

# Tecniche di Analisi Numerica e Simulazione

---

## Progetto di Esame

Rares Sorin Drosu  
Lorenzo Visca

([rares.drosu@edu.unito.it](mailto:rares.drosu@edu.unito.it))  
([lorenzo.visca846@edu.unito.it](mailto: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 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 tutti i plot vengono salvati all'interno di un file `.root` nella directory `outputs` e come immagini `.png` nella directory `outputs/plots`

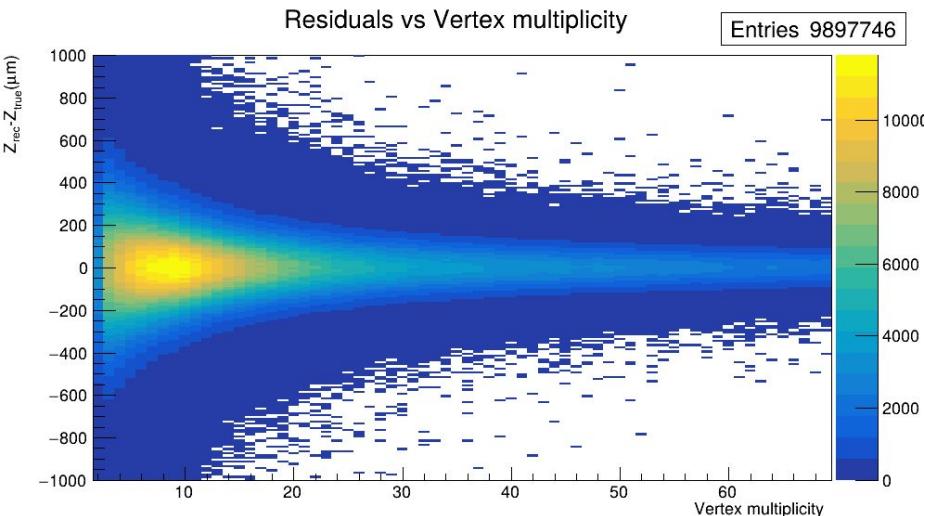
# RISULTATI

- ❖ 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).

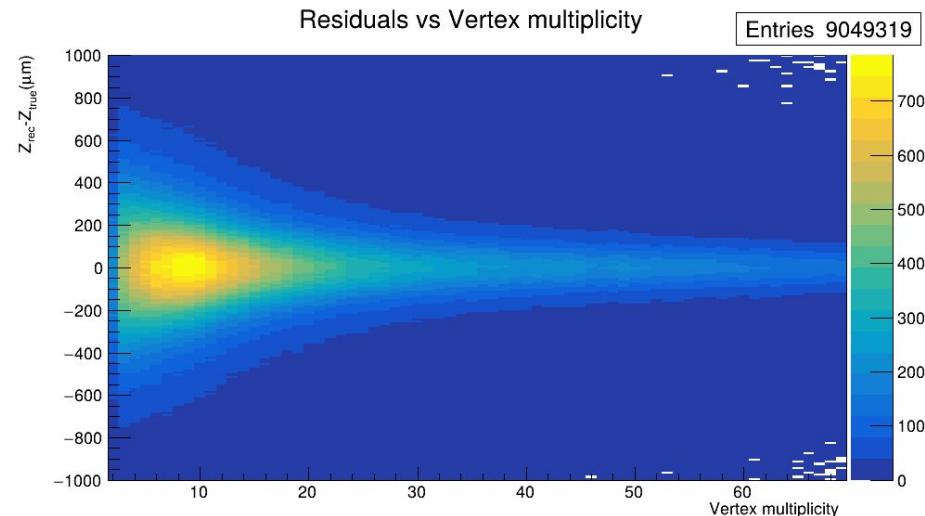
# RISULTATI

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

Distribuzione gaussiana



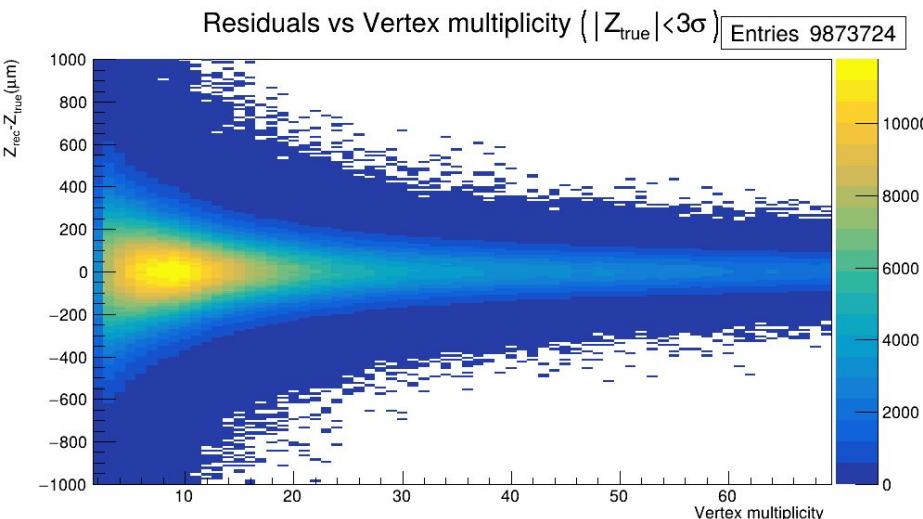
Distribuzione uniforme



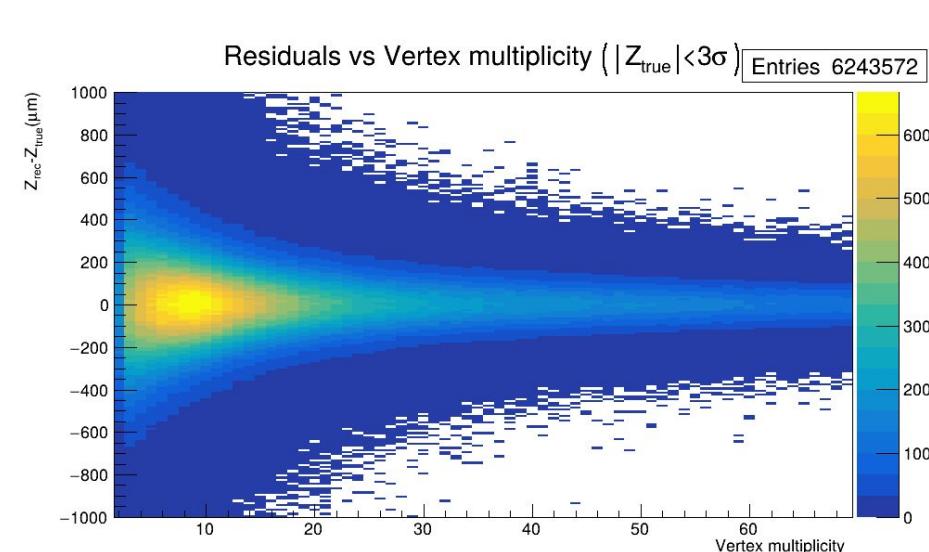
# RISULTATI

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

## Distribuzione gaussiana



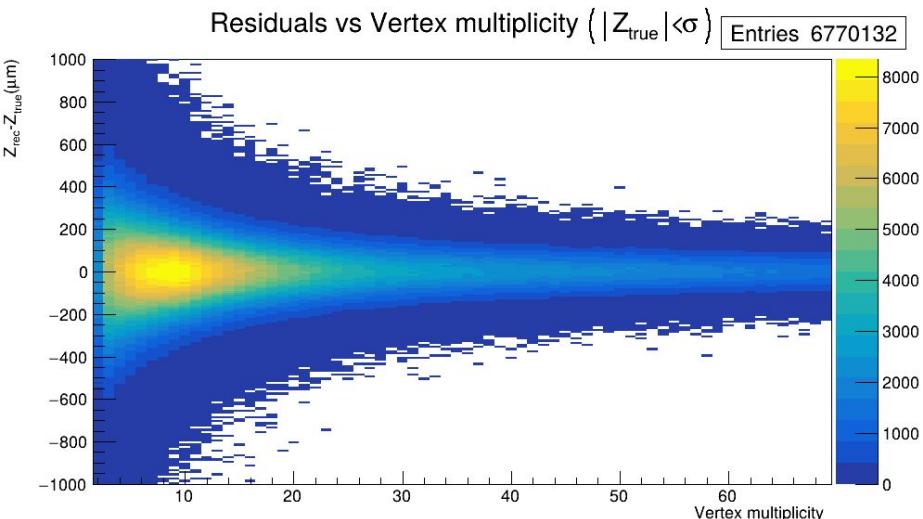
## Distribuzione uniforme



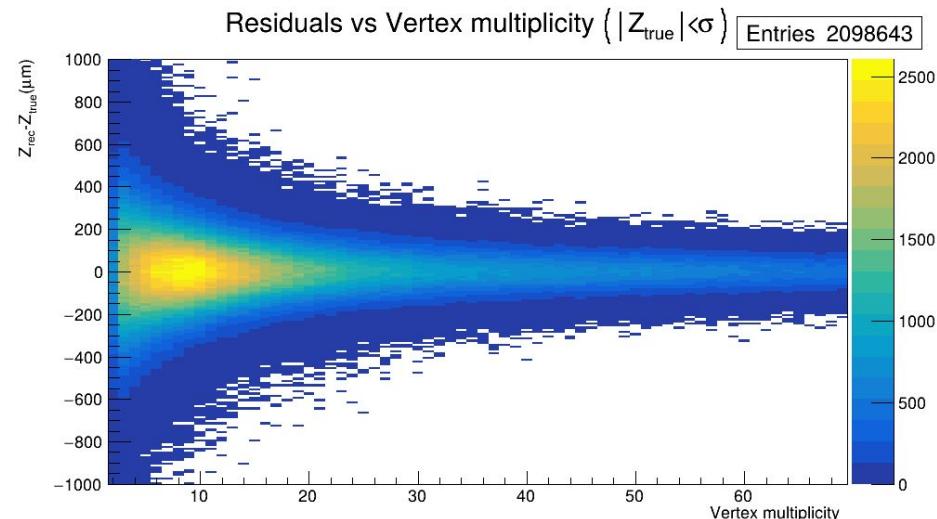
# RISULTATI

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

Distribuzione gaussiana



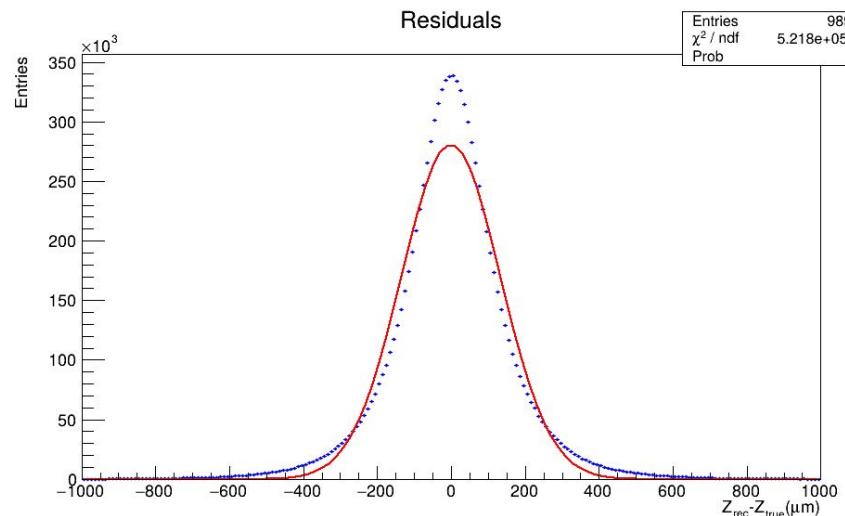
Distribuzione uniforme



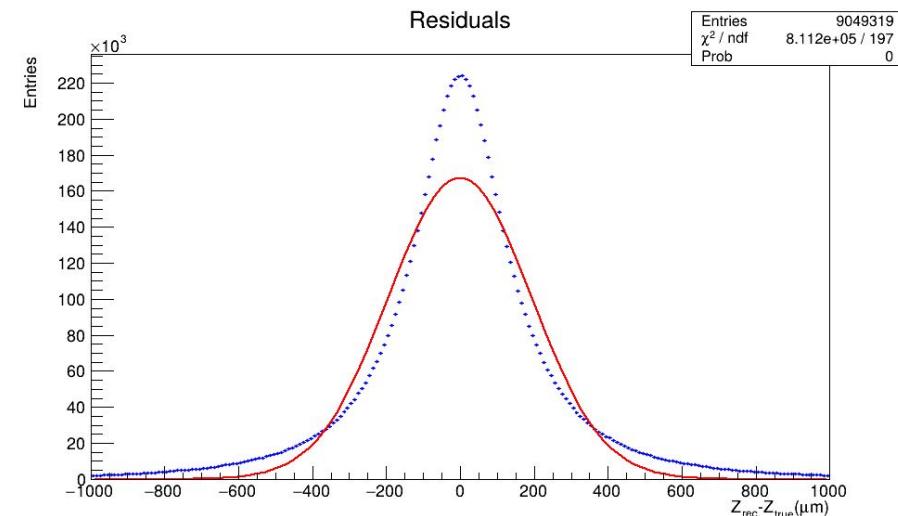
# RISULTATI

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

Distribuzione gaussiana



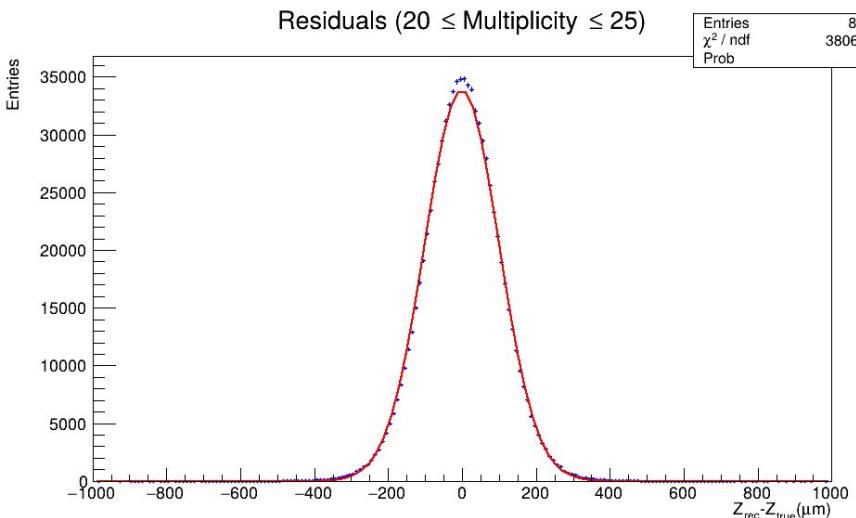
Distribuzione uniforme



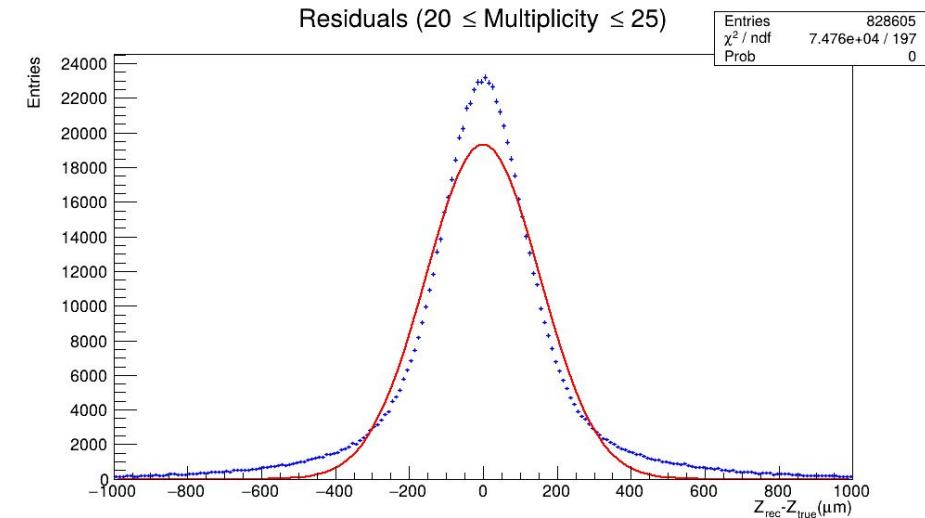
# RISULTATI

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

## Distribuzione gaussiana



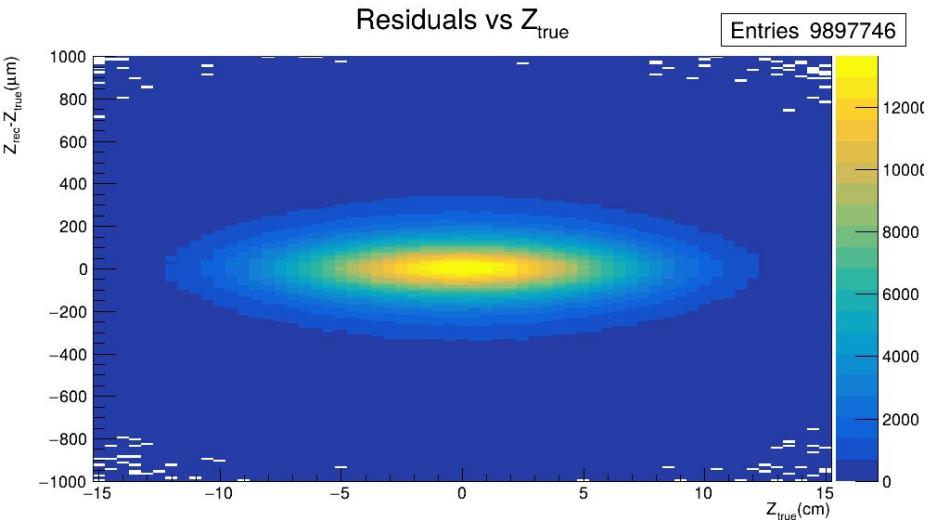
## Distribuzione uniforme



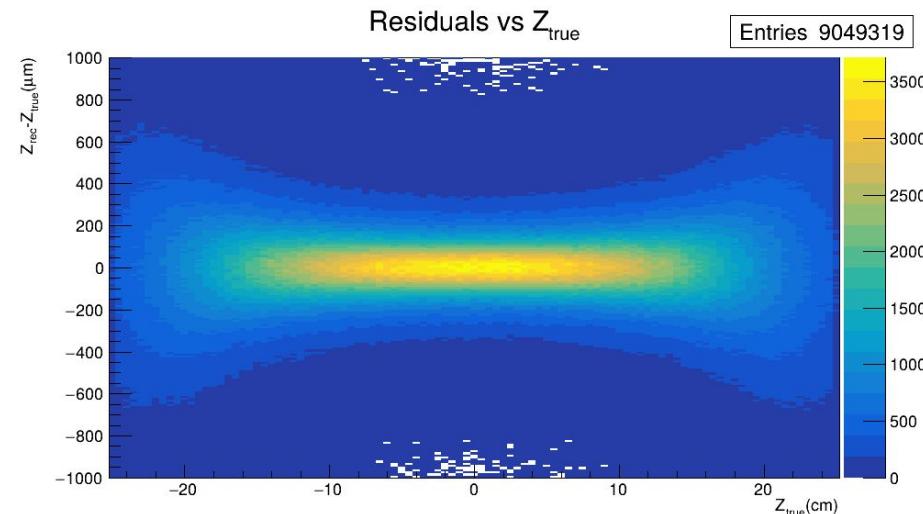
# RISULTATI

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

Distribuzione gaussiana



Distribuzione uniforme

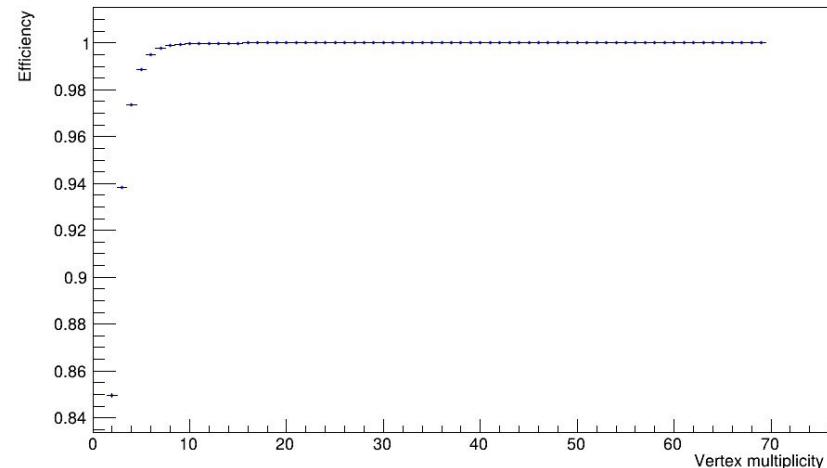


# RISULTATI

- ❖ Efficienza in funzione della molteplicità.

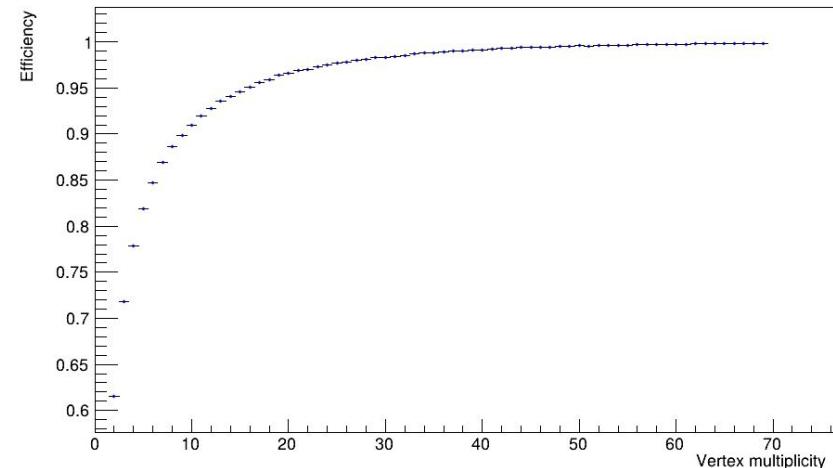
## Distribuzione gaussiana

Efficiency vs Vertex multiplicity



## Distribuzione uniforme

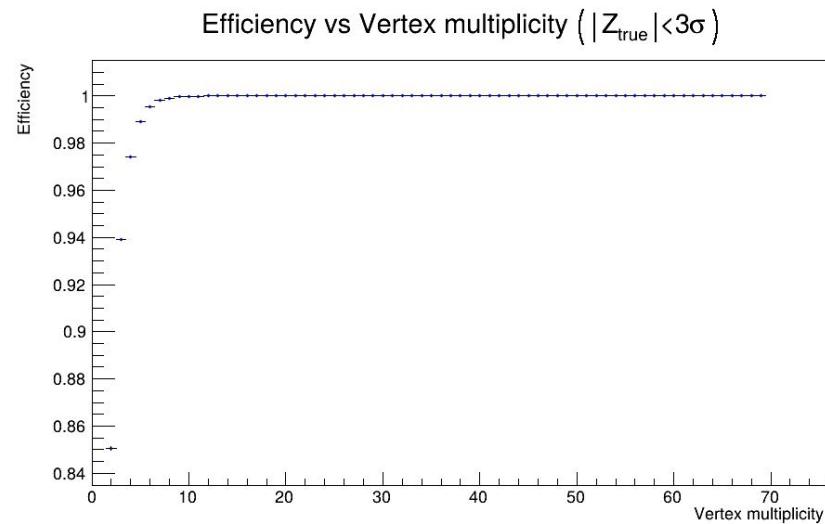
Efficiency vs Vertex multiplicity



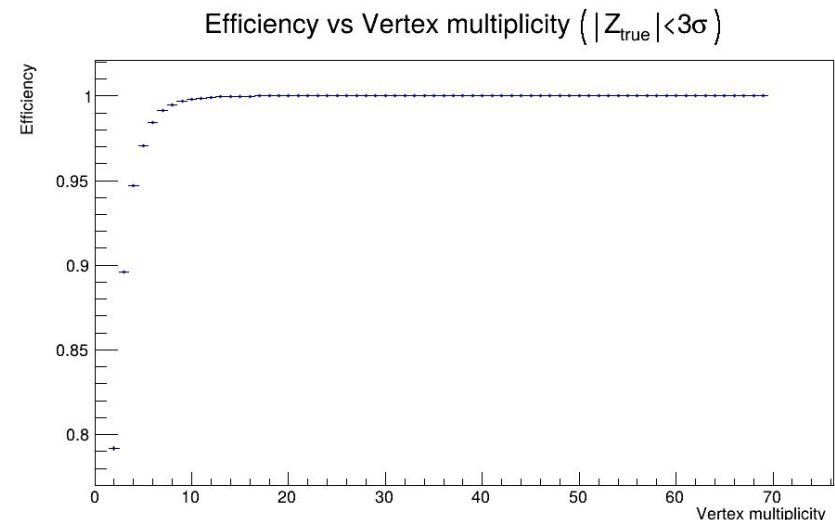
# RISULTATI

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

## Distribuzione gaussiana



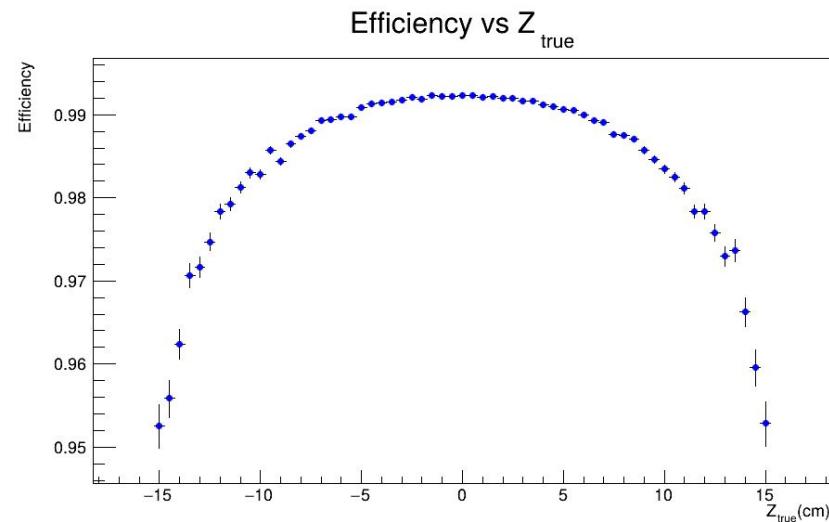
## Distribuzione uniforme



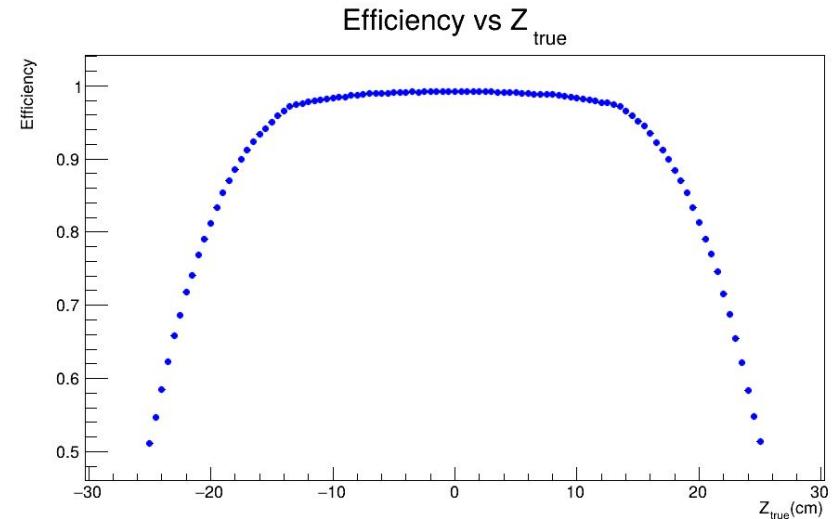
# RISULTATI

- ❖ Efficienza in funzione della coordinata Z del vertice.

Distribuzione gaussiana



Distribuzione uniforme

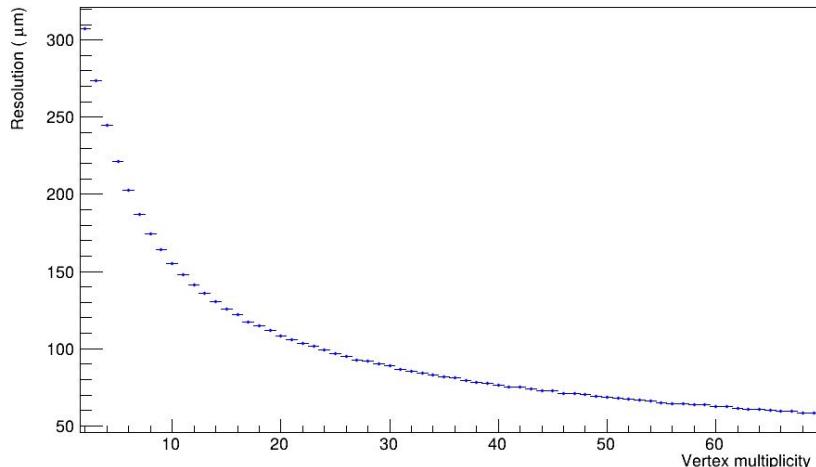


# RISULTATI

- ❖ Risoluzione in funzione della molteplicità.

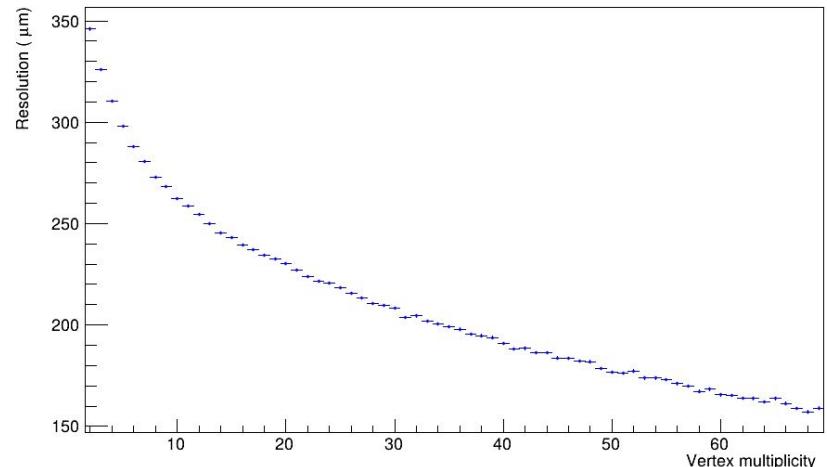
## Distribuzione gaussiana

Resolution vs Vertex multiplicity



## Distribuzione uniforme

Resolution vs Vertex multiplicity

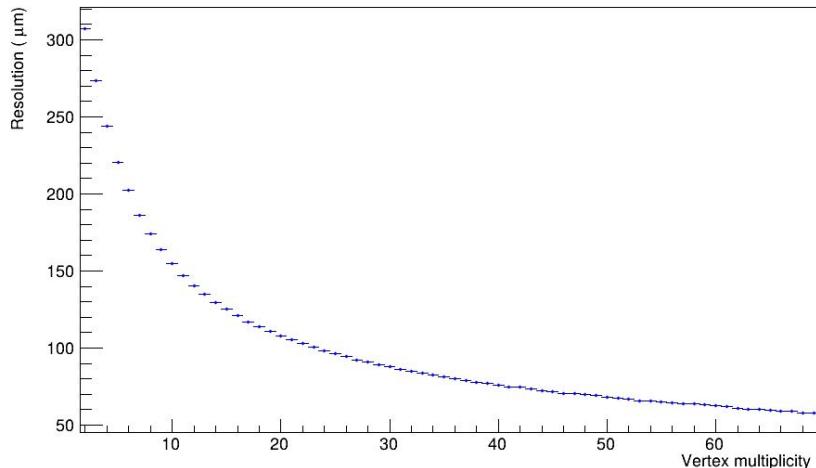


# RISULTATI

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

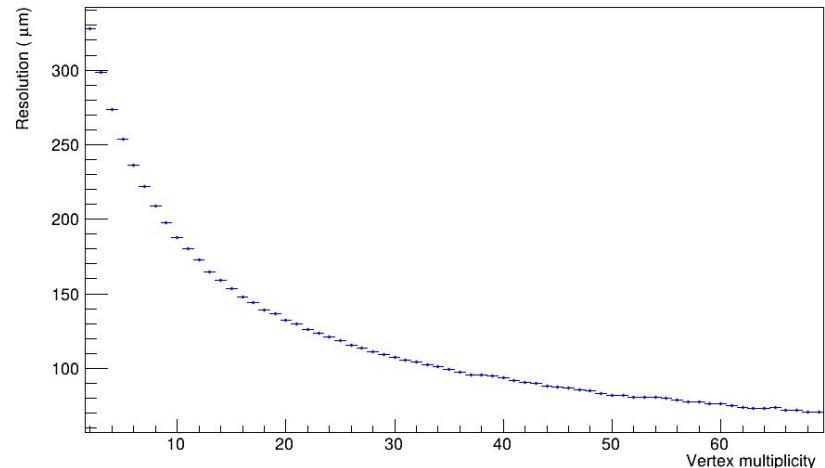
## Distribuzione gaussiana

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



## Distribuzione uniforme

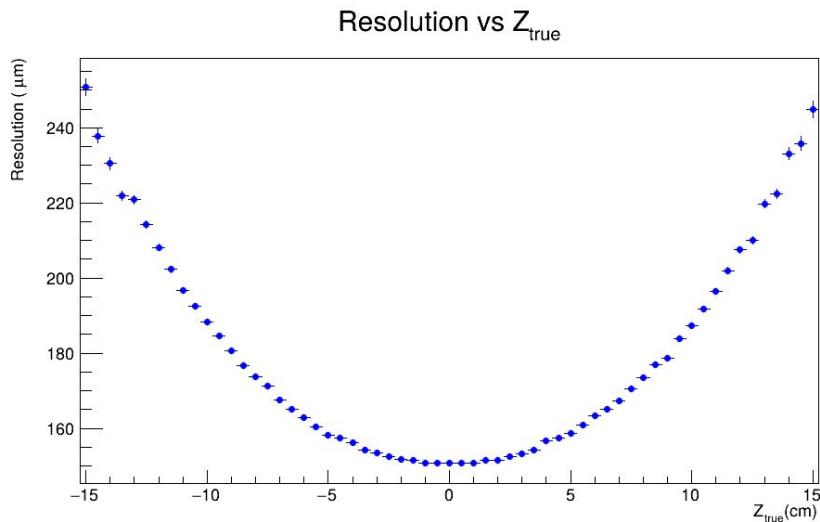
Resolution vs Vertex multiplicity ( $|Z_{\text{true}}| < 3\sigma$ )



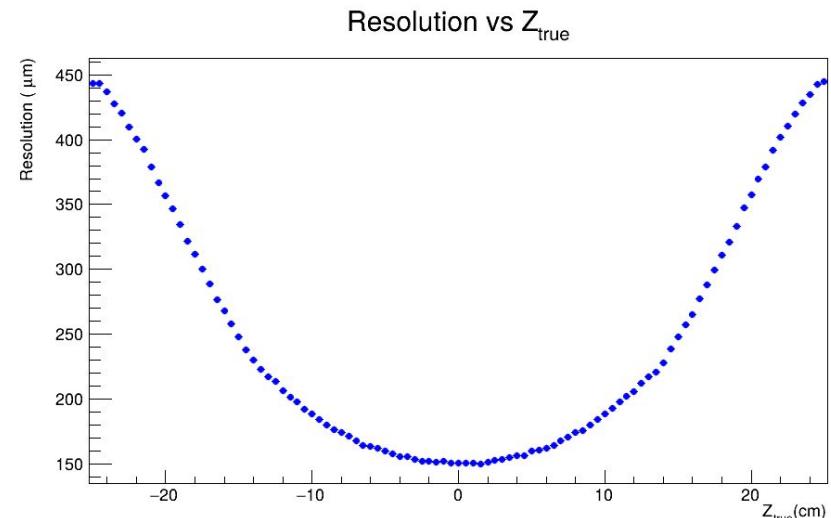
# RISULTATI

- ❖ Risoluzione in funzione della coordinata Z del vertice.

Distribuzione gaussiana



Distribuzione uniforme



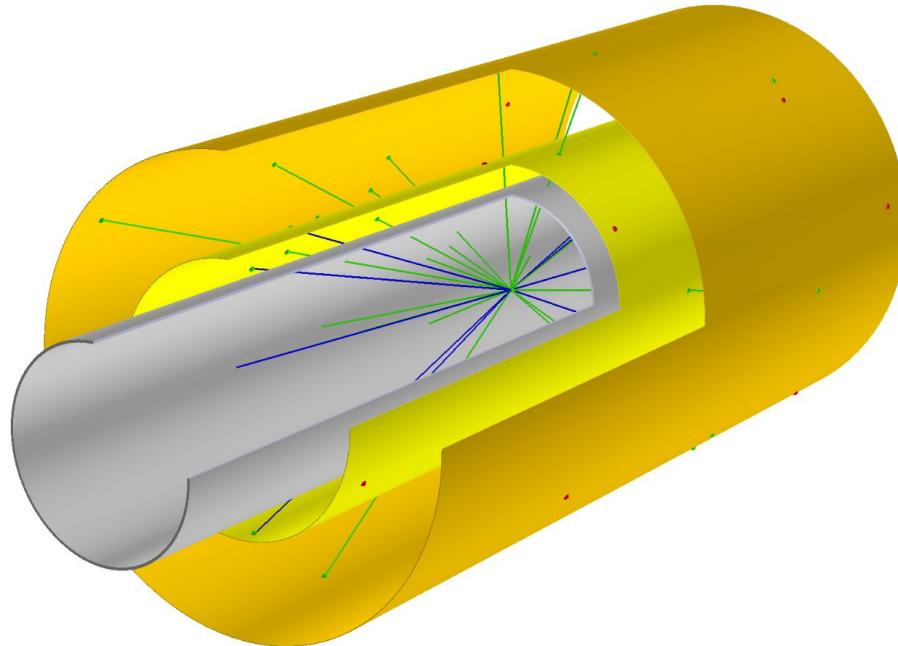
# EVENT DISPLAY

- ❖ 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
  - $\phi$  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 azimutale 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)

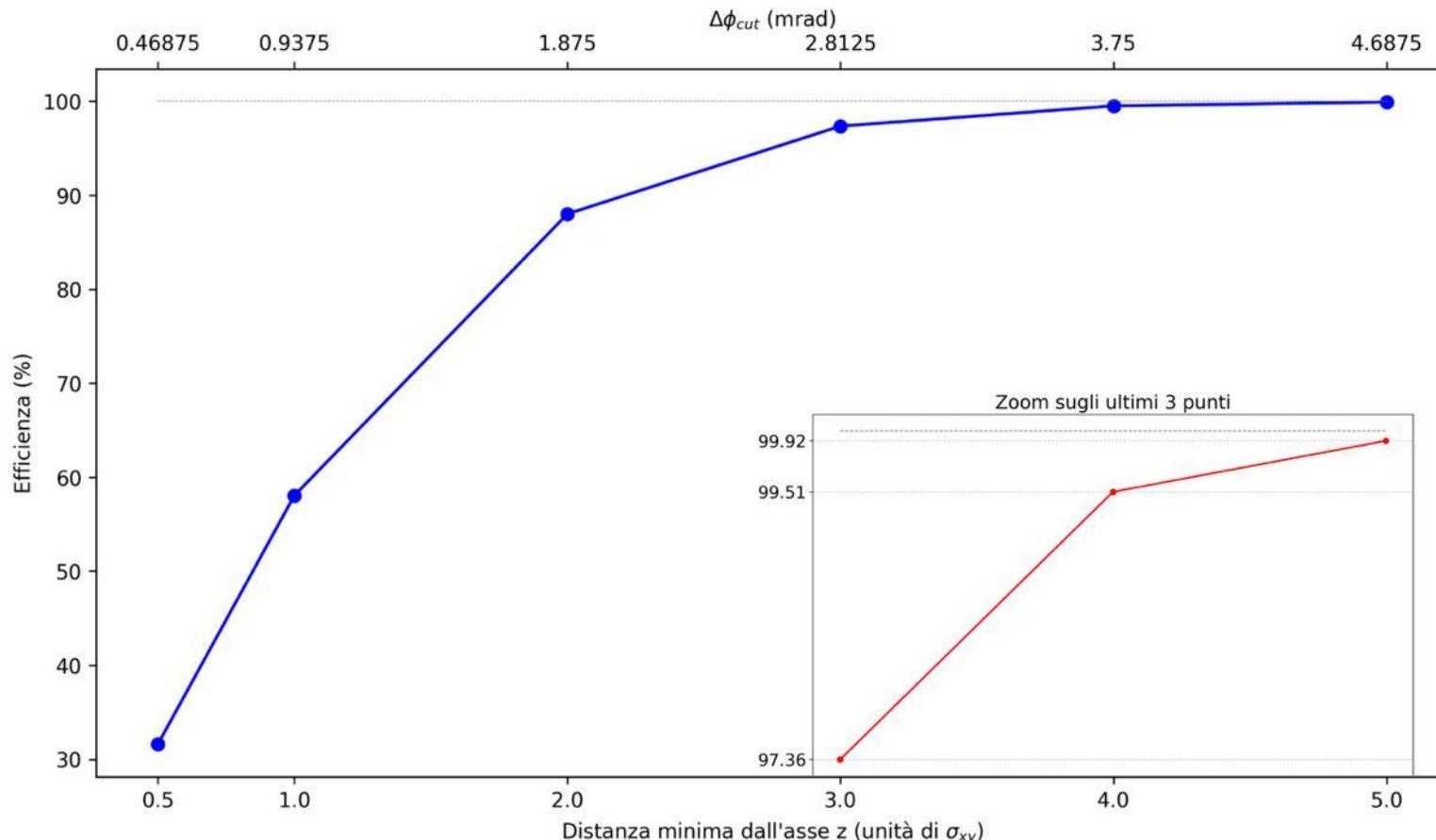
- ❖ Nel loop vengono eseguite le seguenti operazioni:
  - Salvataggio della molteplicità e del valore vero della coordinata Z del vertice
  - Creazione dei `vector` delle hits con applicazione dello smearing
  - Creazione delle tracklets
  - Ricostruzione del vertice con il metodo della running window. 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  $5\sigma$ , dove  $\sigma$  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%

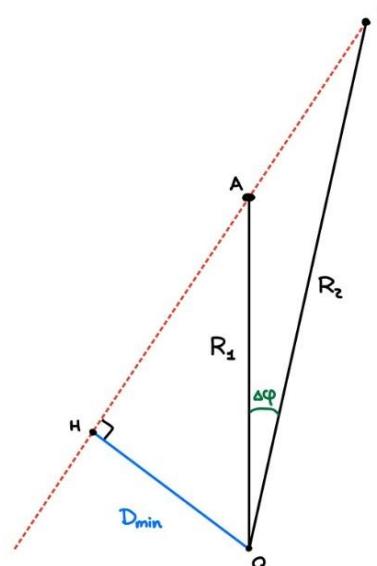
Il valore di  $\Delta\phi$  utilizzato risulta avere un'efficienza del 99.92%

# 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  $\text{TEfficiency}$
- ❖ 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.