

Tecniche di Analisi Numerica e Simulazione

Progetto di Esame

Rares Sorin Drosu
Lorenzo Visca

(rares.drosu@edu.unito.it)
(lorenzo.visca846@edu.unito.it)

A.A. 2025/2026

DIRECTORY DEL PROGETTO

- ❖ Il progetto è scaricabile al link:
<https://github.com/lorenzovisca846/Project2026TANS>

COMPILAZIONE

- ❖ Comandi per la compilazione (da eseguire nella home directory del progetto):

```
mkdir outputs  
mkdir outputs/plots  
mkdir build  
cd build  
cmake ..  
make
```

ESECUZIONE

- ❖ Una volta compilato il progetto si possono avviare sequenzialmente gli eseguibili. I comandi da eseguire nella directory `build` sono:
 - `./simulation`
 - `./reconstruction`
 - `./analysis`
- ❖ In questo modo, nella directory `outputs/plots` vengono salvati tutti i plot.

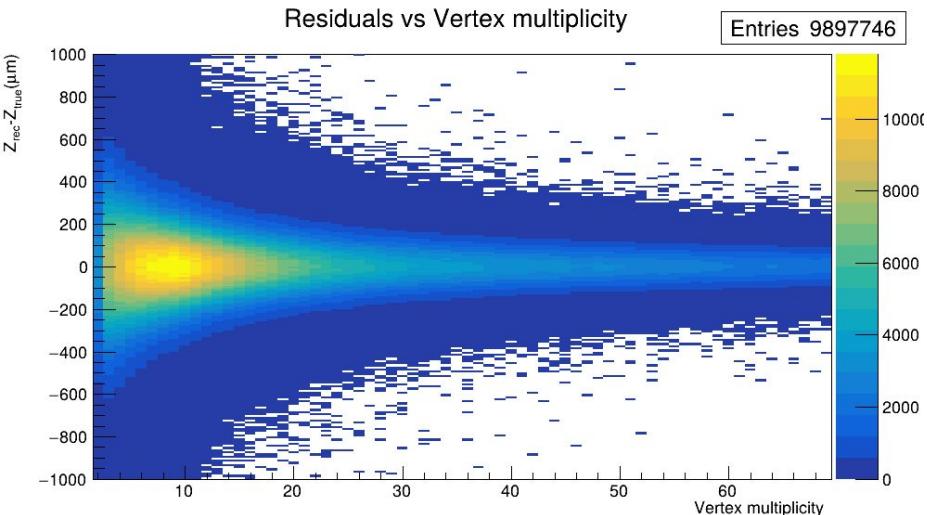
RISULTATI

- ❖ Nelle slides successive vengono mostrati i risultati di due run con 10'000'000 eventi ciascuna: in una run la coordinata Z del vertice viene estratta da una distribuzione gaussiana con $\sigma = 5.3$ cm, nell'altra l'estrazione viene effettuata da una distribuzione uniforme (-25 cm, 25 cm).

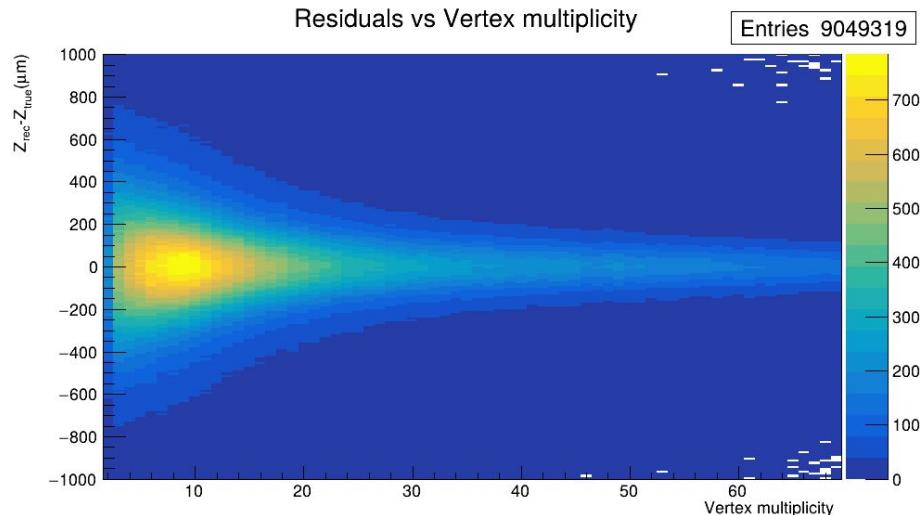
RISULTATI

- ❖ Distribuzione dei residui in funzione della molteplicità del vertice.

Distribuzione gaussiana



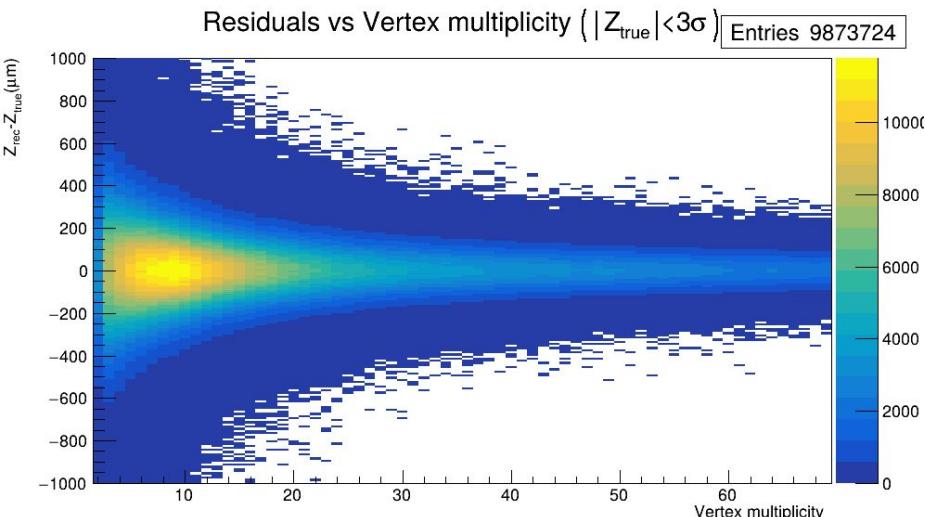
Distribuzione uniforme



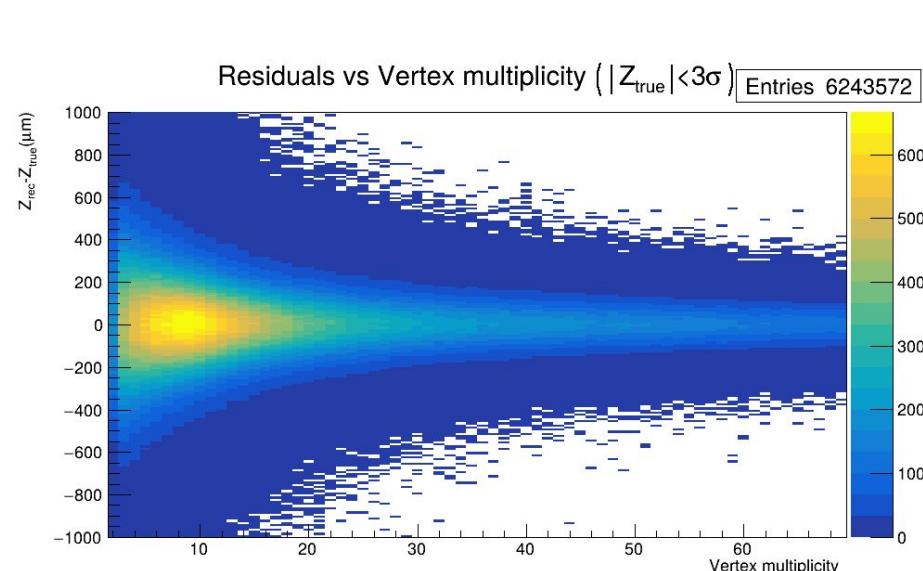
RISULTATI

- ❖ Distribuzione dei residui in funzione della molteplicità del vertice: taglio su Z del vertice entro 3σ dal centro.

Distribuzione gaussiana



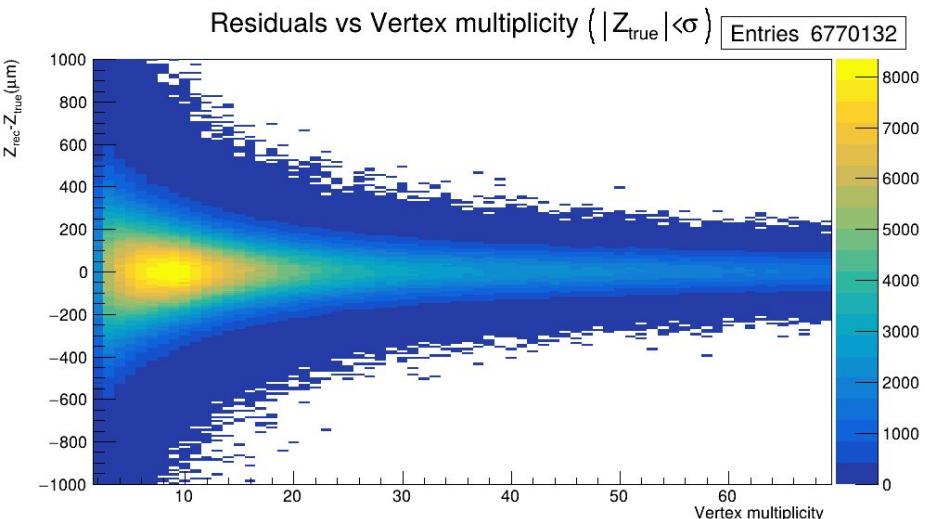
Distribuzione uniforme



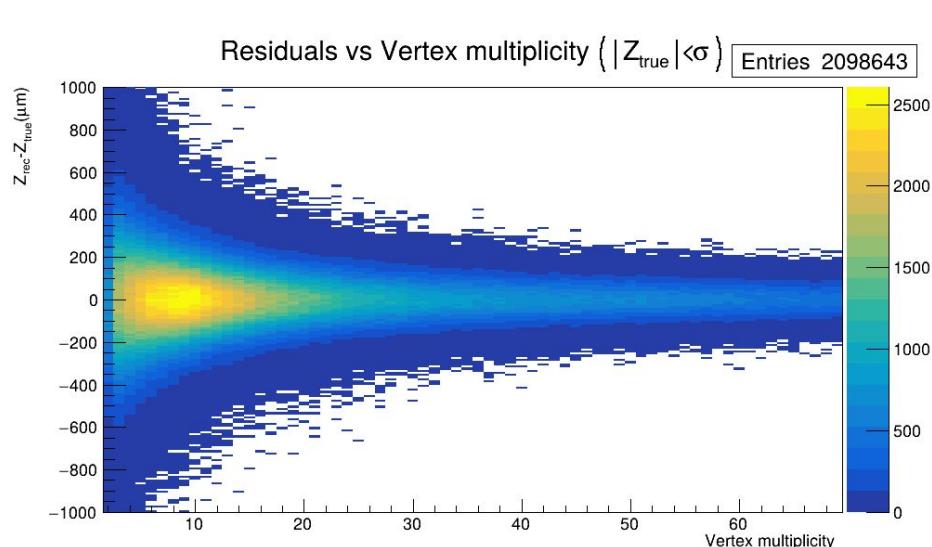
RISULTATI

- ❖ Distribuzione dei residui in funzione della molteplicità del vertice: taglio su Z del vertice entro 1σ dal centro.

Distribuzione gaussiana



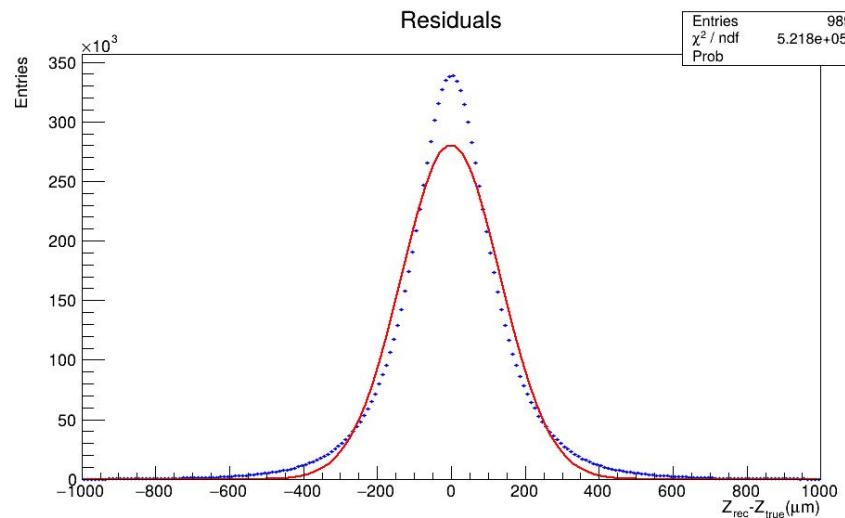
Distribuzione uniforme



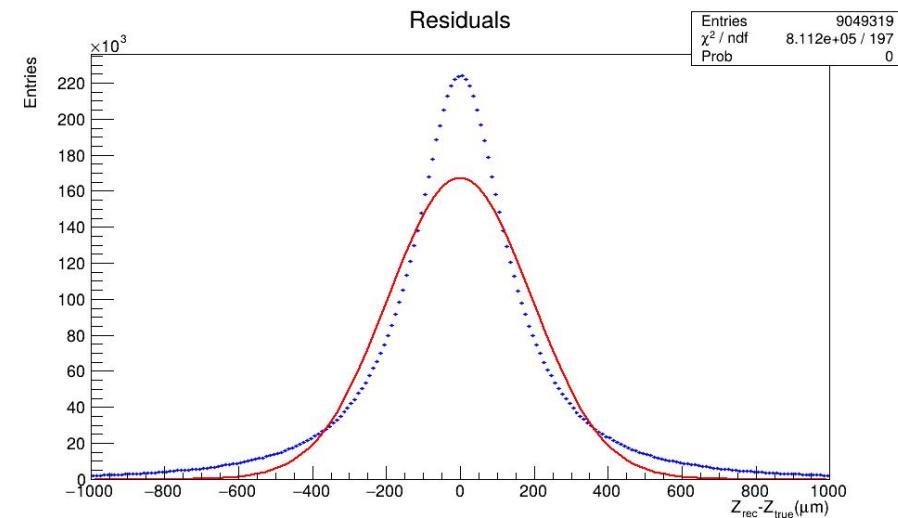
RISULTATI

- ❖ Distribuzione dei residui: dal tentativo di fit si nota che l'andamento è marcatamente non gaussiano.

Distribuzione gaussiana



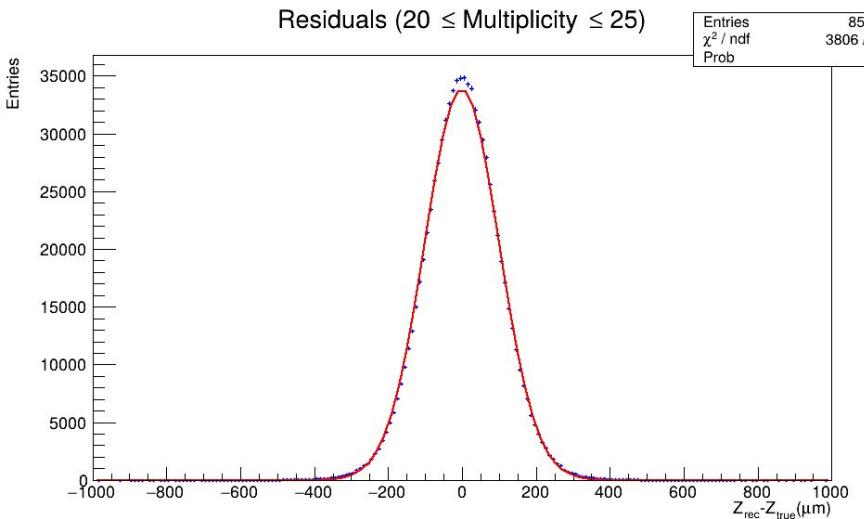
Distribuzione uniforme



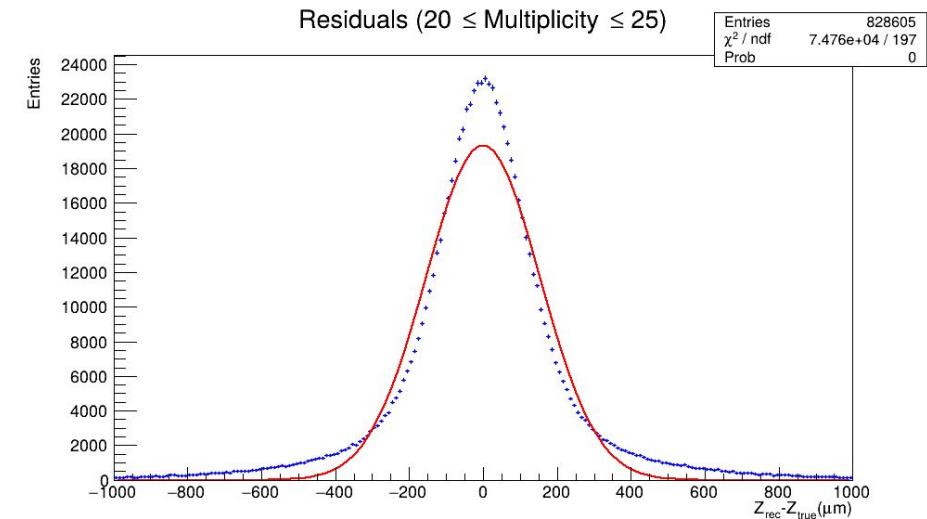
RISULTATI

- ❖ Distribuzione dei residui in un intervallo ristretto di molteplicità.

Distribuzione gaussiana



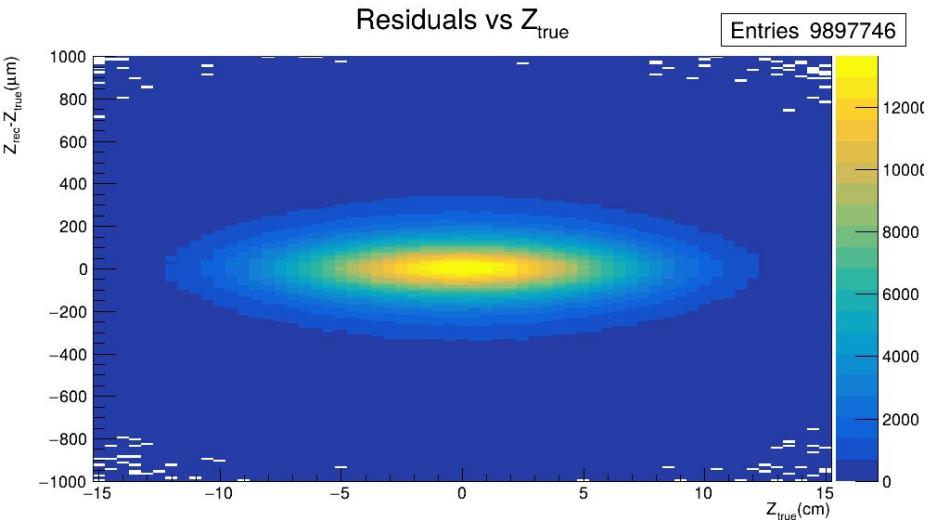
Distribuzione uniforme



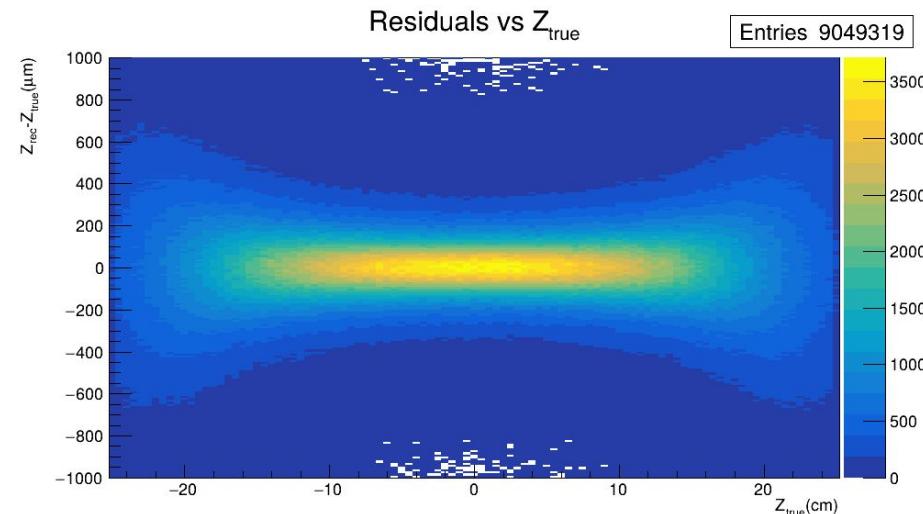
RISULTATI

- ❖ Distribuzione dei residui in funzione della coordinata Z del vertice.

Distribuzione gaussiana



Distribuzione uniforme

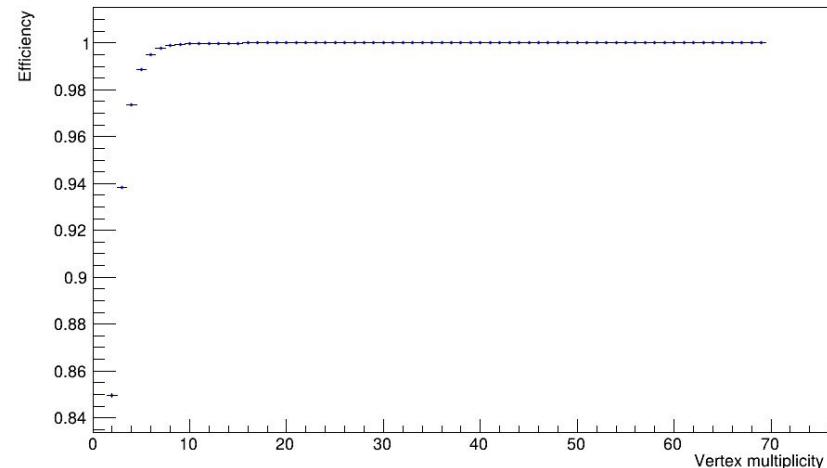


RISULTATI

- ❖ Efficienza in funzione della molteplicità.

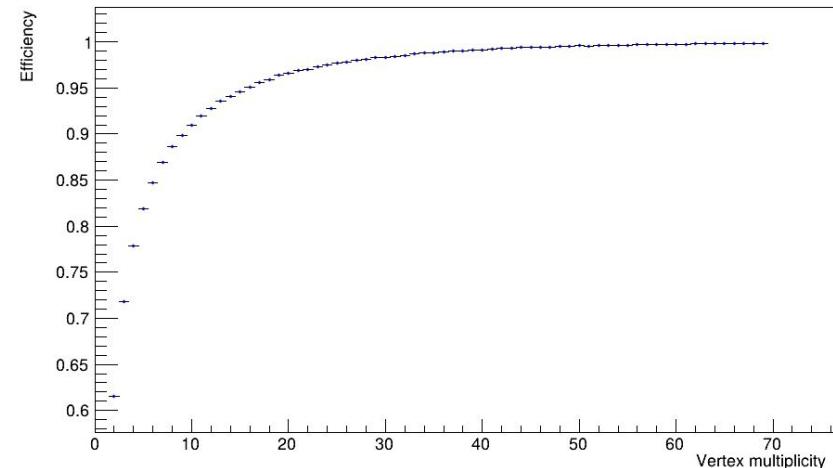
Distribuzione gaussiana

Efficiency vs Vertex multiplicity



Distribuzione uniforme

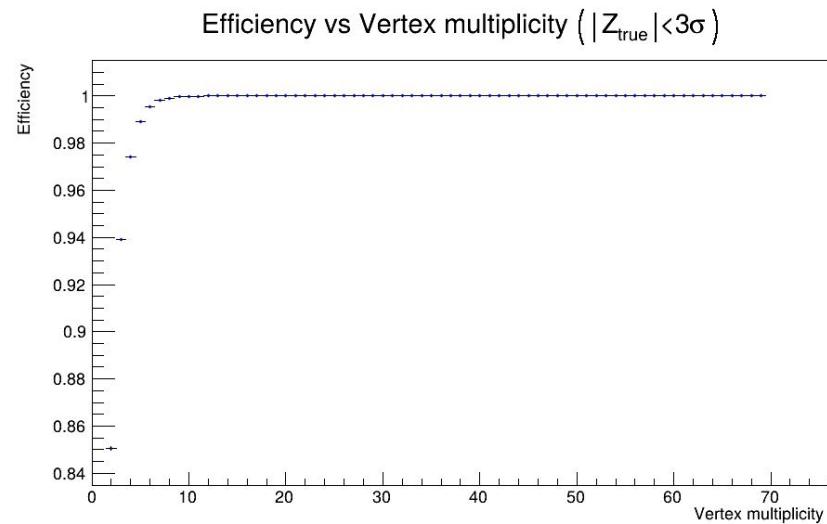
Efficiency vs Vertex multiplicity



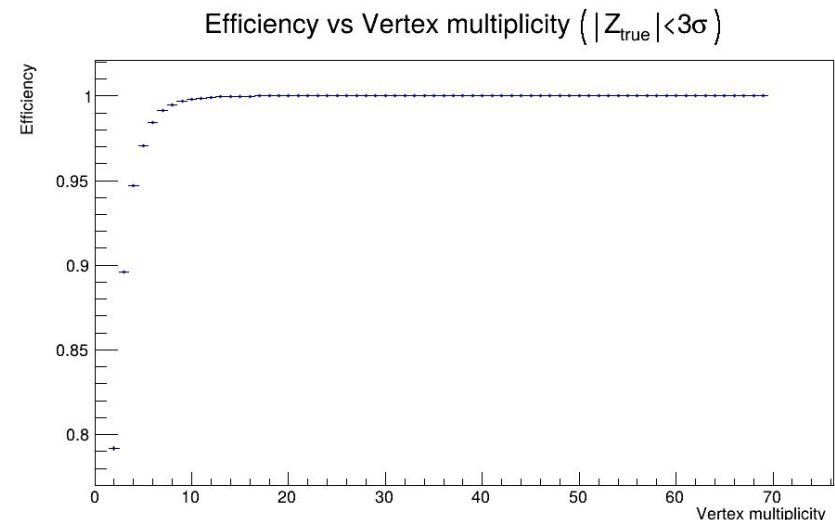
RISULTATI

- ❖ Efficienza in funzione della molteplicità: taglio su Z del vertice entro 3σ dal centro.

Distribuzione gaussiana



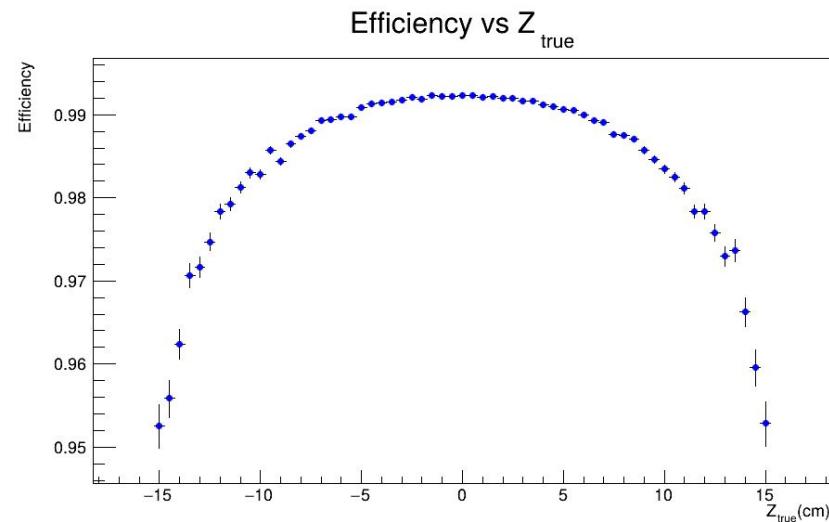
Distribuzione uniforme



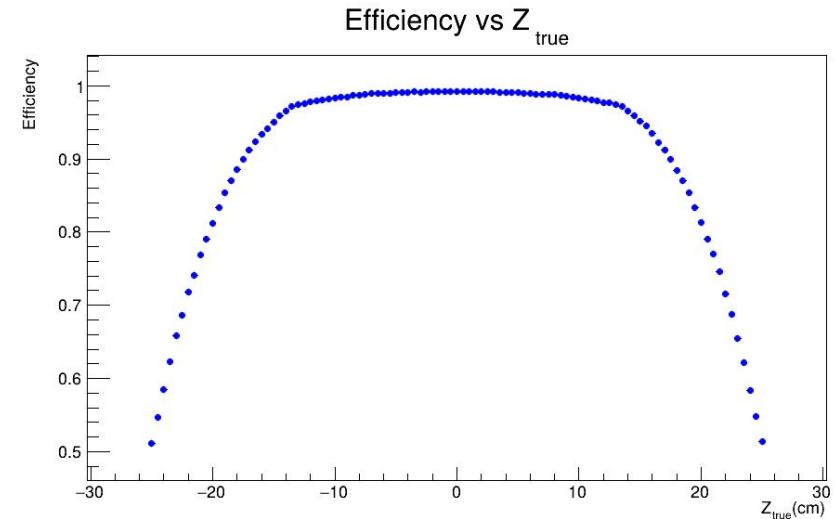
RISULTATI

- ❖ Efficienza in funzione della coordinata Z del vertice.

Distribuzione gaussiana



Distribuzione uniforme

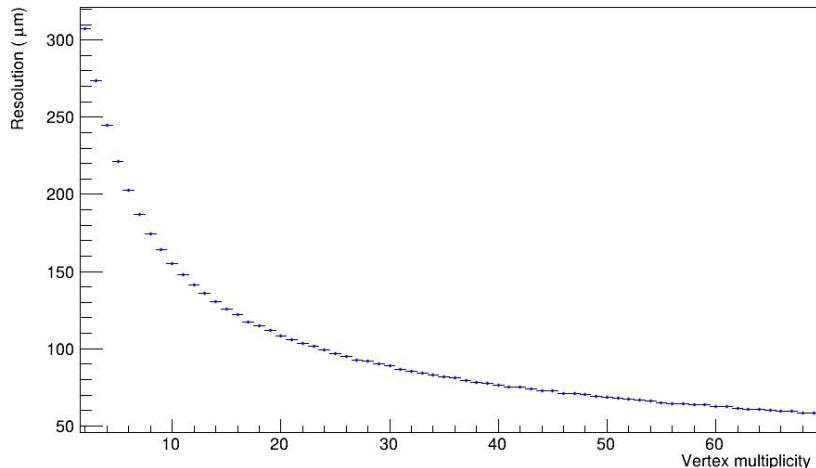


RISULTATI

- ❖ Risoluzione in funzione della molteplicità.

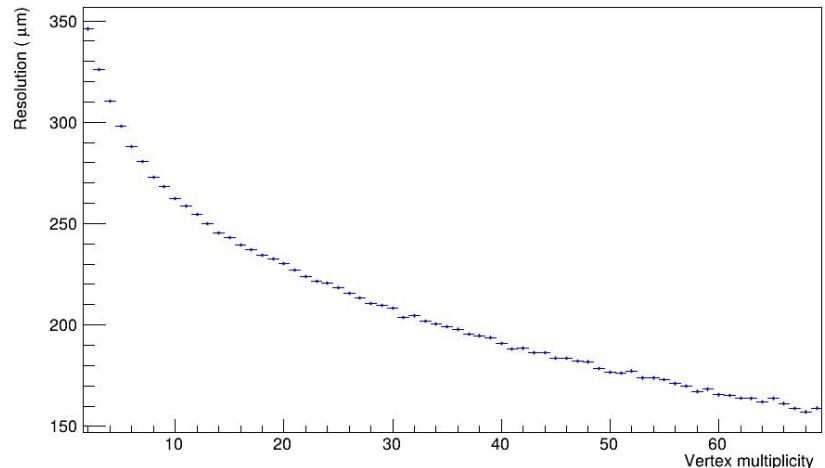
Distribuzione gaussiana

Resolution vs Vertex multiplicity



Distribuzione uniforme

Resolution vs Vertex multiplicity

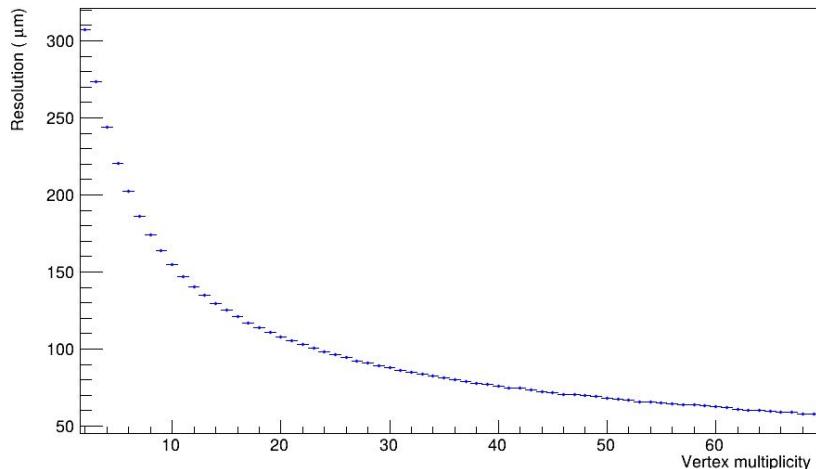


RISULTATI

- ❖ Risoluzione in funzione della molteplicità: taglio su Z del vertice entro 3σ dal centro.

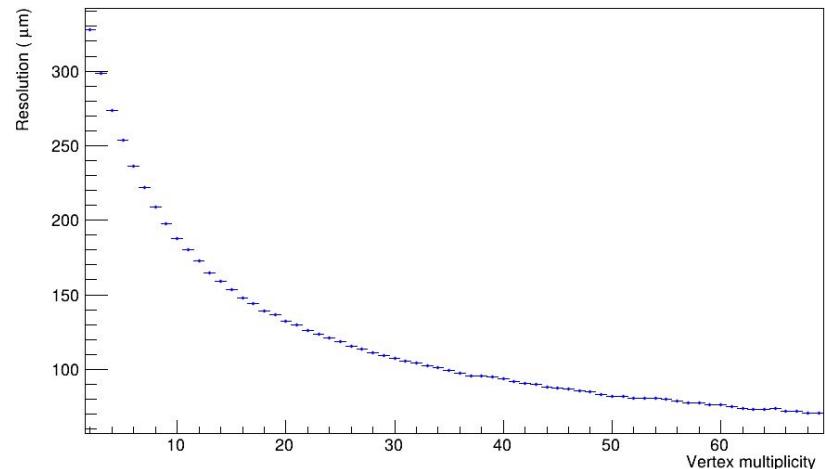
Distribuzione gaussiana

Resolution vs Vertex multiplicity ($|Z_{\text{true}}| < 3\sigma$)



Distribuzione uniforme

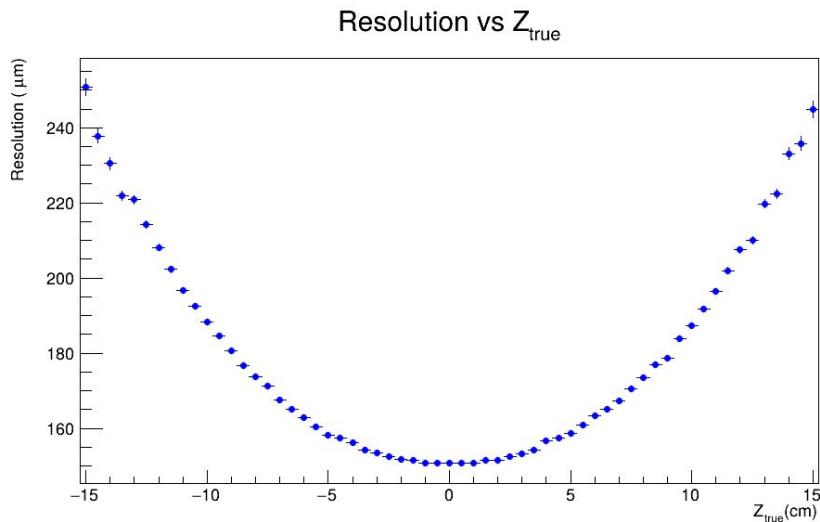
Resolution vs Vertex multiplicity ($|Z_{\text{true}}| < 3\sigma$)



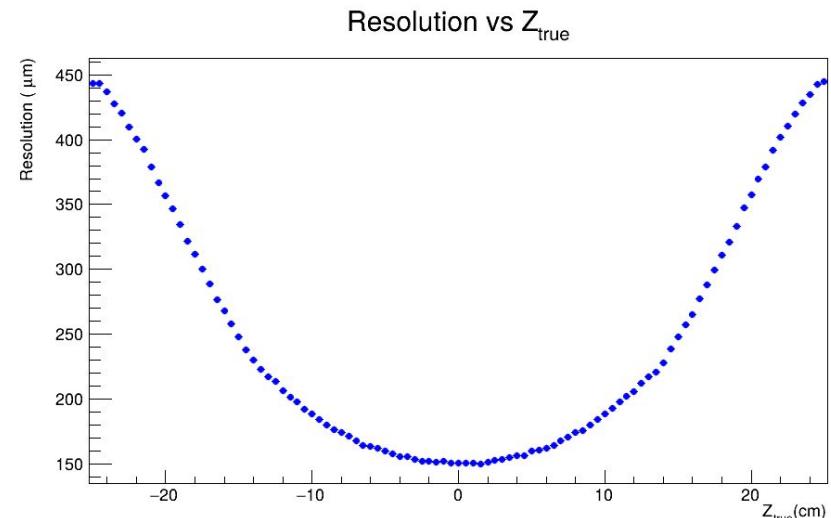
RISULTATI

- ❖ Risoluzione in funzione della coordinata Z del vertice.

Distribuzione gaussiana



Distribuzione uniforme



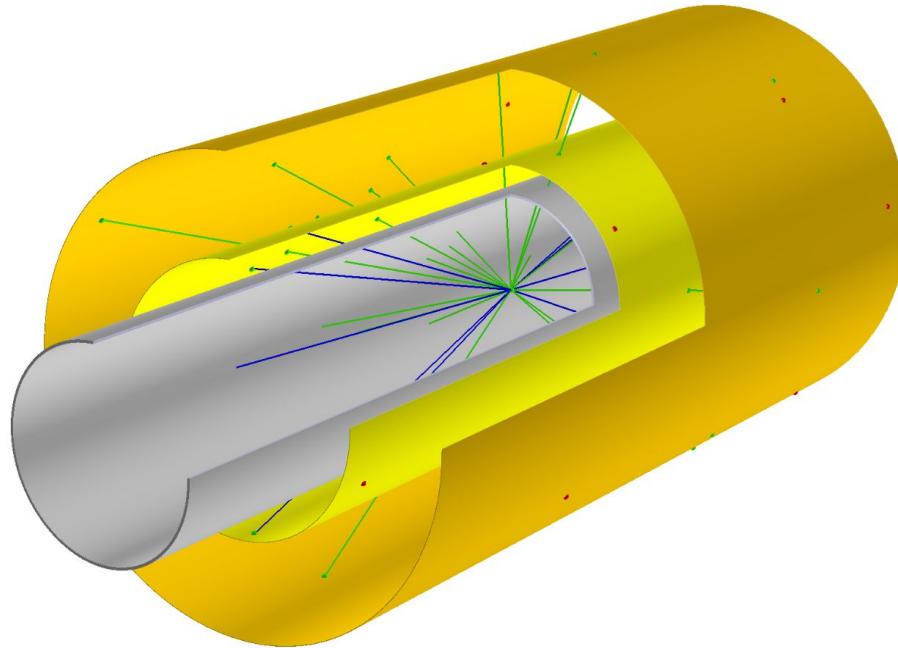
EVENT DISPLAY

- ❖ Impostando la variabile DISPLAY su true in main_simulation.cpp viene eseguita una simulazione con un solo evento utilizzando file di input e output prefissati, utilizzabili per l'event display.
- ❖ Per visualizzare la simulazione, utilizzare il seguente comando nella home directory del progetto:

```
root eventdisplay.C
```

EVENT DISPLAY

- ❖ Esempio di evento: i punti rossi sul rivelatore sono noise, le tracce verdi hanno generato hits su entrambi i rivelatori, le tracce blu sono fuori dall'accettanza geometrica di almeno un layer.



FILE DI CONFIGURAZIONE

- ❖ Quando si eseguono i programmi i valori delle variabili vengono impostati utilizzando la classe ROOT `TEnv`, che permette di leggere i valori da file.
- ❖ Se non viene specificato diversamente, il file utilizzato è `fullConfig.txt` situato nella directory `config`.
- ❖ È possibile utilizzare un file di configurazione personalizzato passandone il nome come argomento ai programmi (specificandone il path rispetto alla directory `config`), ad esempio:

```
./simulation customConfig.txt
```

FILE DI CONFIGURAZIONE

- ❖ Di seguito viene presentata una panoramica dei principali valori la cui modifica può risultare di interesse:
 - ❖ `Events`: numero di eventi
 - ❖ `MultScattering`: valore booleano che determina se considerare lo scattering multiplo
 - ❖ `Zedges_uniform`: se la coordinata Z del vertice segue una distribuzione uniforme, rappresenta la semiampiezza dell'intervallo
 - ❖ `Minimum / Maximum`: valori limite della molteplicità
 - ❖ `NoiseEnabled`: valore booleano che determina se inserire hits di rumore
 - ❖ `NoiseRate`: rate medio delle hits di rumore su ciascun layer
 - ❖ `RunningWindowSize`: ampiezza della running window in ricostruzione
 - ❖ `Residuals_zlim`: valore a cui vengono tagliate le code nei plot dei residui
 - ❖ `MultZoom_Min / MultZoom_Max`: intervallo di molteplicità su cui calcolare i residui

FILE DI CONFIGURAZIONE

- ❖ Generation: stringa di tre caratteri per scegliere le funzioni di generazione dei valori casuali.
 - Primo carattere (generazione del vertice):
 - g: distribuzione gaussiana in x,y,z
 - u: distribuzione gaussiana in x,y, distribuzione uniforme in z
 - o: vertice nell'origine
 - Secondo carattere (generazione della molteplicità):
 - h: estrazione da istogramma
 - u: distribuzione uniforme tra Minimum e Maximum
 - f: valore fissato a Maximum

FILE DI CONFIGURAZIONE

- ❖ Generation: stringa di tre caratteri per scegliere le funzioni di generazione dei valori casuali.
 - Terzo carattere (generazione del rumore):
 - p: distribuzione Poissoniana con media NoiseRate troncata a MaxNoise
 - u: distribuzione uniforme su (0,MaxNoise)
 - f: valore fissato a NoiseRate convertito a intero

SIMULAZIONE (codici)

SIMULAZIONE: CYLINDER

- ❖ La classe Cylinder descrive la geometria della beam pipe e dei due layer di rivelazione.
- ❖ Gli oggetti Cylinder vengono costruiti con 5 input:
 - raggio interno double
 - lunghezza double
 - spessore double
 - materiale string
 - layer int
- ❖ I data members vengono inizializzati di conseguenza, gli input “Be” e “Si” sul materiale definiscono la lunghezza di radiazione corrispondente.

SIMULAZIONE: MYPOINT

- ❖ La classe `MyPoint` descrive un punto in coordinate cilindriche, e contiene in memoria la traccia che lo ha generato (utile per l'event display).
- ❖ Gli oggetti `MyPoint` vengono costruiti con tre (quattro) input:
 - `R` double
 - ϕ double
 - `Z` double
 - `(trackID)` (int)
- ❖ Le funzioni getter consentono anche di ottenere le coordinate cartesiane del punto.

SIMULAZIONE: PARTICLE

- ❖ La classe `Particle` contiene le funzioni di trasporto.
- ❖ La costruzione di un oggetto `Particle` richiede il puntatore alla classe `SimRandom` che viene utilizzato nel main code.
- ❖ La funzione `Init` definisce a partire dal vertice la posizione iniziale della particella, genera i parametri angolari dalle relative distribuzioni e calcola i coseni direttori.
- ❖ La funzione `Propagation` prende in input il raggio da raggiungere e trasporta la posizione (x,y,z) a tale raggio.

SIMULAZIONE: PARTICLE (2)

- ❖ La funzione `MultScatter` prende in input le caratteristiche dello strato di materiale, calcola lo spessore efficace attraversato e definisce la nuova direzione di propagazione in termini di coseni direttori.
- ❖ La funzione `AngleUpdate` definisce i nuovi angoli in coordinate cilindriche in funzione dei coseni direttori.

SIMULAZIONE: SIMRANDOM

- ❖ La classe `SimRandom` si occupa della generazione di tutte le variabili casuali. Un oggetto `SimRandom` viene generato a partire da un seed e dagli istogrammi contenenti le distribuzioni assegnate.
- ❖ Viene inoltre definito un costruttore che prende anche in input un valore di tipo `double` che definisce la semiampiezza dell'eventuale distribuzione uniforme della coordinata Z del vertice.

SIMULAZIONE: SIMRANDOM (2)

- ❖ Le funzioni di generazione sono:
 - VertGaus, VertUnif, VertOrig: **funzioni di generazione del vertice**
 - MultUnif, MultHisto, MultFixed: **funzioni di generazione della molteplicità**
 - NoisePois, NoiseUnif: **funzioni di generazione del rumore**
 - PhiDist: **distribuzione uniforme su $(0,2\pi)$**
 - ThetaDist: **conversione di una pseudorapidità estratta da istogramma**
 - ScatterDist: **distribuzione dell'angolo polare di multiple scattering**
 - ZDist: **distribuzione uniforme sulla lunghezza dei rivelatori**
 - Smear: **gestisce lo smearing delle hits nella ricostruzione**

SIMULAZIONE: MAIN

- ❖ Il main code `main_simulation.cpp` definisce i parametri della simulazione ed esegue il loop sugli eventi, creando un `TTree` in output.
- ❖ Le funzioni `NoiseU`, `NoiseP`, `NoiseF` generano hits di rumore distribuite uniformemente sulle superfici dei rivelatori utilizzando la relativa distribuzione.
- ❖ La funzione `Transport` gestisce il trasporto della particella e la creazione dei punti di hit.
- ❖ La funzione `FunctionAssignment` permette di scegliere tra le funzioni di generazione dei valori casuali associando a ogni funzione scelta il puntatore di alias.

SIMULAZIONE: MAIN (2)

- ❖ Nel loop vengono eseguite le seguenti operazioni:
 - Generazione del vertice
 - Trasporto alla beam pipe, multiple scattering
 - Trasporto al layer 1, multiple scattering, salvataggio dell'hit
 - Trasporto al layer 2, salvataggio dell'hit
 - Generazione del rumore sui layer
 - Riempimento del TTree
- ❖ Se la variabile `DISPLAY` è impostata su `true`, al solo scopo di visualizzare l'evento vengono salvate anche le hits sulla beam pipe in un'apposita branch, che normalmente non viene definita.

RICOSTRUZIONE (codici)

RICOSTRUZIONE: CONFIG

- ❖ Nella fase di ricostruzione tutte le variabili utilizzate vengono salvate in un oggetto di tipo `Config`, che viene passato alle funzioni di ricostruzione.
- ❖ Il costruttore di `Config` utilizza un puntatore a un oggetto della classe `ROOT TEnv` per leggere il file di configurazione.
- ❖ Il puntatore utilizzato nella generazione dei valori casuali è univoco ed è salvato all'interno di `Config`.
- ❖ La funzione `Print` stampa i valori di configurazione.

RICOSTRUZIONE: TRACKLET

- ❖ Un oggetto della classe `Tracklet` definisce la tracklet associata a una coppia di punti sui due layer, di cui viene salvato l'indice.
- ❖ Il costruttore di `Tracklet` richiede una coppia di indici relativi alle hits sui due layer.
- ❖ La funzione `CalculateTrackletIntersection` prende in input i due punti e ne calcola l'intersezione con l'asse del fascio sul piano R-Z.

RICOSTRUZIONE: MAIN

- ❖ Il main code `main_reconstruction.cpp` definisce i parametri della ricostruzione ed esegue il loop sugli eventi, prendendo come input il `TTree` prodotto dal codice di simulazione e creando un `TTree` in output.
- ❖ La funzione `DeltaPhi` restituisce la separazione angolare azimutali tra due punti.
- ❖ La funzione `FormTracklets` prende in input le hits sui due layer e restituisce un `vector` contenente tutte le possibili tracklets, selezionate entro il valore di $\Delta\phi$ di taglio definito nel file di configurazione.

RICOSTRUZIONE: MAIN (2)

- ❖ La funzione `ReconstructVertex` prende in input le tracklets generate e restituisce la coordinata Z ricostruita utilizzando il metodo della running window.
- ❖ La funzione `RunningWindow` prende in input l'ampiezza della finestra e le intersezioni di ogni tracklet con l'asse Z (ordinate per Z crescente), e restituisce la media calcolata sulle intersezioni situate nella finestra più popolata. La funzione gestisce anche un puntatore booleano che viene impostato a `true` solo se viene identificata una finestra con almeno due valori.

! Per come è implementato l'algoritmo, se la molteplicità massima è condivisa da più finestre viene considerata la finestra più a sinistra.

RICOSTRUZIONE: MAIN (3)

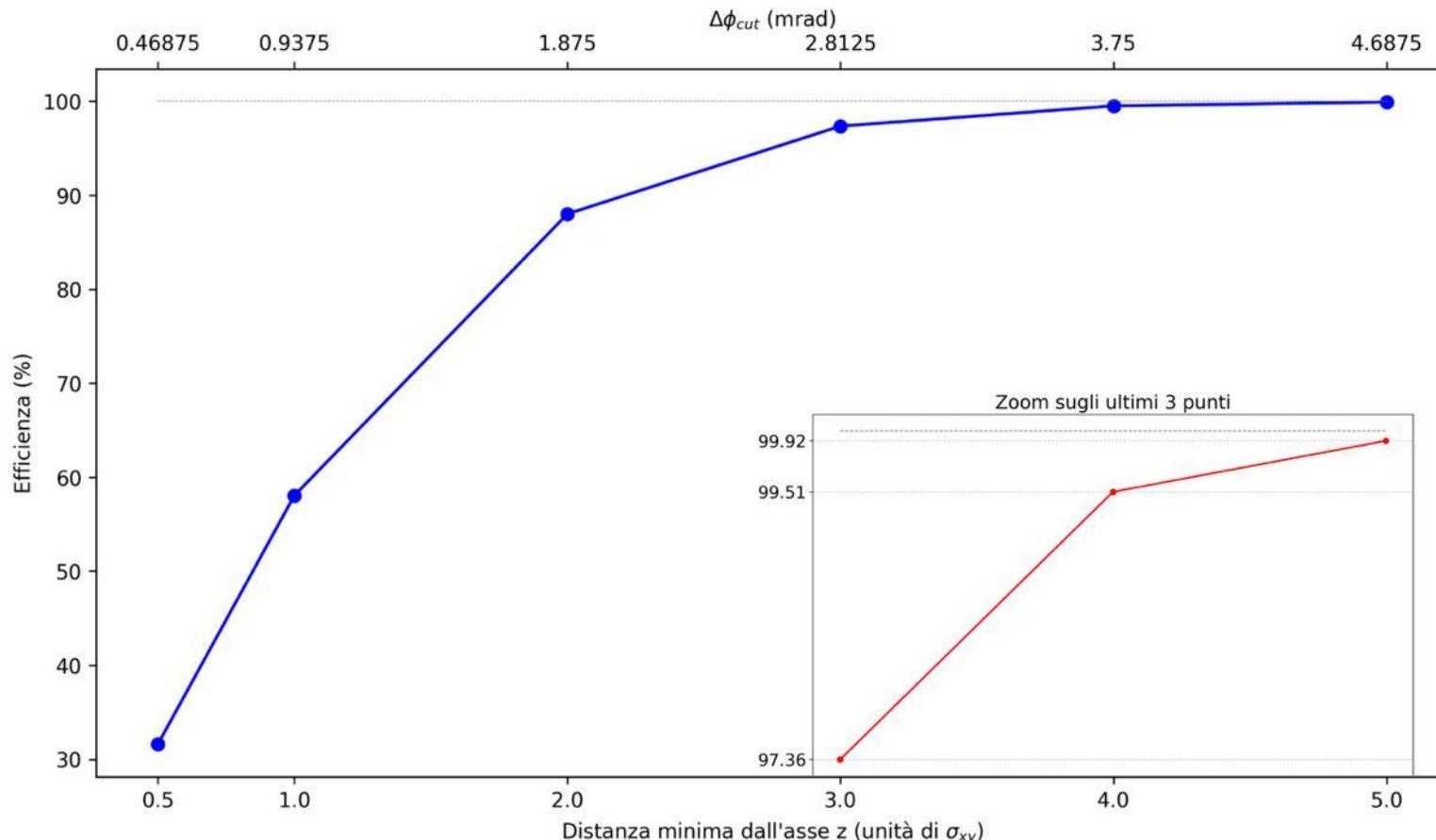
- ❖ Nel loop vengono eseguite le seguenti operazioni:
 - Salvataggio della molteplicità e del valore vero della coordinata Z del vertice
 - Creazione dei `vector` delle hits con applicazione dello smearing
 - Creazione delle tracklets
 - Ricostruzione del vertice con il metodo della running window. Se viene trovata una sola tracklet, come stima della coordinata Z si utilizza la singola intersezione con l'asse Z (`RunningWindow` fallisce se è disponibile una sola tracklet).

RICOSTRUZIONE: TAGLIO IN $\Delta\phi$

- ❖ Il valore di taglio di $\Delta\phi$ scelto è 4.6875 mrad. La scelta del valore di taglio è stata effettuata calcolando la distanza di minimo approccio all'asse Z corrispondente ad un dato valore di $\Delta\phi$; il valore utilizzato corrisponde ad una distanza di minimo approccio pari a 5σ , dove σ è la dispersione con cui viene generata la coordinata radiale del vertice.
- ❖ Per testare il valore di $\Delta\phi$ scelto è stata effettuata una simulazione su 1'000'000 eventi con i seguenti parametri:
 - molteplicità = 1
 - vertice fisso nell'origine
 - assenza di noise
 - pseudorapidità limitata in modo da avere un'efficienza del 100%

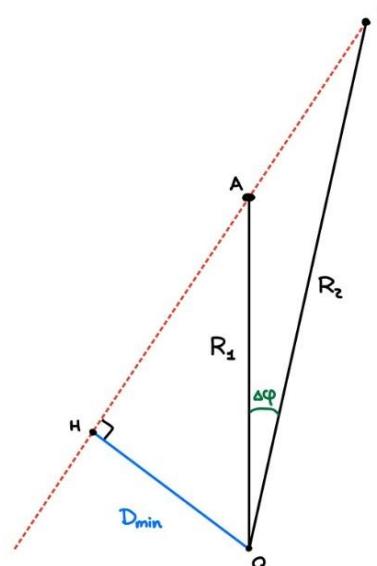
Il valore di $\Delta\phi$ utilizzato risulta avere un'efficienza del 99.92%

RICOSTRUZIONE: TAGLIO IN $\Delta\phi$ (2)



RICOSTRUZIONE: TAGLIO IN $\Delta\phi$ (3)

Relazione tra $\Delta\phi$ e distanza di minimo approccio



D_{\min} è l'altezza del triangolo AOB relativa ad AB

$$D_{\min} = \frac{2R_1 R_2 \sin(\Delta\phi)}{AB}$$

$$AB = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1 R_2 \cos(\Delta\phi)}$$

Si utilizza l'approssimazione di piccoli angoli: $\cos(\Delta\phi) \approx 1$ $\sin(\Delta\phi) \approx \Delta\phi$

$$D_{\min} \approx \frac{2R_1 R_2 \Delta\phi}{R_2 - R_1} \longrightarrow$$

$$\Delta\phi \approx \frac{(R_2 - R_1)}{2R_1 R_2} D_{\min}$$

ANALISI (codici)

ANALISI: MAIN

- ❖ Il main code `main_analysis.cpp` prende in input il `TTree` prodotto dal codice di ricostruzione e genera i plot come immagini `.png` nella directory `outputs/plots`, inoltre gli istogrammi vengono salvati in un file `.root` nella directory `outputs`
- ❖ Per la definizione dei valori di configurazione si utilizza la classe ROOT `Tenv`
- ❖ Nel file di configurazione è possibile decidere quali plot vengono generati impostando le relative flags su `true` o `false`.
- ❖ Le varie funzioni `Display` salvano le immagini dei plot e aggiungono gli istogrammi al file `.root`.

ANALISI: MAIN (2)

- ❖ Il primo loop sugli eventi riempie un istogramma contenente il numero di eventi simulati in funzione della molteplicità.
- ❖ Se la ricostruzione ha avuto successo, il loop riempie un istogramma contenente il numero di eventi ricostruiti in funzione della molteplicità.
- ❖ Se la ricostruzione ha avuto successo, il loop riempie gli istogrammi 2D dei residui in funzione di molteplicità e coordinata Z del vertice.
- ❖ Gli istogrammi dei residui (totali e nell'intervallo di molteplicità selezionato) vengono generati come slice degli istogrammi 2D.

ANALISI: MAIN (3)

- ❖ Gli istogrammi della risoluzione in funzione della molteplicità vengono popolati facendo slice degli istogrammi 2D ed estraendo i valori di RMS delle distribuzioni risultanti.
- ❖ L'efficienza in funzione della molteplicità viene generata con la classe ROOT `TEfficiency`, che calcola il rapporto tra i singoli bin degli istogrammi riempiti nel loop sugli eventi inserendo automaticamente errori binomiali ed evitando che le barre d'errore comprendano valori di efficienza maggiori di 1.

ANALISI: MAIN (4)

- ❖ Per creare gli histogrammi di risoluzione ed efficienza in funzione della coordinata Z del vertice, il binning viene determinato accorpando i bin dell'istogramma 2D generato nel primo loop sugli eventi in modo da avere sufficiente statistica (almeno 1000 entries per ciascuna slice).
- ❖ La funzione `FormBinEdges` prende in input l'istogramma 2D e restituisce un `vector` ordinato contenente gli estremi dei bin accorpati; l'algoritmo parte dal centro (si assume che il bin centrale abbia molteplicità sufficiente) e gestisce separatamente la parte destra ($Z>0$) e la parte sinistra ($Z<0$).

ANALISI: MAIN (5)

- ❖ Un ulteriore loop sugli eventi popola gli istogrammi contenenti il numero di eventi simulati e ricostruiti in funzione della coordinata Z del vertice secondo il binning definito in precedenza.
- ❖ L'efficienza in funzione della coordinata Z del vertice viene calcolata come rapporto tra questi due istogrammi utilizzando TEfficiency
- ❖ L'istogramma della risoluzione in funzione della coordinata Z del vertice viene popolato facendo slice dell'istogramma 2D secondo il binning definito in precedenza ed estraendo i valori di RMS delle distribuzioni risultanti.