamento laser **LAS** è funzionato con successo → consistenza con l'allineamento basato su tracce

Allineamento ai Global Runs

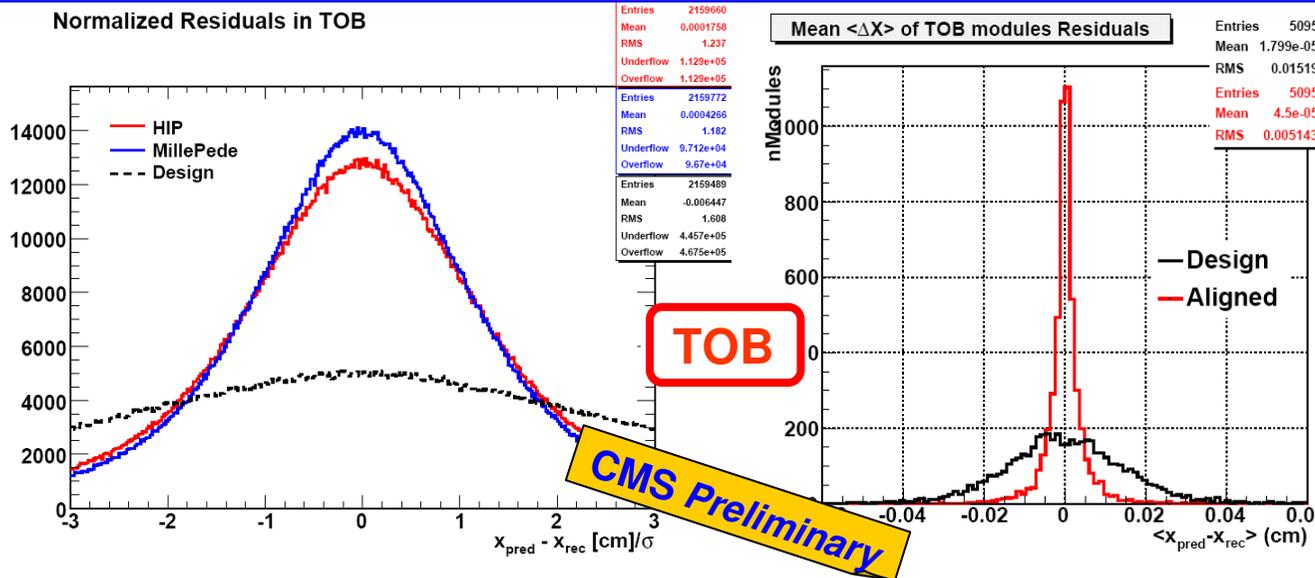
- **Primo tentativo di allineare l'intero Silicon Tracker di CMS:**
 - Metà luglio / metà agosto 2008
 - Allineamento a livello di modulo solo per le strip
 - No campo magnetico ($B=0T$)
- Diviso in due fasi:
 - **Cruzet-3:** (285k eventi), no TEC $z<0$, no pixels
 - **Cruzet-4:** (345k eventi), tutto il Tracker acceso
- **Miglioramento del χ^2 e dei residui**
- Costanti di allineamento utilizzate per il *reprocessing*.

L'allineamento del Tracker di CMS sta progredendo ed è pronto per le collisioni

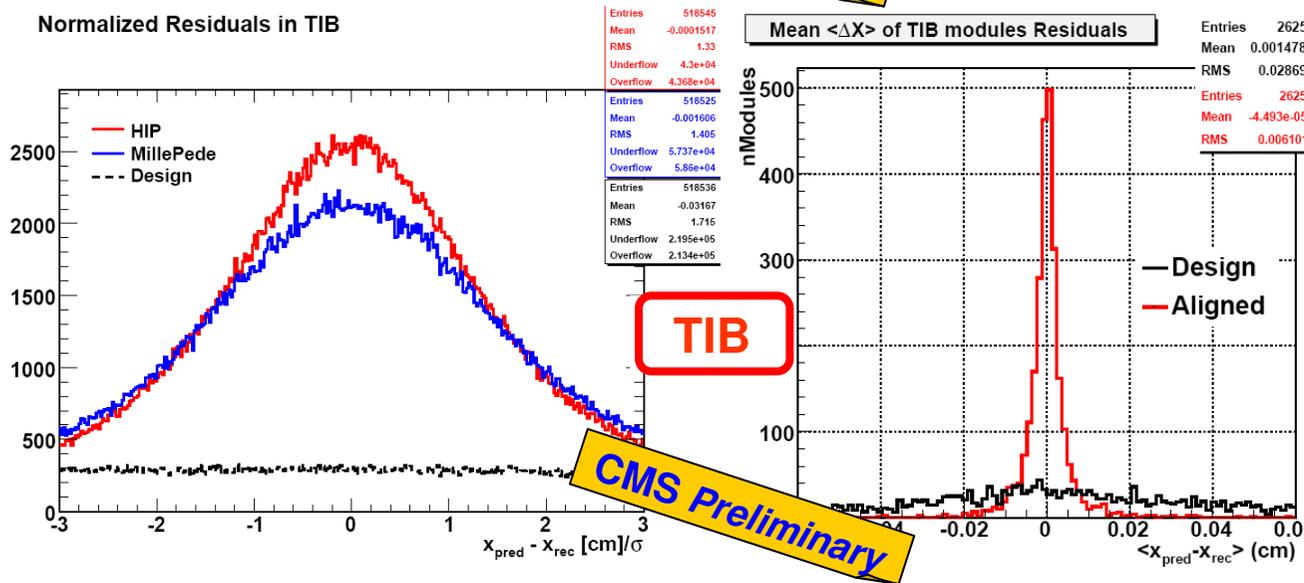


Allineamento ai Global Runs (risultati)

Normalized Residuals in TOB



Normalized Residuals in TIB



Residui normalizzati:

$$\frac{r}{\sigma} = \frac{X_{\text{pred}} - X_{\text{rec}}}{\sigma}$$

e valore medio dei residui:

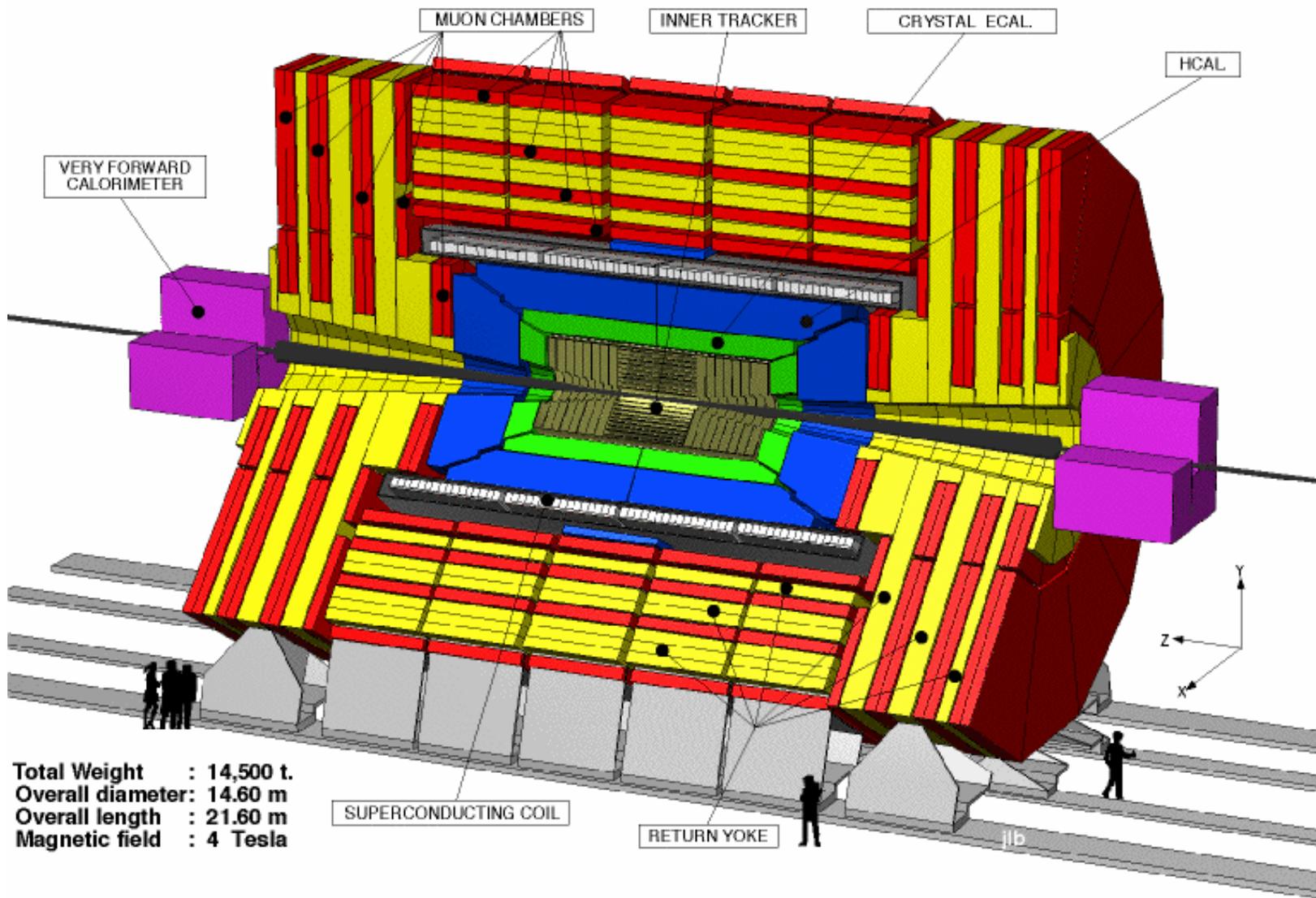
$$\langle \Delta x \rangle = \langle X_{\text{pred}} - X_{\text{rec}} \rangle$$

per il barrel.

Sono comparate le geometrie ri-allineate dai principali algoritmi di allineamento e la geometria di disegno

BACKUP SLIDES

L'esperimento CMS



Necessità dell'allineamento

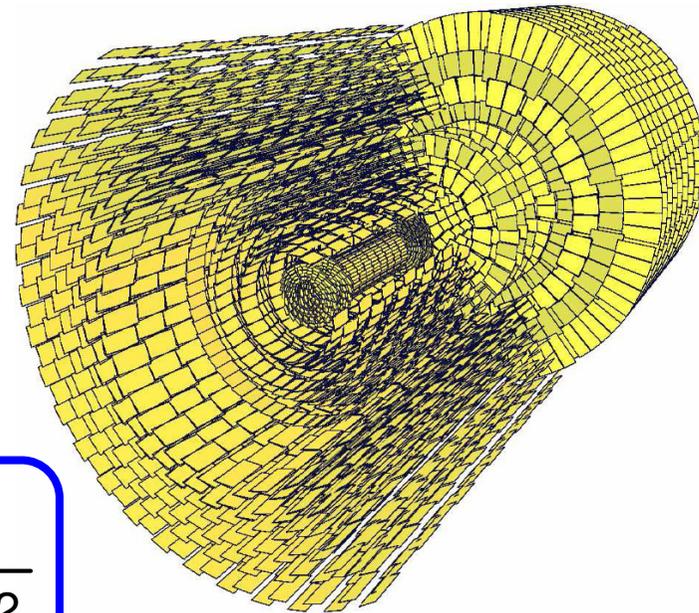
- Il tracker di CMS è disegnato per ottimizzare la risoluzione nella misura dell'impulso delle particelle:
 - Essa dipende da due fattori:

$$\frac{\delta p}{p} = C_1 p + C_2$$

C_2 dipende dallo scattering coulombiano multiplo (MCS)

$$C_1 = \frac{\sigma_{\text{pos}}}{\sqrt{n} \cdot B \cdot L^2}$$

n = numero di hit
 B = intensità campo magnetico
 L = lunghezza della traccia
 σ_{pos} = incertezza sulla posizione hit



Sistematico da minimizzare mediante **ALLINEAMENTO**

$$\sigma_{\text{pos}} = \sqrt{\sigma_{\text{int}}^2 + \sigma_{\text{sist}}^2}$$

Algoritmi di allineamento

- **HIP** (Hits and Impact Points):
 - **Metodo locale**: correlazioni fra oggetti vicini **non sono considerate**
 - Soluzione analitica approssimata dell'equazione del χ^2 per Δp
→ la convergenza raggiunta per **iterazione**
- **Kalman**:
 - basato sull'update della traiettoria del Kalman-filter
 - L'effetto di Δp e della matrice di covarianza V_p considerato nell'update della traiettoria, aggiunto inoltre un termine stocastico per il MCS
- **MillePede-II**:
 - **Soluzione globale** dell'equazione del χ^2 per p and q : tutte le correlazioni sono considerate
 - **Problema linearizzato**, risolto con il metodo dei **minimi quadrati**
→ Inversione di una grossa matrice mediante **metodi numerici**

