

# MARCHETTI-LEONARDO-RELAZIONE- ROOT-2025

Marchetti Leonardo; Mezdrichki Zanko; Valli Matteo; Zardi Guglielmo

November 3, 2025

## 1 Introduzione

Il programma ha lo scopo di simulare, rappresentare ed analizzare il contenuto di eventi fisici generati da collisioni di particelle elementari.

Esse si contraddistinguono attraverso alcune proprietà fondamentali: massa, carica e la larghezza della risonanza  $\Gamma$ , legata al periodo di vita media; oltre a queste caratteristiche le particelle sono descritte anche da proprietà cinematiche, ovvero le componenti  $(P_x, P_y, P_z)$  dell'impulso. Le particelle prese in considerazione sono Pioni( $\pi^\pm$ ), Kaoni( $K^\pm$ ), Protoni( $p^+$ ), Antiprotoni( $p^-$ ) e Kaoni neutri( $K^0$ ). Il programma è stato sviluppato con il linguaggio di programmazione C++, implementando il software di analisi dati ROOT ; è stato possibile generare le particelle, le loro proprietà fondamentali e il loro comportamento a seguito di urti tramite la definizione di specifiche classi e metodi. Per la generazione in ogni evento è stato utilizzato il metodo Montecarlo in modo da rispettare date proporzioni.

Nella fase di analisi è stato verificato che le particelle create e il loro comportamento fossero compatibili con le previsioni; in particolare è stato possibile estrarre il segnale della particella  $K^*$ , caratterizzata da una vita media molto breve causata dalla sua instabilità. Il segnale di quest'ultima è stato ricavato dallo studio della massa invariante dei suoi prodotti; il decadimento di ogni  $K^*$  produce, infatti,  $\pi$  e  $K$  di segno discorde.

## 2 Struttura del codice

Dal momento che le particelle prodotte hanno attributi diversi tra loro, è stato opportuno creare tre classi legate tra di loro attraverso il meccanismo di ereditarietà, in modo da poter efficientemente generare ogni tipologia senza dover modificare la classe madre. La prima classe, della quale le altre due sono figlie, è la *particletype*. Dentro di essa sono contenute informazioni di base sulla particella simulata, cioè nome, massa e carica; inoltre sono definiti i metodi *getters* per leggere i valori delle sue caratteristiche.

La seconda classe è chiamata *resonancetype*. Essa eredita tutte le variabili e i

metodi della classe *particletype*, aggiungendo una nuova caratteristica della particella, la larghezza della risonanza, grandezza legata al tempo di vita, assieme al *getter* associato a questa variabile.

L'ultima classe principale si chiama *particle*, anch'essa derivata da *particletype*. All'interno di *particle* è presente un array di oggetti di tipologia *particletype*, contenente le caratteristiche di ogni particella generata.

Oltre all'array abbiamo il numero intero *fMaxNumParticleType*, che rappresenta il massimo numero di particelle diverse simulabili e *fNParticleType*, il numero di diverse specie che abbiamo nel nostro array, l'attributo *fIndex* indica la posizione nell'array di una specifica tipologia. Sono presenti anche le tre componenti della quantità di moto Px, Py e Pz ed un numero *Findparticle* che sarà usato successivamente per segnalare la presenza o meno di un certo tipo di particella nell'array.

Oltre agli attributi sono definiti anche vari metodi della classe: i *getters* per gli attributi elencati prima e il *getter* per l'energia della particella calcolata attraverso la seguente formula:

$$E = \sqrt{\text{Massa}^2 + P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}$$

e per la massa invariante secondo l'equazione:

$$M_{inv} = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2}$$

I rimanenti metodi servono per modificare e gestire a piacimento l'array dei diversi tipi delle particelle; *findParticle* determina se una tipologia di particella è presente o meno nell'array, *addParticle* aggiunge nuovi tipi se non sono già stati inseriti precedentemente, *setIndex* assegna ad ogni tipologia il numero fIndex, i metodi *decay2body* e *boost* invece sono utilizzati per il decadimento delle particelle K\* ed infine i metodi *print* per mostrare le informazioni relative ad ogni tipo di particella.

### 3 Generazione

Per ottenere una quantità sufficiente di dati sono stati simulati  $10^5$  eventi. Ognuno consiste nella generazione di 100 particelle, le quali vengono inserite in un array chiamato *EventParticles* di variabile *ParticleType* di dimensione 120, dal momento che il decadimento delle particelle di tipo K\* produce 2 nuovi elementi, che devono essere aggiunti in coda al contenitore *EventParticles*, in questo modo vengono evitati problemi con la dimensione dell'array. Ogni particella ha una probabilità fissata precedentemente di essere di una determinata tipologia:

- Pione con carica positiva  $\pi^+$  40%
- Pione con carica negativa  $\pi^-$  40%
- Kaone con carica positiva  $K^+$  5%

- Kaone con carica negativa  $K^-$  5%
- Protone  $p^+$  4.5%
- Antiprotone  $p^-$  4.5%
- Kaone neutro  $K^*$  1%

Le 100 particelle di ogni evento vengono quindi prodotte tramite una distribuzione Montecarlo che segue le proporzioni riportate.

La generazione della coordinata polare  $\theta$  avviene invece attraverso l'utilizzo di una distribuzione uniforme tra  $[0, 2\pi]$ , allo stesso modo ma tra  $[0, \pi]$  per la coordinata azimutale  $\phi$ .

Il modulo della quantità di moto  $P$  viene originato invece tramite una distribuzione esponenziale, in seguito il suo modulo viene proiettato nelle tre direzioni con l'utilizzo delle coordinate sferiche, usufruendo degli angoli  $\theta$  e  $\phi$ . A partire dalle componenti del moto e dalla massa delle singole particelle si può calcolare l'energia utilizzando la formula riportata in "Struttura del codice".

## 4 Analisi

Questa sezione presenta i grafici e le tabelle realizzate in seguito all'utilizzo del programma.

**Figure 1** mostra 4 grafici:

- 1) *Particle Type*, nel quale sono riportati le occorrenze per ogni tipologia di particella
- 2) *Polar angular distribution*, che evidenzia i valori dell'angolo  $\phi$  in base al numero di occorrenze con relativo fit
- 3) *Azimuth angular distribution*, che evidenzia i valori dell'angolo  $\theta$  in base al numero di occorrenze con relativo fit
- 4) *Pulse Modulus*, che mostra il valore del modulo dell'impulso in base al numero di occorrenze con relativo fit

In **Table 1** sono state riportate le occorrenze osservate per ogni particella. Confrontando i dati ottenuti con le occorrenze attese, calcolate considerando le probabilità predefinite che una particella sia di una data tipologia, otteniamo discrepanze trascurabili, confermando la congruenza tra i dati in input e i dati generati.

**Table 2** contiene, oltre al valore del parametro del fit, anche il  $\chi^2$ , i gradi di libertà e il  $\chi^2$  ridotto delle distribuzioni dei due angoli polari  $\theta$ ,  $\phi$  e dell'impulso. Analizzando il  $\chi^2$  ridotto, è possibile dire che i dati ottenuti sono congruenti con le distribuzioni uniformi per gli angoli e esponenziale per l'impulso.

I dati della risonanza  $K^*$  non sono ottenibili invece analizzando un solo set di dati. Prima di tutto vengono creati gli istogrammi *InvariantMassOppositeCharge*, *InvariantMassSameCharge*, *InvariantMassPionKaonOpposite*, *InvariantMassPionKaonSame* utilizzando i dati nel file *grafici.root*.

A questo punto al grafico *InvariantMassOppositeCharge* viene sottratto *InvariantMassSameCharge* e al grafico *InvariantMassPionKaonOpposite* viene sottratto *InvariantMassPionKaonSame*, creando due nuovi grafici differenza. Per estrarre la massa e la larghezza della  $K^*$  adattiamo i dati dei due grafici di sottrazione ad un fit gaussiano, dove la media risultante sarà la massa e la  $\sigma$  la larghezza delle particelle  $K^*$ .

In **Figure 2** sono rappresentati 3 grafici:

- 1) *Istogramma differenza tra massa invariante di particelle di carica discorde e concorde*, in base alla differenza di occorrenze con relativo fit
- 2) *Istogramma differenza tra massa invariante di particelle  $\pi K$  di carica discorde e concorde*, in base alla differenza di occorrenze con relativo fit
- 3) *Massa Invariante delle particelle che derivano dal decadimento della risonanza  $K^*$* , in base al numero di occorrenze con relativo fit

**Table 3** presenta i valori di media, sigma, ampiezza e  $\chi^2$  ridotto ottenuti attraverso l'analisi dei fit Gaussiani per ogni grafico. Analizzando il  $\chi^2$  ridotto, è possibile dire che i dati ottenuti sono conformi con le distribuzioni gaussiane per le masse invarianti. La media ottenuta attraverso la differenza di massa invariante di tutte le particelle di carica concorde e discorde risulta non compatibile con il valore atteso.

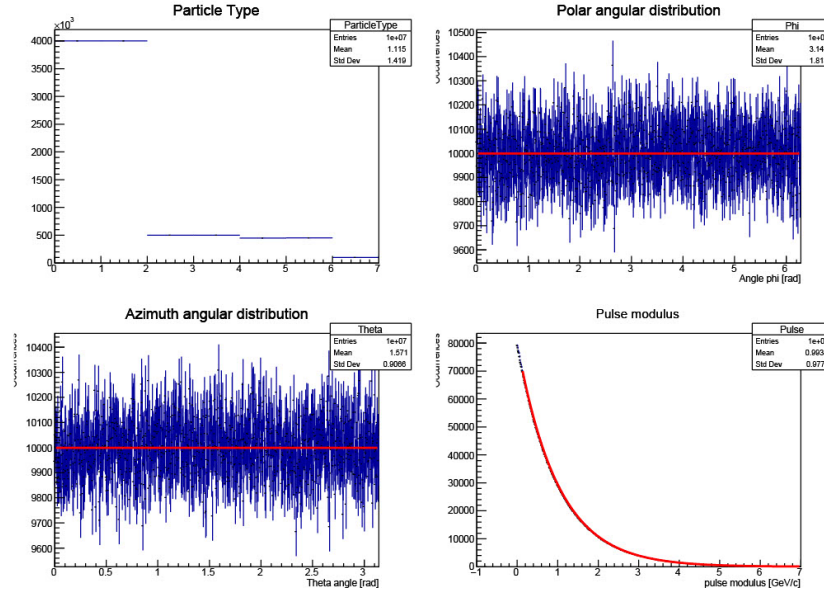


Figure 1: In alto a sinistra: Tipi di particelle.

In alto a destra: Distribuzione dell'angolo polare con relativo fit in rosso.

In basso a sinistra: Distribuzione dell'angolo azimutale con relativo fit in rosso.

In basso a destra: Modulo dell'impulso con relativo fit in rosso.

Per ogni grafico vengono evidenziati il numero di entrate, la media e la deviazione standard.

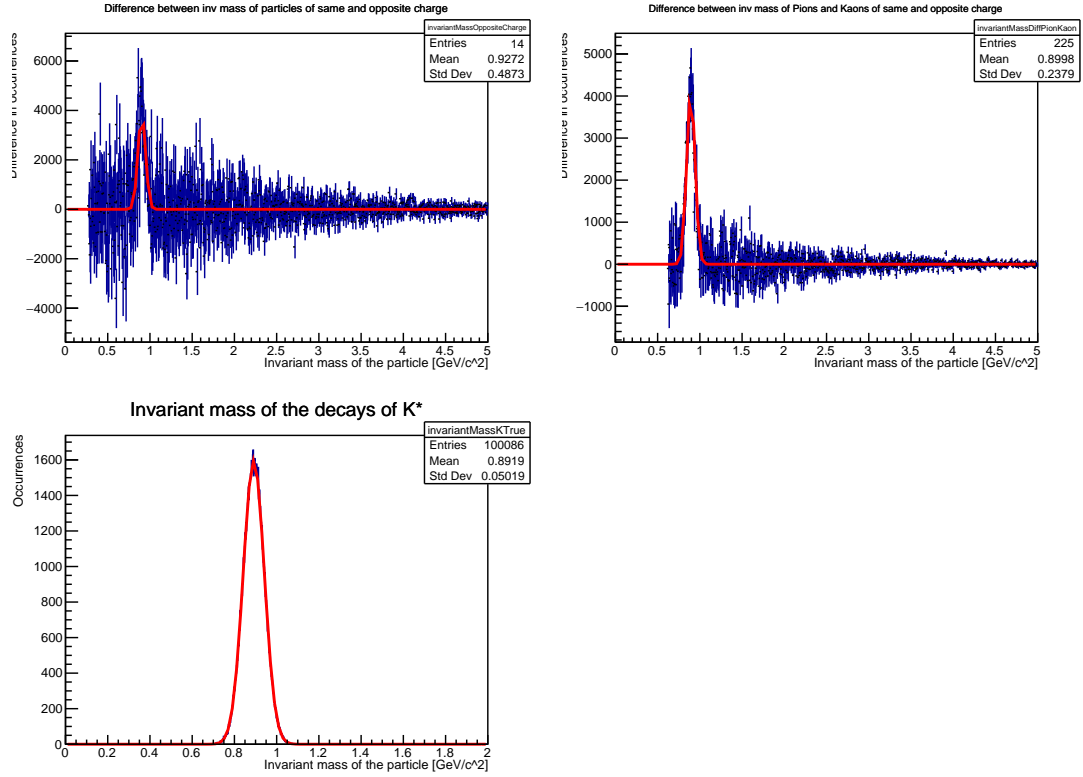


Figure 2: In alto a sinistra: Istogramma differenza tra massa invariante di particelle di carica discorde e concorde con relativo fit in rosso.  
In alto a destra: Istogramma differenza tra massa invariante di particelle  $\pi K$  di carica discorde e concorde con relativo fit in rosso.  
In basso a sinistra: Distribuzione dell'angolo azimutale con relativo fit in rosso.  
In basso a destra: Massa Invariante delle particelle che derivano dal decadimento della risonanza  $K^*$  con relativo fit in rosso.  
Per ogni grafico vengono evidenziati il numero di entrate, la media e la deviazione standard.

| specie | occorrenze osservate        | occorrenze attese |
|--------|-----------------------------|-------------------|
| $\pi+$ | $(3,999\pm0,002)\times10^6$ | $4\times10^6$     |
| $\pi-$ | $(4,001\pm0,002)\times10^6$ | $4\times10^6$     |
| K+     | $(4999,3\pm0,7)\times10^3$  | $5\times10^5$     |
| K-     | $(5000,3\pm0,7)\times10^3$  | $5\times10^5$     |
| P+     | $(449,7\pm0,7)\times10^3$   | $4,5\times10^5$   |
| P-     | $(450,3\pm0,7)\times10^3$   | $4,5\times10^5$   |
| K*     | $(100,1\pm0,3)\times10^3$   | $1,0\times10^5$   |

Table 1: tipologia, numero di occorrenze osservate e numero di occorrenze attese calcolate.

| distribuzione                                    | Parametro del Fit | $\chi^2$ | DOF | $\chi^2/\text{DOF}$ |
|--|-------------------|----------|-----|---------------------|
| Fit a distribuzione dell'angolo $\theta$ (pol 0) | $9999\pm3$        | 1020,6   | 999 | 1,02                |
| Fit a Distribuzione dell'angolo $\phi$ (pol0)    | $9999\pm3$        | 1075,4   | 999 | 1,08                |
| Fit a distribuzione e modulo dell'impulso (expo) | $1,0001\pm0,0003$ | 911,7    | 861 | 1,06                |

Table 2: Analisi le distribuzioni dell' angolo polare e azimutale e la distribuzione dei moduli dell'impulso, evidenziando il valore del parametro del fit ottenuto,  $\chi^2$ , numero di gradi di libertà e  $\chi^2$  ridotto.

| distribuzione e Fit   | Media           | Sigma             | Ampiezza      | $\chi^2/\text{DOF}$ |
|---|-----------------|-------------------|---------------|---------------------|
| Invariante vere K*(fit gauss)   | $0,892\pm0,005$ | $0,0500\pm0,0005$ | $1595\pm 19$  | 0,89                |
| Massa invariante da differenza delle condizioni di carica discorde e concorde (fit Gauss)         | $0,903\pm0,005$ | $0,045\pm0,005$   | $3853\pm366$  | 0,98                |
| Massa invariante da differenza delle condizioni $\pi$ K di carica discorde e concorde (fit Gauss) | $0,894\pm0,002$ | $0,049\pm0,002$   | $4091\pm 140$ | 1,02                |

Table 3: Analisi delle proprietà della particella K\*, confrontando i dati della massa invariante realmente osservate con quelle ottenute tramite le diverse combinazioni di particelle. La media rappresenta la massa delle particelle K\*, la sigma la larghezza della K\*.