



# $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ PRESSO NA62

RENATO FIORENZA

[renato.fiorenza@cern.ch](mailto:renato.fiorenza@cern.ch)

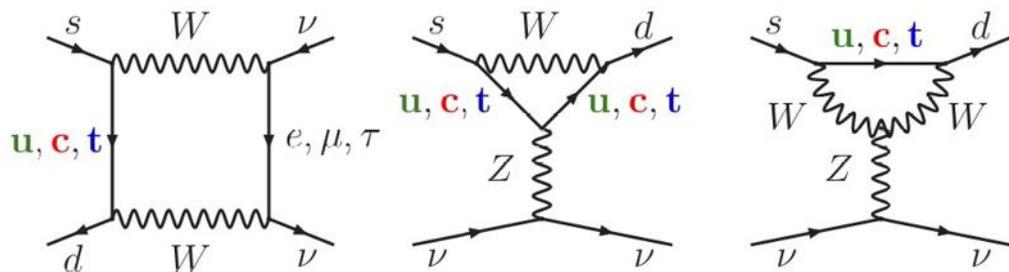
GRUPPO I INFN NAPOLI

12/01/2023



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI  
FEDERICO II

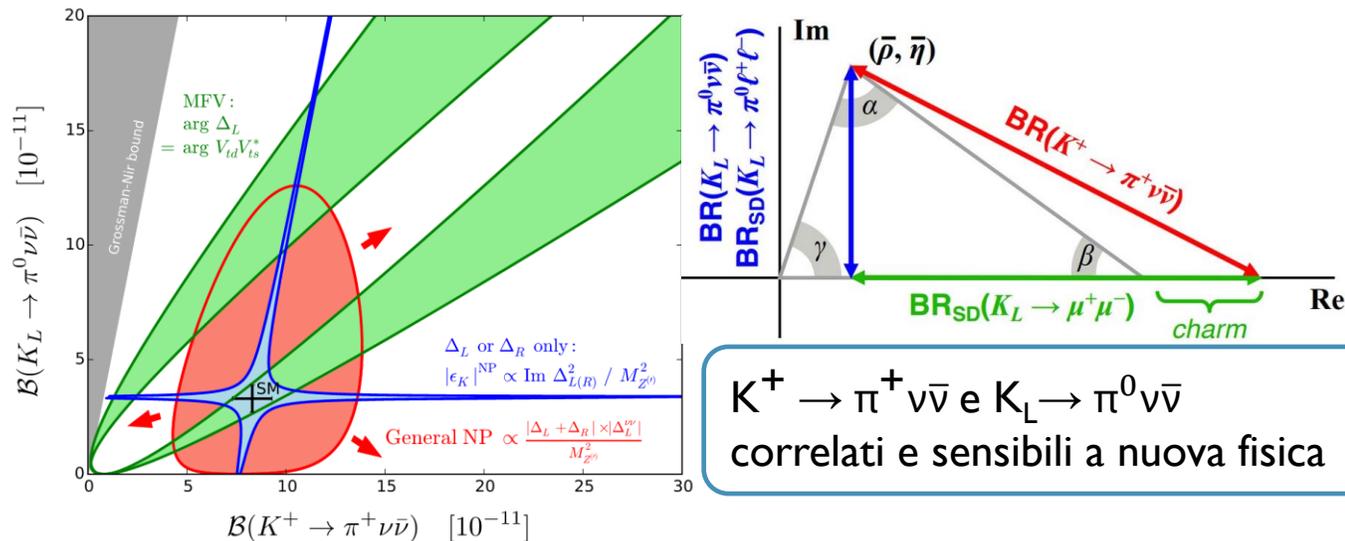




- FCNC  $s \rightarrow d$ , soppresso da CKM
- *Golden channel*, dominato da corta distanza
- Fattore di forma adronico estratto da  $K_{\ell 3}$
- Incertezza teorica sostanzialmente da CKM

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})_{SM} = (8.4 \pm 1.0) \times 10^{-11}$$

JHEP 11 (2015) 033



### Risultati (dati 2016-2018)

- Single Event Sensitivity:  $(0.839 \pm 0.053_{\text{sys}}) \times 10^{-11}$

- Eventi SM attesi:  $10.01 \pm 0.42_{\text{sys}} \pm 1.19_{\text{ext}}$

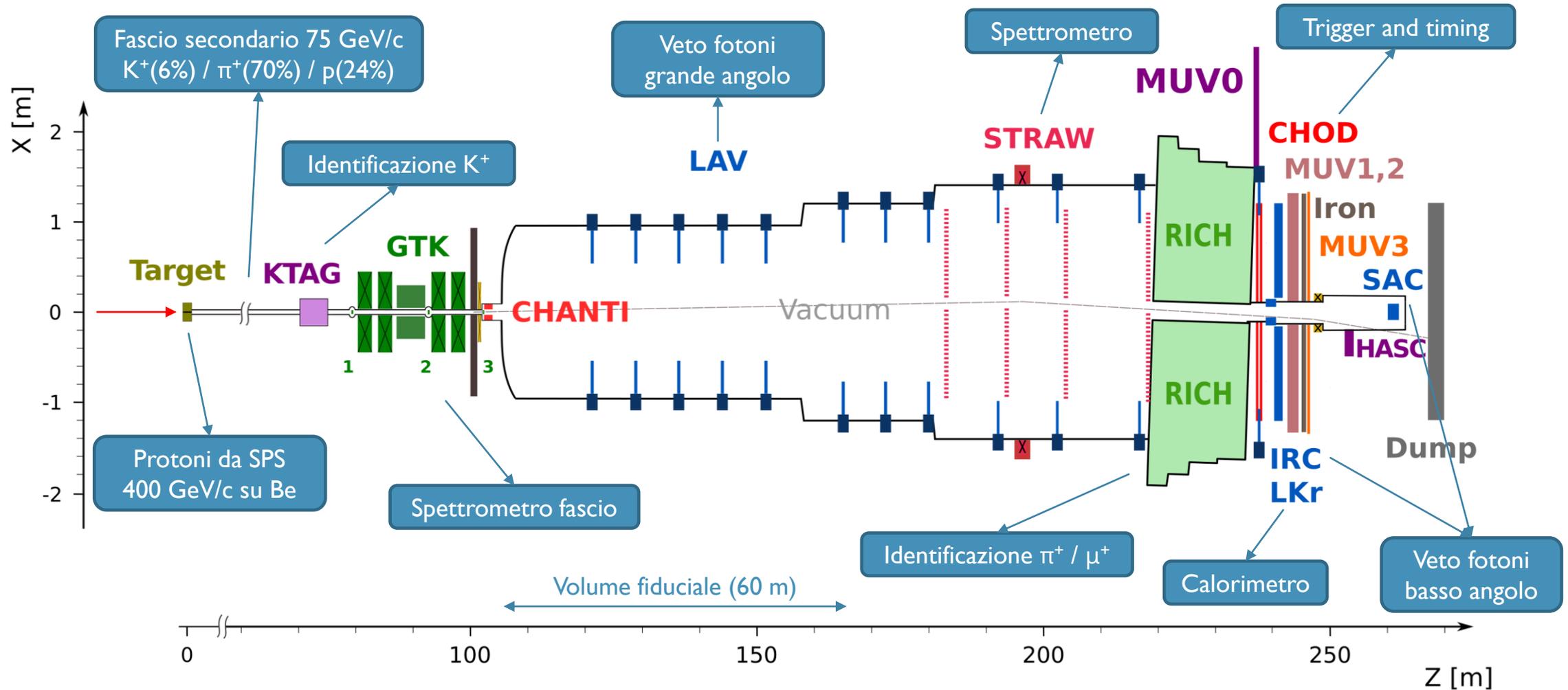
- Eventi fondo attesi:  $7.03^{+1.05}_{-0.82}$

JHEP 06 (2021) 093

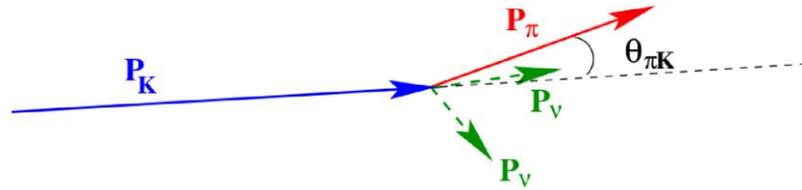
- Eventi osservati: 20

- $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (10.6^{+4.0}_{-3.8}|_{\text{stat}} \pm 0.9_{\text{sys}}) \times 10^{-11}$

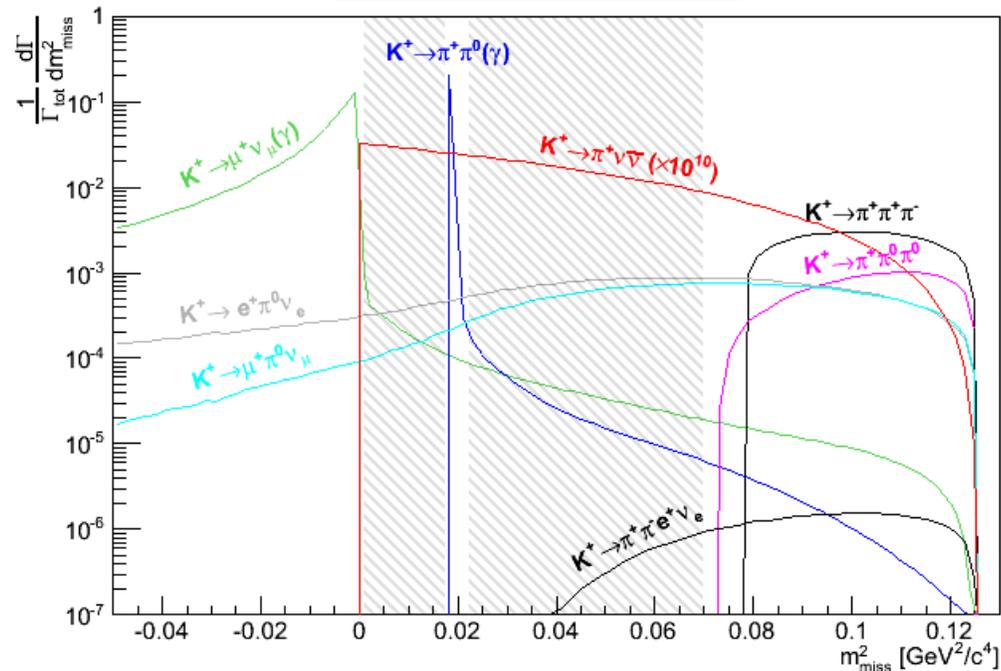
# APPARATO SPERIMENTALE



# STRATEGIA DI ANALISI



$$m_{miss}^2 = (P_K - P_\pi)^2$$



## Selezione

- Ricostruzione tracce  $K^+$ ,  $\pi^+$
- Associazione tracce, ricostruzione vertice
- Identificazione  $\pi^+$ , reiezione  $\mu^+$
- Reiezione eventi multi-traccia, veto fotoni
- Cinematica ( $m_{miss}^2$ ,  $P_\pi$ )

## Performance

- Soppressione cinematica  $O(10^4)$
- Reiezione muoni  $O(10^7)$
- Reiezione  $\pi^0$   $O(10^7)$
- Risoluzione temporale  $O(100 \text{ ps})$

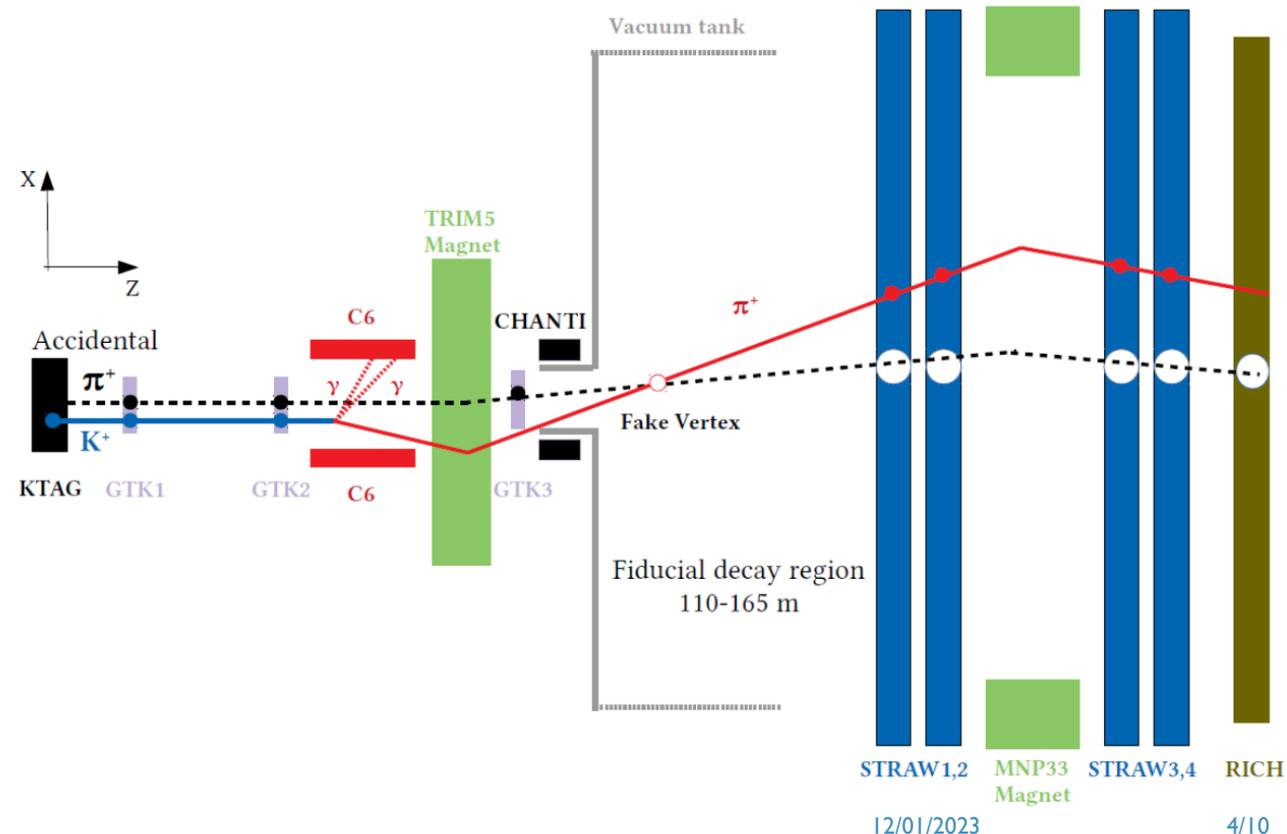
## Analisi

- Range di momento:  $15 < p_\pi < 45 \text{ GeV}/c$
- Regioni di segnale "blinded" durante l'analisi
- Ottimizzazione in categorie (hardware e momento)

# INTENSITÀ

Alta intensità necessaria per raccogliere  $O(10^{12})$  decadimenti  $K^+$   
In Run2, aumentata da 60% a 100% del nominale (750 MHz)  
Attività accidentale del fascio deteriora eventi

- **Upstream background:** maggiore fondo
- Pioni prodotti a monte del **volume fiduciale**
  - Decadimenti K a monte
  - Interazione del fascio con materiale dello spettrometro
- **Falsa associazione** del pione a valle con una traccia di pileup a monte in tempo
- Nell'associazione bisogna distinguere tracce di fondo dal K vero!



# ASSOCIAZIONE K/ $\pi$

$T_{\text{track}} - T_{\pi}$

$\Delta T_1$

$\Delta T_2$

$\Delta T_N$

Closest Distance  
of Approach

$CDA_1$

$CDA_2$

$CDA_N$

Tracce a monte (fascio)



$\pi^+$  a valle



# ASSOCIAZIONE K/ $\pi$

$$T_{\text{track}} - T_{\pi}$$

$$\Delta T_1$$

$$\Delta T_2$$

$$\Delta T_N$$

Closest Distance  
of Approach

$$CDA_1$$

$$CDA_2$$

$$CDA_N$$

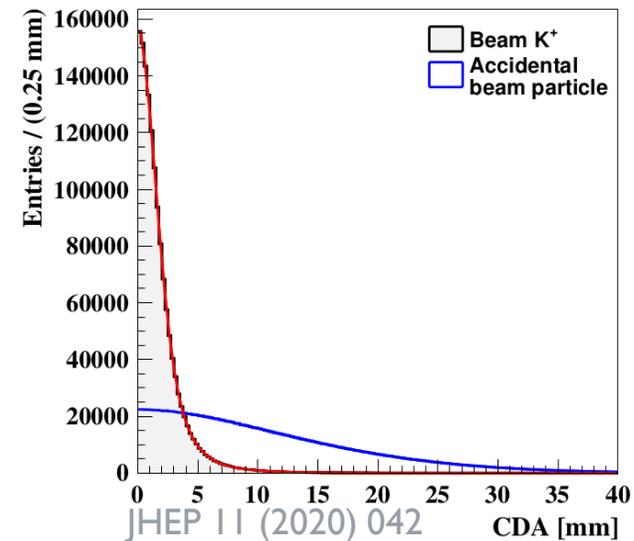
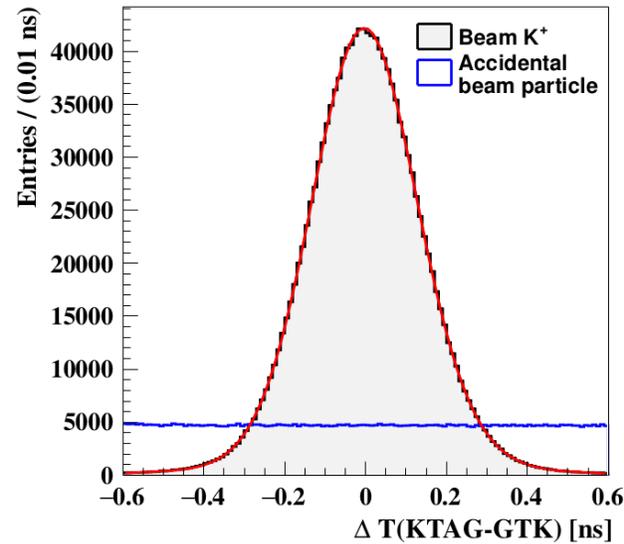
Tracce a monte (fascio)



$\pi^+$  a valle



## I. Scelta della traccia



# ASSOCIAZIONE K/ $\pi$

$$T_{\text{track}} - T_{\pi}$$

$$\Delta T_1$$

$$\Delta T_2$$

$$\Delta T_N$$

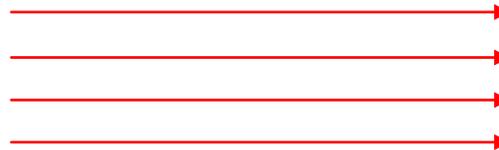
Closest Distance  
of Approach

$$CDA_1$$

$$CDA_2$$

$$CDA_N$$

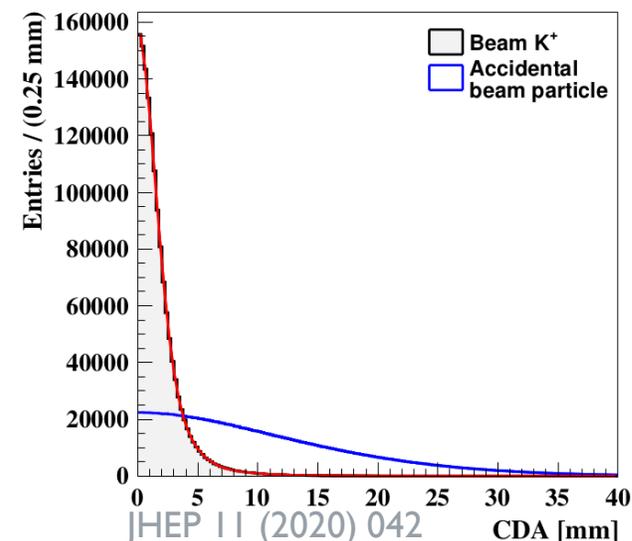
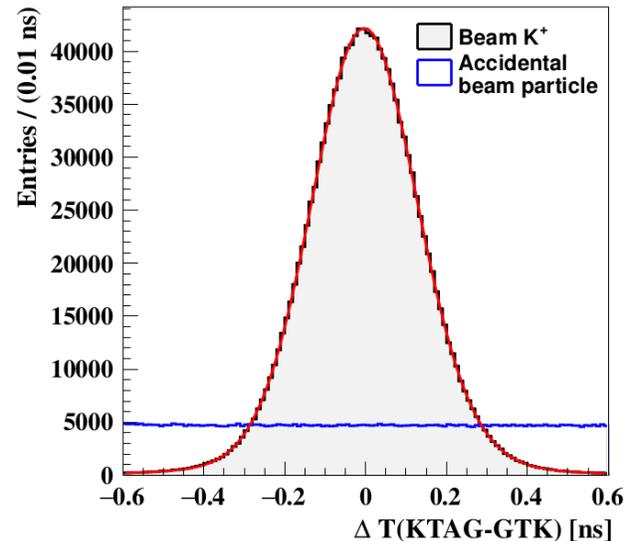
Tracce a monte (fascio)



$\pi^+$  a valle



## I. Scelta della traccia



## Possibili esiti:

- Associazione efficiente  
K vero presente,  
scelta traccia giusta
- Mistag con K  
K vero presente,  
scelta traccia sbagliata
- Mistag senza K  
K vero assente

# ASSOCIAZIONE K/ $\pi$

$$T_{\text{track}} - T_{\pi}$$

$$\Delta T_1$$

$$\Delta T_2$$

$$\Delta T_N$$

Closest Distance  
of Approach

$$CDA_1$$

$$CDA_2$$

$$CDA_N$$

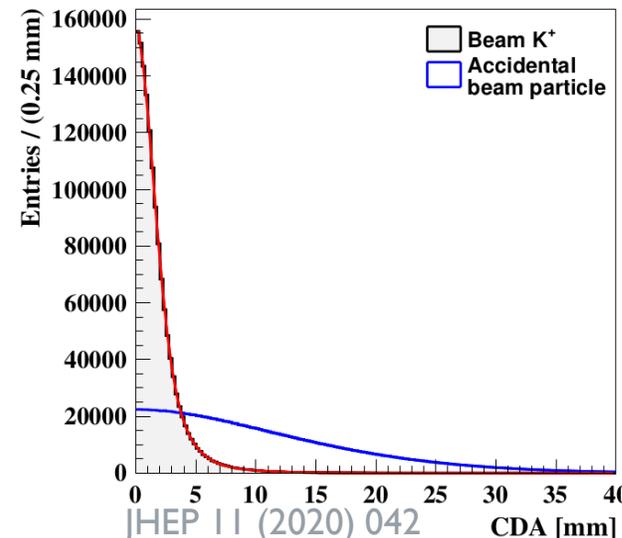
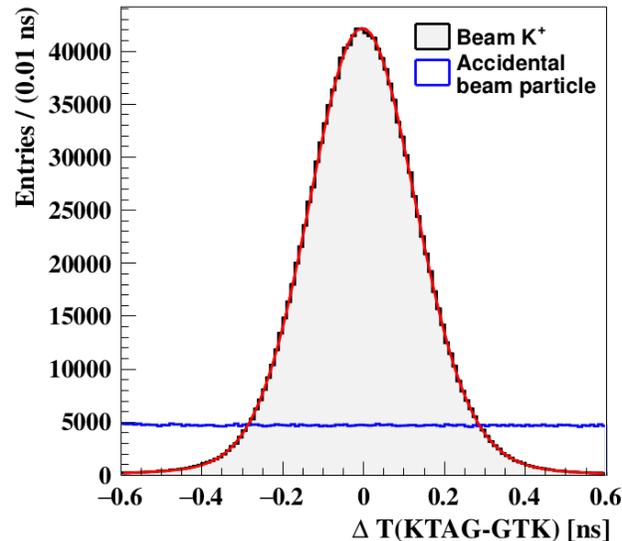
Tracce a monte (fascio)



$\pi^+$  a valle



## 1. Scelta della traccia



Possibili esiti:

- Associazione efficiente  
K vero presente,  
scelta traccia giusta
- Mistag con K  
K vero presente,  
scelta traccia sbagliata
- Mistag senza K  
K vero assente

## 2. Reiezione mistag

Controllo "qualità" associazione, scartando l'evento se è "cattiva"

# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO I. SCELTA DELLA TRACCIA

# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO I. SCELTA DELLA TRACCIA

Ad ogni traccia, calcolo likelihood di essere K vero, tramite **teorema di Bayes**

$$L_i = P(K|\gamma_i, N) = \frac{P(\gamma_i|K)P(K|N)}{P(\gamma_i|K)P(K|N) + P(\gamma_i|\neg K)(1 - P(K|N))}$$

# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO I. SCELTA DELLA TRACCIA

Ad ogni traccia, calcolo likelihood di essere K vero, tramite **teorema di Bayes**

$$L_i = P(K|\gamma_i, N) = \frac{P(\gamma_i|K)P(K|N)}{P(\gamma_i|K)P(K|N) + P(\gamma_i|\neg K)(1 - P(K|N))}$$

- $\gamma_i = (\Delta T_i, CDA_i)$

# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO I. SCELTA DELLA TRACCIA

Ad ogni traccia, calcolo likelihood di essere K vero, tramite **teorema di Bayes**

$$L_i = P(K|\gamma_i, N) = \frac{P(\gamma_i|K)P(K|N)}{P(\gamma_i|K)P(K|N) + P(\gamma_i|\neg K)(1 - P(K|N))}$$

- $\gamma_i = (\Delta T_i, CDA_i)$
- $P(\gamma_i|K)$  e  $P(\gamma_i|\neg K)$  descrivono l'associazione di K veri e di tracce di fascio accidentali ai  $\pi^+$  a valle

# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO I. SCELTA DELLA TRACCIA

Ad ogni traccia, calcolo likelihood di essere K vero, tramite **teorema di Bayes**

$$L_i = P(K|\gamma_i, N) = \frac{P(\gamma_i|K)P(K|N)}{P(\gamma_i|K)P(K|N) + P(\gamma_i|\neg K)(1 - P(K|N))}$$

- $\gamma_i = (\Delta T_i, CDA_i)$
- $P(\gamma_i|K)$  e  $P(\gamma_i|\neg K)$  descrivono l'associazione di K veri e di tracce di fascio accidentali ai  $\pi^+$  a valle
- Il calcolo tiene conto del numero totale di tracce di fascio nell'evento ( $\sim$  intensità)

# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO I. SCELTA DELLA TRACCIA

Ad ogni traccia, calcolo likelihood di essere K vero, tramite **teorema di Bayes**

$$L_i = P(K|\gamma_i, N) = \frac{P(\gamma_i|K)P(K|N)}{P(\gamma_i|K)P(K|N) + P(\gamma_i|\neg K)(1 - P(K|N))}$$

- $\gamma_i = (\Delta T_i, CDA_i)$
- $P(\gamma_i|K)$  e  $P(\gamma_i|\neg K)$  descrivono l'associazione di K veri e di tracce di fascio accidentali ai  $\pi^+$  a valle
- Il calcolo tiene conto del numero totale di tracce di fascio nell'evento ( $\sim$  intensità)
- $P(K|N)$  è la probabilità a priori di scegliere il K vero in un evento a N tracce ( $\sim 1/N$ )

# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO I. SCELTA DELLA TRACCIA

Ad ogni traccia, calcolo likelihood di essere K vero, tramite **teorema di Bayes**

$$L_i = P(K|\gamma_i, N) = \frac{P(\gamma_i|K)P(K|N)}{P(\gamma_i|K)P(K|N) + P(\gamma_i|\neg K)(1 - P(K|N))}$$

- $\gamma_i = (\Delta T_i, CDA_i)$
- $P(\gamma_i|K)$  e  $P(\gamma_i|\neg K)$  descrivono l'associazione di K veri e di tracce di fascio accidentali ai  $\pi^+$  a valle
- Il calcolo tiene conto del numero totale di tracce di fascio nell'evento ( $\sim$  intensità)
- $P(K|N)$  è la probabilità a priori di scegliere il K vero in un evento a N tracce ( $\sim 1/N$ )

# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO I. SCELTA DELLA TRACCIA

Ad ogni traccia, calcolo likelihood di essere K vero, tramite **teorema di Bayes**

$$L_i = P(K|\gamma_i, N) = \frac{P(\gamma_i|K)P(K|N)}{P(\gamma_i|K)P(K|N) + P(\gamma_i|\neg K)(1 - P(K|N))}$$

- $\gamma_i = (\Delta T_i, CDA_i)$
- $P(\gamma_i|K)$  e  $P(\gamma_i|\neg K)$  descrivono l'associazione di K veri e di tracce di fascio accidentali ai  $\pi^+$  a valle
- Il calcolo tiene conto del numero totale di tracce di fascio nell'evento ( $\sim$  intensità)
- $P(K|N)$  è la probabilità a priori di scegliere il K vero in un evento a N tracce ( $\sim 1/N$ )

Traccia scelta: likelihood massima,  $L_1$ .

Test d'ipotesi  
"accidentale"  
vs  
"K vero"

Qualità dell'associazione

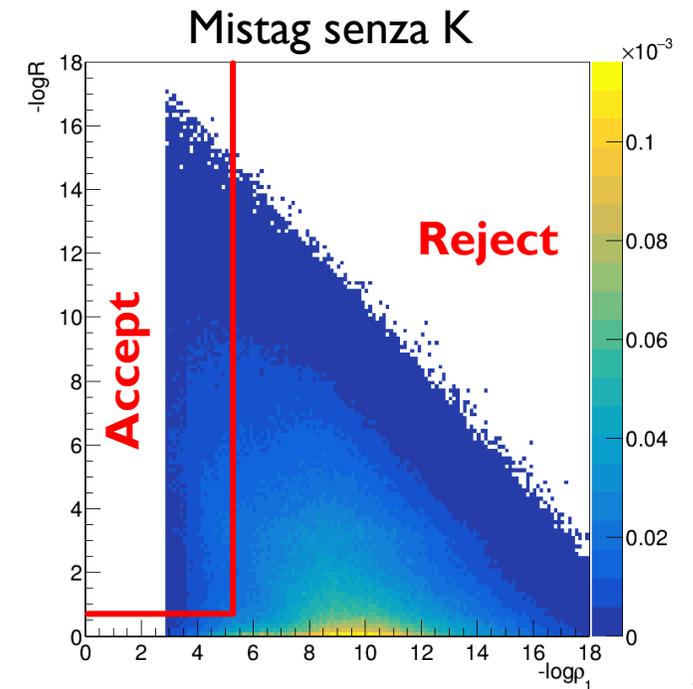
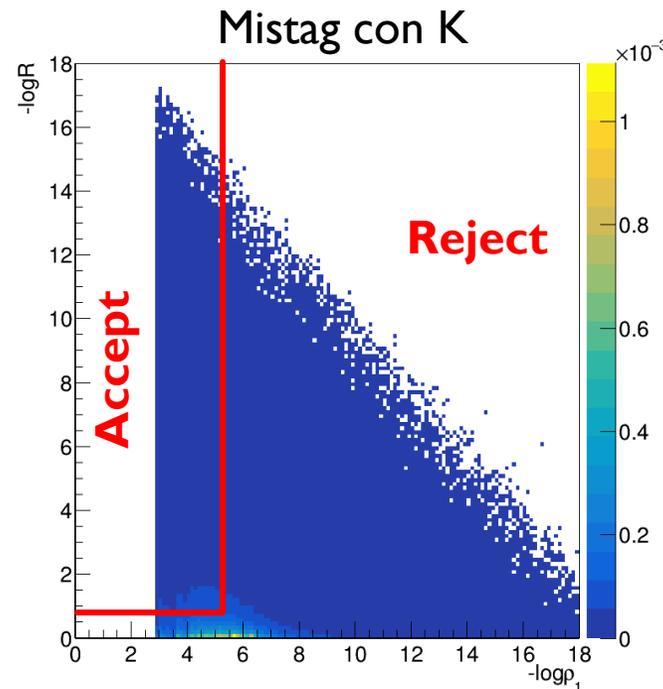
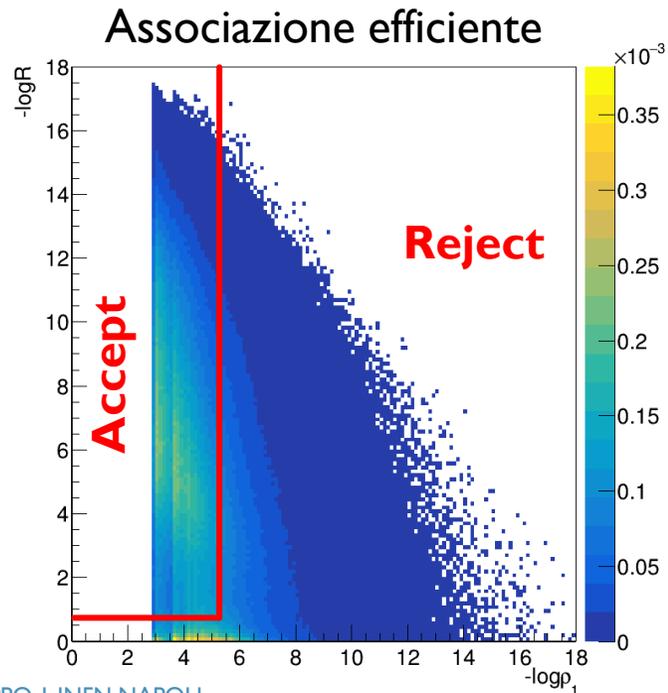
$$-\log \rho_1 = \log \frac{1 - L_1}{L_1},$$

$$-\log R = \frac{L_1(1 - L_2)}{L_2(1 - L_1)}$$

Test d'ipotesi  
"2: K & 1:  $\neg K$ "  
vs  
"1: K & 2:  $\neg K$ "

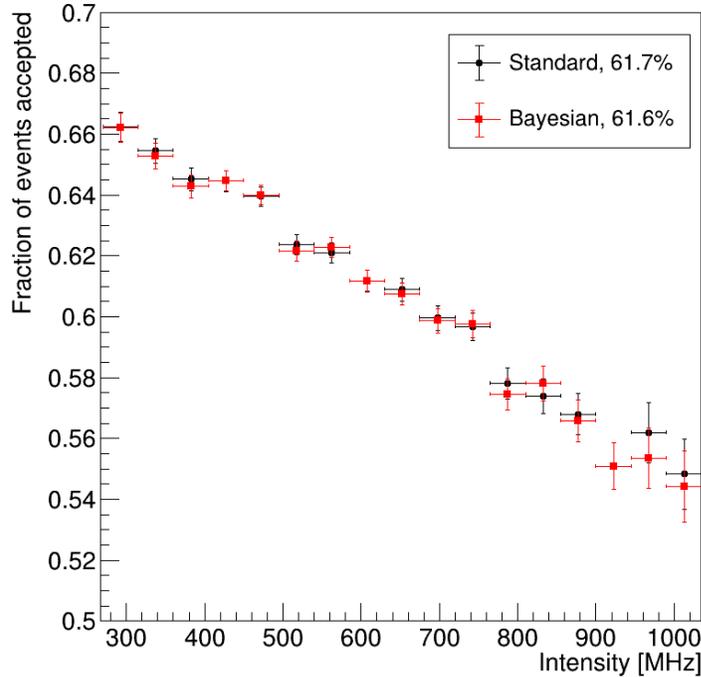
# ALGORITMO DI ASSOCIAZIONE BAYESIANO

## 2. REIEZIONE MISTAG

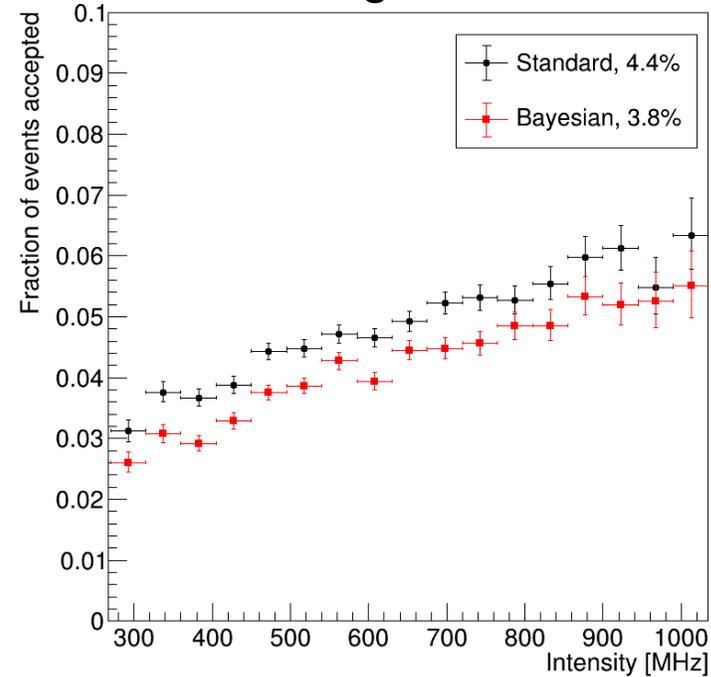


# PERFORMANCE SU DATI 2021

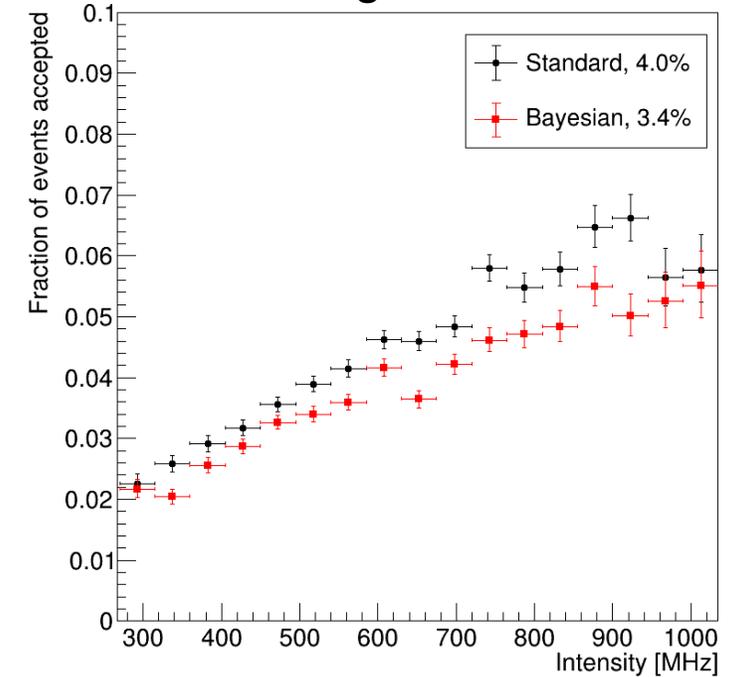
## Associazione efficiente



## Mistag con K



## Mistag senza K

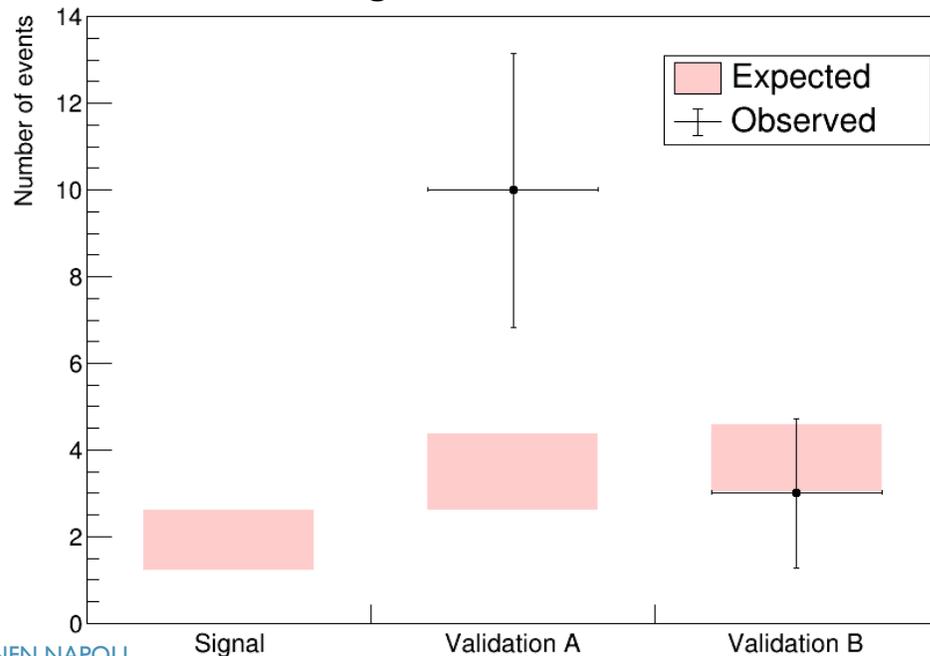


- Andamento generale: performance peggiori con intensità
- Standard: algoritmo usato nell'analisi Run I
- Algoritmo bayesiano più resiliente ad alta intensità

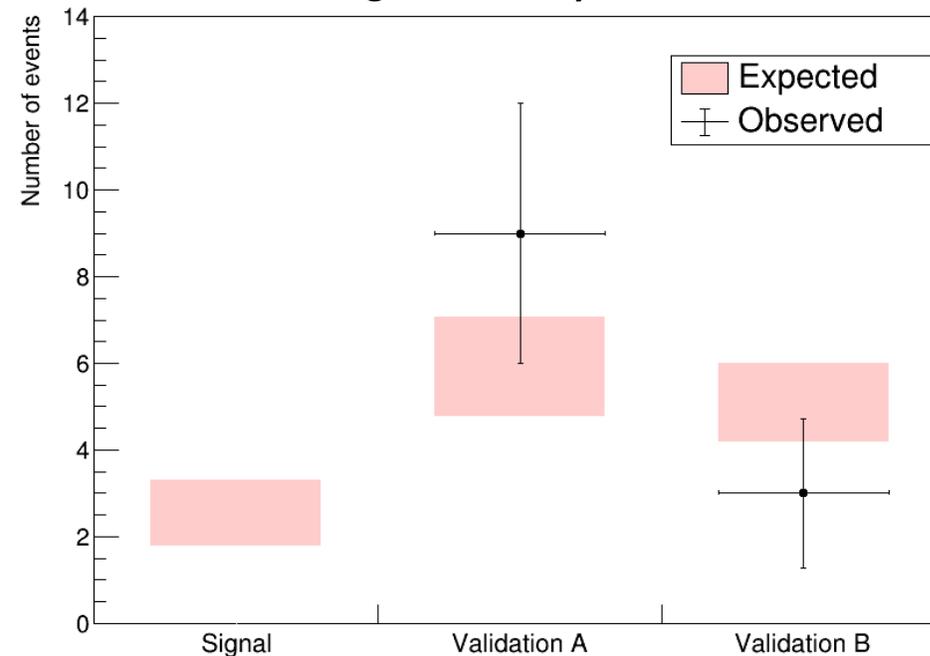
# UPSTREAM BACKGROUND

- Stima dell'upstream background in dati 2021: richiesta procedura completamente diversa per l'algorithmo bayesiano
- Regione di segnale blinded
- Campioni di validazione
- Work in progress...

Algorithmo standard



Algorithmo bayesiano



# CONCLUSIONE

- Algoritmo di associazione K/ $\pi$  nella misura di  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu})$
- Studio di un possibile algoritmo alternativo per Run2
- Performance sono simili o migliori dell'algoritmo standard
- Validazione dell'algoritmo nell'analisi e impatto sul fondo da finalizzare

# CONCLUSIONE

- Algoritmo di associazione K/ $\pi$  nella misura di  $BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu\bar{\nu})$
- Studio di un possibile algoritmo alternativo per Run2
- Performance sono simili o migliori dell'algoritmo standard
- Validazione dell'algoritmo nell'analisi e impatto sul fondo da finalizzare

GRAZIE!



# BACKUP



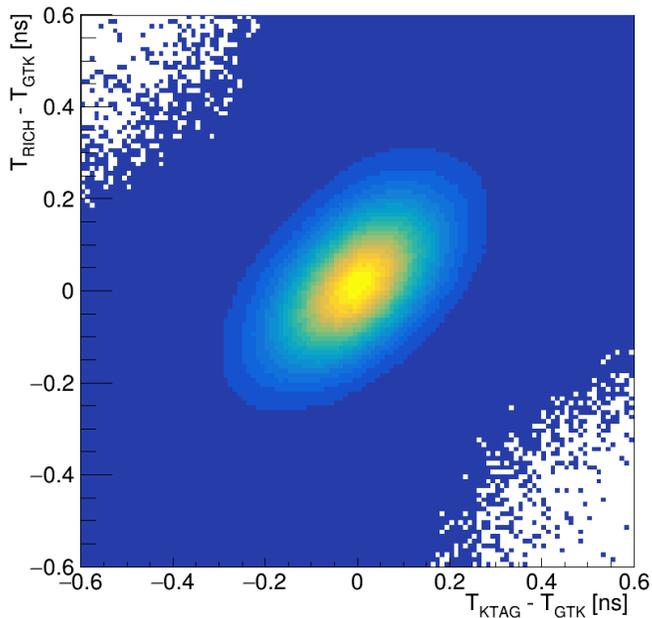
# TRACK SELECTION, $\Delta T$

$$\chi^2 < 50 \text{ and } \chi^2_{\text{event}} < 20$$

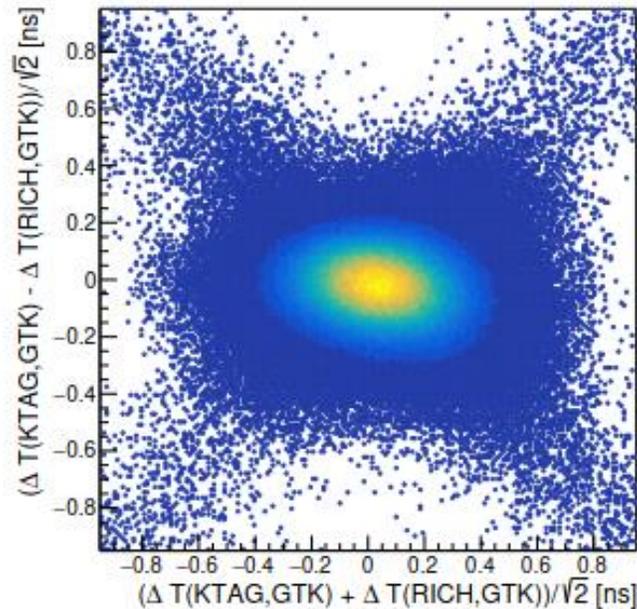
$$\chi^2_{\text{event}} = \left( \frac{P_K - P_{\text{beam}}}{\sigma_P} \right)^2 + \left( \frac{X' - X'_{\text{beam}}}{\sigma_{\theta_X}} \right)^2 + \left( \frac{Y' - Y'_{\text{beam}}}{\sigma_{\theta_Y}} \right)^2$$

$$\Delta T_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}} [\Delta T(\text{KTAG, GTK}) \pm \Delta T(\text{RICH, GTK})]$$

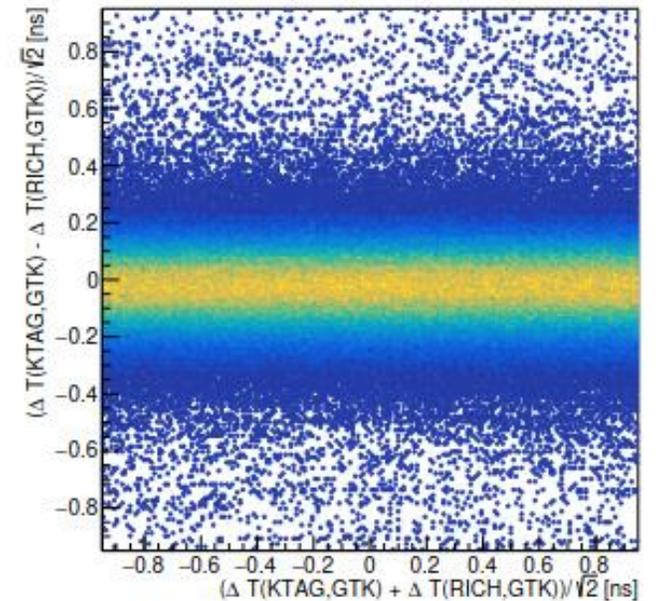
$\Delta T(\text{KTAG, GTK})$  vs  $\Delta T(\text{RICH, GTK})$



$\Delta T$ . (kaon) vs  $\Delta T_{+}$  (kaon)



$\Delta T$ . (pileup) vs  $\Delta T_{+}$  (pileup)

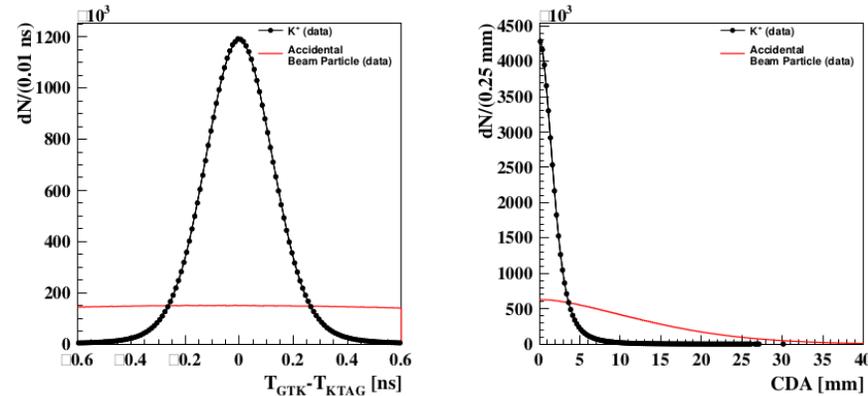


# STANDARD ALGORITHM

## 1. Selection of good GTK tracks

- $|\Delta T(\text{GTK}, \text{KTAG})| < 0.6 \text{ ns}$
- $\chi^2_{\text{GTK}} < 50$
- $\chi^2_{\text{event}} < 20$

## 2. Definition of match



$$p(CDA) = \frac{1}{N_{CDA}^{Norm}} \left[ \int_0^{CDA} f(CDA') dCDA' \right];$$

$$p(\Delta T) = \frac{1}{N_{\Delta T}^{Norm}} \left[ \int_{-\Delta T}^{+\Delta T} f(\Delta T') d\Delta T' \right];$$

$$D_{CDA}^K = 1 - p_{CDA}^K$$

$$D_{CDA}^{PU} = 1 - p_{CDA}^{PU}$$

$$D_{\Delta T}^K = 1 - p_{\Delta T}^K$$

$$D_{\Delta T}^{PU} = 1 - p_{\Delta T}^{PU}$$

Match: largest  $D_K = D_{CDA}^K \times D_{\Delta T}^K$

## 3. Pileup treatment

- Define similar candidates based on  $(D_K)_{\text{best}} - D_K$
- Compare best and second best candidates based on  $D_{CDA}^K / D_{CDA}^{PU}$  and  $D_{\Delta T}^K / D_{\Delta T}^{PU}$
- Reject the event if they are too similar

### Matching quality cut

- Defined in the plane  $D_K(\text{KTAG})$  vs  $D_K(\text{RICH})$
- Uses only information of best track

# UPSTREAM BACKGROUND ESTIMATION

$P(\text{passes selection} \mid \text{bkg}) =$

$$P(\text{passes everything else} \mid \text{bkg}) \times P(\text{CDA} < 4\text{mm} \mid \text{bkg}) \times P(\text{good K}/\pi \text{ matching quality} \mid \text{bkg} \ \& \ \text{CDA} < 4\text{mm})$$

Data driven

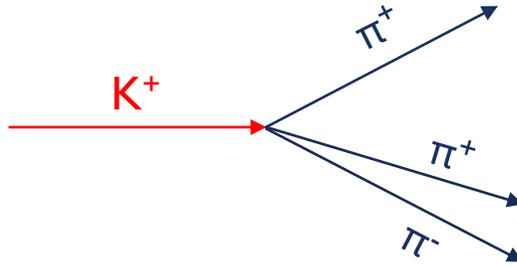
From model of CDA  
distribution

From simulation:  
different simulation for  
different algorithms

## Validation samples

- Built to only contain upstream background events
- Can apply CDA cut and K/ $\pi$  matching quality cut to check observed events

# $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$ : BENCHMARKING THE MATCHING



All three  $\pi$ 's can be reconstructed downstream. Therefore  $\vec{p}_K = \sum \vec{p}_\pi$   
This also allows backtracking of position of K

"True K" is the track that minimizes:

$$\chi_{true}^2 = \frac{(p_{GTK} - p_{3\pi})^2}{\sigma_0^2} + \frac{(\theta_{x,GTK} - \theta_{x,3\pi})^2}{\sigma_1^2} + \frac{(\theta_{y,GTK} - \theta_{y,3\pi})^2}{\sigma_2^2} + \frac{(x_{GTK}^{GTK3} - x_{3\pi}^{GTK3})^2}{\sigma_3^2} + \frac{(y_{GTK}^{GTK3} - y_{3\pi}^{GTK3})^2}{\sigma_4^2}.$$

Then, pick one  $\pi^+$  at random and compare the K/ $\pi$  matching algorithm result with the "true K"