A GPU-based real time trigger for rare kaon decays at NA62

Elena Graverini

Università di Pisa

1343

Introduzione

- Introduzione di **GPU** in applicazioni **real-time** in Fisica delle Particelle
- Tecnologia scalabile, economica e in costante sviluppo

In questa tesi:

- Studio ed implementazione di un **trigger** in tempo reale per **NA62**
- Per la prima volta: prototipo utilizzabile in presa dati

Validazione e progetto con simulazioni Montecarlo $\Longrightarrow$ **Implementazione su GPU e test**

1. **Introduzione e contesto**
2. **Studio di fattibilità tramite simulazioni Montecarlo**
   - Definizione dell'obiettivo
   - Sviluppo di un algoritmo di ricostruzione eventi per il RICH
   - Analisi dei fattori di reiezione
   - Risultati dello studio e prestazioni ottimali
3. **Sviluppo dell'algoritmo di trigger su GPU**
   - Fit di anelli Čerenkov multipli
   - Architettura del trigger
4. **Test del trigger e conclusioni**
   - Efficienza e tempo di esecuzione
   - Prospettive e conclusioni

1. **Introduzione e contesto**

2. **Studio di fattibilità tramite simulazioni Montecarlo**
   - Definizione dell'obiettivo
   - Sviluppo di un algoritmo di ricostruzione eventi per il RICH
   - Analisi dei fattori di reiezione
   - Risultati dello studio e prestazioni ottimali

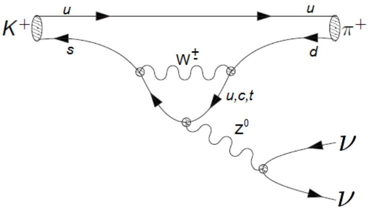
3. **Sviluppo dell'algoritmo di trigger su GPU**
   - Fit di anelli Cerenkov multipli
   - Architettura del trigger

4. **Test del trigger e conclusioni**
   - Efficienza e tempo di esecuzione
   - Prospettive e conclusioni

L'esperimento NA62: scopo

Il decadimento $K^+ \to \pi^+ \nu \bar{\nu}$:

- FCNC soppresso dal meccanismo GIM
- contribuiscono solo diagrammi a loop:
  - Z "penguin"
  - W box



Accurata previsione dal Modello Standard:

$$BR\left(K^+ \to \pi^+ \nu \bar{\nu}\right) = \left(7.81^{+0.80}_{-0.71} \pm 0.29\right) \times 10^{-11}$$

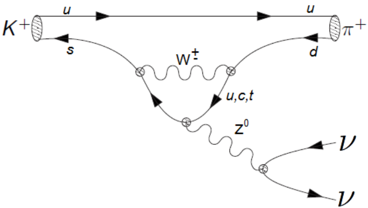
NA62: $\mathcal{O}(100)$ eventi con S/B 10:1

- test stringente sul Modello Standard: **nuova fisica**?
- SM: misura indipendente del parametro V_{td} della matrice CKM

L'esperimento NA62: scopo

Il decadimento $K^+ \to \pi^+ \nu \bar{\nu}$:

- FCNC soppresso dal meccanismo GIM
- contribuiscono solo diagrammi a loop:
  - Z "penguin"
  - W box



Accurata previsione dal Modello Standard: errore teorico $< 4\%$

$$BR\left(K^+ \to \pi^+ \nu \bar{\nu}\right) = \left(7.81^{+0.80}_{-0.71} \pm 0.29\right) \times 10^{-11}$$

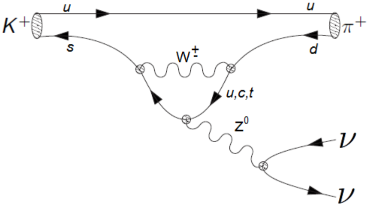
NA62: $\mathcal{O}(100)$ eventi con S/B 10:1

- test stringente sul Modello Standard: **nuova fisica**?
- SM: misura indipendente del parametro V_{td} della matrice CKM

L'esperimento NA62: scopo

Il decadimento $K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$:

- FCNC soppresso dal meccanismo GIM
- contribuiscono solo diagrammi a loop:
  - Z "penguin"
  - W box



Accurata previsione dal Modello Standard: errore teorico $< 4\%$

$$BR\left(K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}\right) = \left(7.81^{+0.80}_{-0.71} \pm 0.29\right) \times 10^{-11}$$

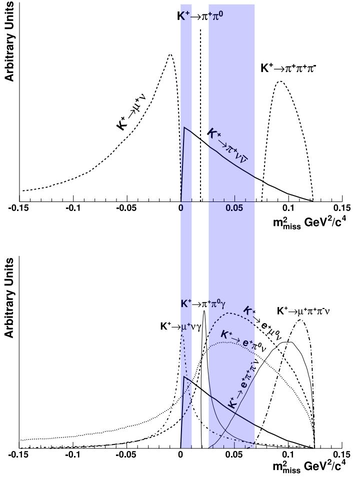
NA62: $\mathcal{O}(100)$ eventi con S/B 10:1

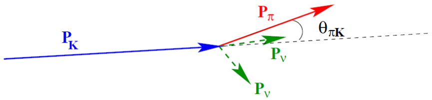
- test stringente sul Modello Standard: **nuova fisica**?
- SM: misura indipendente del parametro V_{td} della matrice CKM

NA62 e gli esperimenti precedenti

- Precedenti misure: K a riposo
- E949 (Brookhaven National Lab): 7 candidati (1.4 fondo)
  - $BR\left(K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}\right) = \left(1.73^{+1.15}_{-1.05}\right) \times 10^{-10}$ (2009)
- **NA62**: K ad alta energia che decadono in volo
  - CERN North Area n°62
  - presa dati: 2014–2016 $\longrightarrow 10^{13}$ decadimenti
  - fondo / segnale $\simeq 10^{10}$

Principali fondi e definizione del segnale





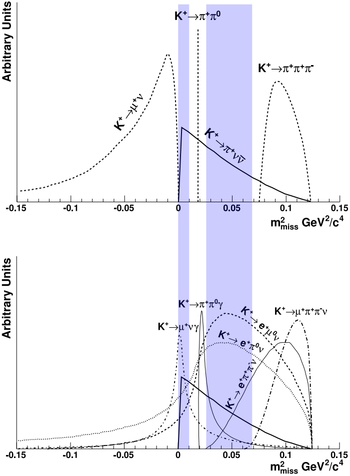
- misura di K^+ e π^+
- massa mancante $\rightarrow$ regioni fiduciali

$$m^2_{miss} \equiv (P_K - P_\pi)^2$$

Principali fondi:

Canale	BR	Strategia di reiezione
$\mu^+\nu_\mu$	63%	cinematica + μ PID
$\pi^+\pi^0$	21%	cinematica + γ veto
$\pi^+\pi^+\pi^-$	6%	cinematica + $\pi^\pm$ veto
$\pi^+\pi^0\pi^0$	2%	cinematica + γ veto
$\pi^0 e^+\nu_e$	5%	e PID + γ veto
$\pi^0\mu^+\nu_\mu$	3%	μ PID + γ veto

Principali fondi e definizione del segnale



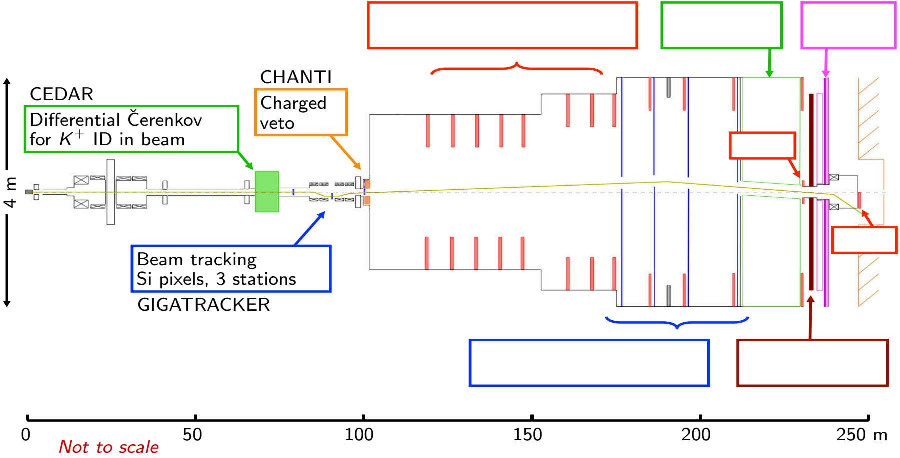
Definizione del *segnale*:

- $\mathbf{K^+ \to \pi^+ \nu \bar{\nu}}$
- **impulso**: $15 \leq P_\pi \leq 35$ GeV$/c$
  - separazione π–μ nel RICH
  - 40 GeV$/c$ agli altri prodotti per assicurarne la rivelazione
- **vertice**: $105 \leq z \leq 165$ m
- **due regioni** di massa mancante che escludono $K^+ \to \pi^+ \pi^0$

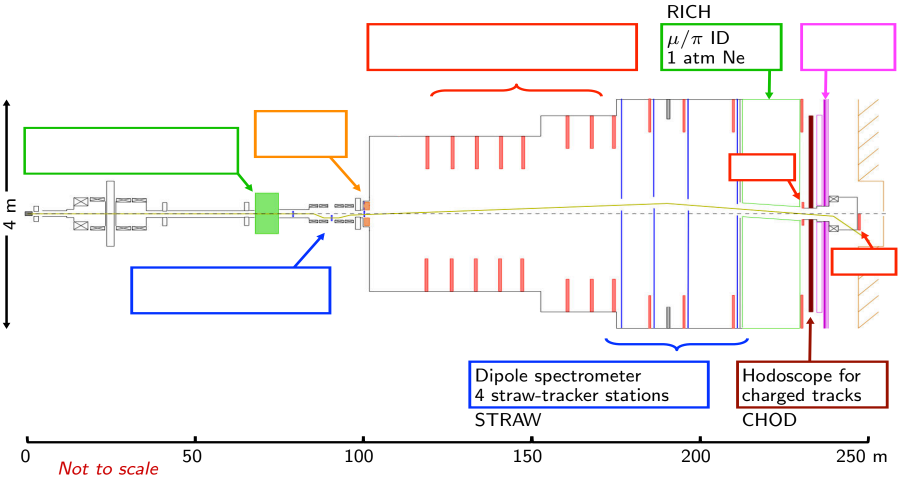
L'esperimento NA62: apparato

Fascio: 750 MHz $P_{beam} = (75 \pm 1)$ GeV$/c$

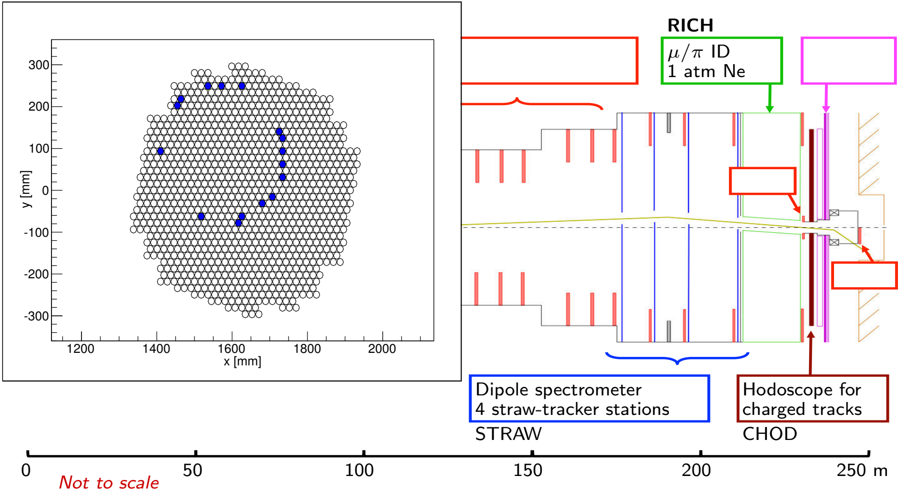
70% π^+ 23% p 6% K^+



L'esperimento NA62: apparato

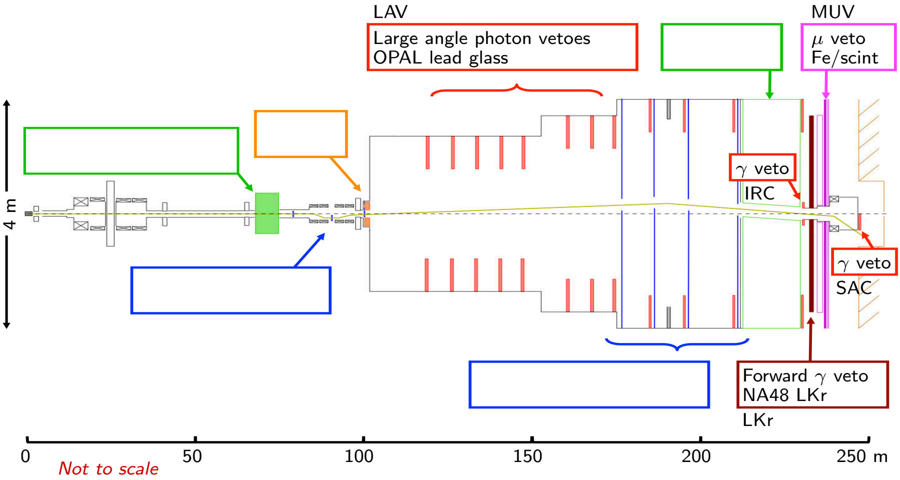


L'esperimento NA62: apparato



L'esperimento NA62: apparato

Sistema di veto per γ e μ



Sistema di trigger ed acquisizione dati

Sistema **unificato** di trigger ed acquisizione dati (TEL62).
Trigger: da $\mathcal{O}$(10 MHz) a $\mathcal{O}$(10 kHz)

L0: implementato su hardware. Latenza massima di 1 ms (buffer)

L1: software. Singoli rivelatori. Latenza $\geq$ 1 s

L2: software. Ricostruzione eventi.

Trigger online (L0)

Odoscopio	almeno 1 traccia
RICH	$5 \leq$ hits ≤ 32
μ Veto	nessun hit
Calorimetro	massimo 1 cluster

Composizione output:

$K^+ \to \pi^+\pi^0$	63%
$K^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-$	20%
$K^+ \to \pi^0 e^+ \nu_e$	10%
Altro	7%
Totale	< 1 MHz

Sistema di trigger ed acquisizione dati

Sistema **unificato** di trigger ed acquisizione dati (TEL62).
Trigger: da $\mathcal{O}$(10 MHz) a $\mathcal{O}$(10 kHz)

L0: implementato su hardware. Latenza massima di 1 ms (buffer)

L1: software. Singoli rivelatori. Latenza $\geq$ 1 s

L2: software. Ricostruzione eventi.

Trigger online (L0)

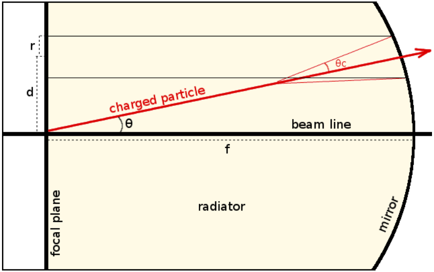
Odoscopio	almeno 1 traccia
RICH	$5 \leq$ hits ≤ 32
μ **Veto**	nessun hit
Calorimetro	massimo 1 cluster

Composizione output:

$K^+ \to \pi^+\pi^0$	63%
$K^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-$	20%
$K^+ \to \pi^0 e^+ \nu_e$	10%
Altro	7%
Totale	$<$ 1 MHz

Utilizzo real-time del RICH

- Risoluzione temporale $\leq$ 100 ps
- Partecipa al L0 con selezione di molteplicità
- Usare informazioni più raffinate?

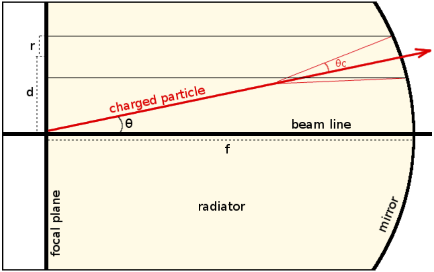


Anelli Cherenkov in tempo reale?

- velocità: $\cos\theta_c = 1/(n\,\beta)$
- direzione di volo: $\theta = \tan(d/f)$
- assunzione sul tipo di particella $(\pi^+) \Rightarrow$ impulso
- condizioni di trigger **selettive**

Utilizzo real-time del RICH

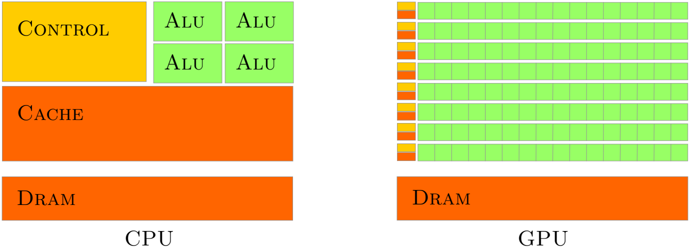
- Risoluzione temporale $\leq$ 100 ps
- Partecipa al L0 con selezione di molteplicità
- Usare informazioni più raffinate?



Anelli Cherenkov in tempo reale?

- velocità: $\cos\theta_c = 1/(n\,\beta)$
- direzione di volo: $\theta = \tan(d/f)$
- assunzione sul tipo di particella $(\pi^+) \Rightarrow$ impulso
- condizioni di trigger **selettive**

Processori grafici (GPU)



- architettura parallela (threads, blocks) e scalabile
- mercato della computer grafica ⇒ continuo sviluppo
- **GPGPU** – *General Purpose computing on GPUs*

Le GPU come trigger

Fisica delle particelle: parallelizzazione **intrinseca**

- **eventi** computazionalmente indipendenti
- geometria dei rivelatori
  - matrice di PM del RICH

Algoritmi: parallelizzazione **esplicita**

Possibile ottenere latenze minori di 1 ms in modo semplice ed **economico**!

$\Downarrow$

Utilizzo di GPU **in tempo reale**:

alto *rate* $\Leftrightarrow$ alto *throughput*

1 Introduzione e contesto

2 **Studio di fattibilità tramite simulazioni Montecarlo**
- Definizione dell'obiettivo
- Sviluppo di un algoritmo di ricostruzione eventi per il RICH
- Analisi dei fattori di reiezione
- Risultati dello studio e prestazioni ottimali

3 Sviluppo dell'algoritmo di trigger su GPU
- Fit di anelli Cherenkov multipli
- Architettura del trigger

4 Test del trigger e conclusioni
- Efficienza e tempo di esecuzione
- Prospettive e conclusioni

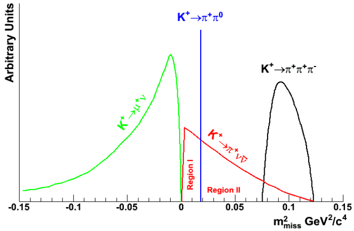
Il fondo $K^+ \to \pi^+\pi^0$

Decadimento a 2 corpi $\Rightarrow$ cinematica **vincolata**:

$$m^2_{miss} \equiv (P_K - P_{\pi^+})^2 = m^2_{\pi^0}$$

$$\left(P_K^\mu P_{\pi\,\mu}\right) \text{ invariante } \Rightarrow \; m_K E^*_\pi = E_K E_\pi - |\vec{P_K}||\vec{P_\pi}|\cos\theta_{K\pi}$$

$\longrightarrow$ relazione tra velocità del pione ed angolo di decadimento



$\rightarrow$ Riconoscere e rigettare $\pi^+\pi^0$ usando solo β_π e $\theta_{K\pi}$ (RICH)? $\leftarrow$

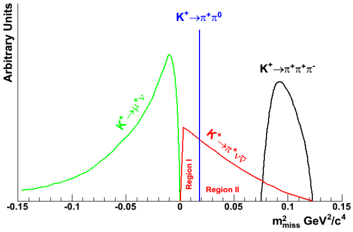
Il fondo $K^+ \to \pi^+\pi^0$

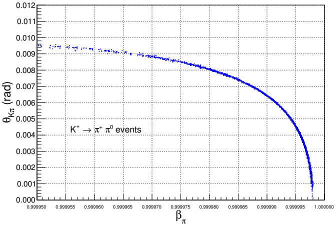
Decadimento a 2 corpi $\Rightarrow$ cinematica **vincolata**:

$$m^2_{miss} \equiv (P_K - P_{\pi^+})^2 = m^2_{\pi^0}$$

$$\left(P^\mu_K P_{\pi\,\mu}\right) \text{ invariante } \Rightarrow \; m_K E^*_\pi = E_K E_\pi - |\vec{P_K}||\vec{P_\pi}|\cos\theta_{K\pi}$$

$\longrightarrow$ relazione tra velocità del pione ed angolo di decadimento





$\rightarrow$ Riconoscere e rigettare $\pi^+\pi^0$ usando solo β_π e $\theta_{K\pi}$ (RICH)? $\leftarrow$

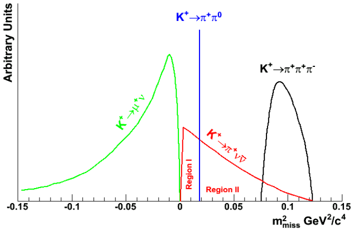
Il fondo $K^+ \to \pi^+\pi^0$

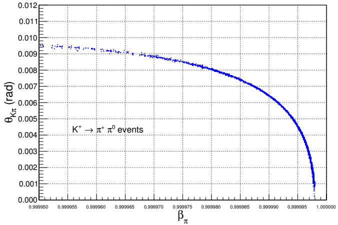
Decadimento a 2 corpi $\Rightarrow$ cinematica **vincolata**:

$$m^2_{miss} \equiv (P_K - P_{\pi^+})^2 = m^2_{\pi^0}$$

$$\left(P^\mu_K P_{\pi\,\mu}\right) \text{ invariante } \Rightarrow \; m_K E^*_\pi = E_K E_\pi - |\vec{P_K}||\vec{P_\pi}| \cos\theta_{K\pi}$$

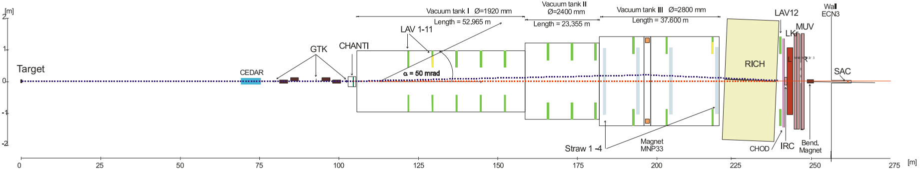
$\longrightarrow$ relazione tra velocità del pione ed angolo di decadimento





$\to$ Riconoscere e rigettare $\pi^+\pi^0$ usando solo β_π e $\theta_{K\pi}$ (RICH)? $\leftarrow$

Simulazione e ricostruzione degli eventi sul RICH

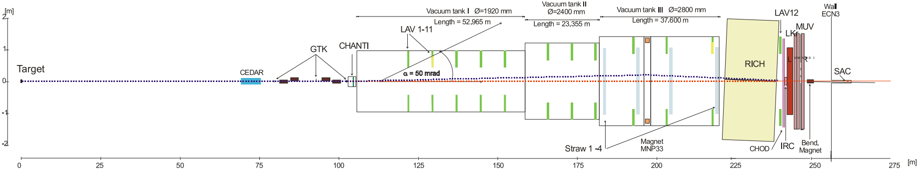


Framework di NA62: simulazione (Geant4 + ROOT) + ricostruzione (ROOT)

- simulazione evento ⟶ fotomoltiplicatori colpiti
- fit di anelli Cherenkov ai PMT

- correzioni geometriche
- propagazione all'indietro
- ⟶ quantità ricostruite: β_π, $\theta_{K\pi}$

Simulazione e ricostruzione degli eventi sul RICH

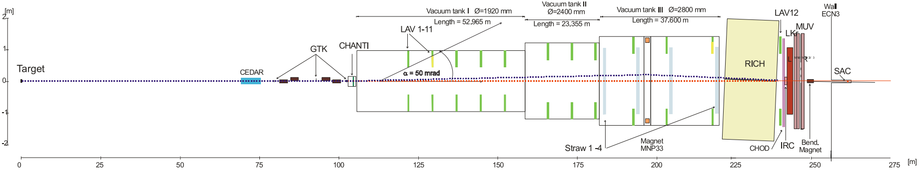


Framework di NA62: simulazione (Geant4 + ROOT) + ricostruzione (ROOT)

- simulazione evento $\longrightarrow$ fotomoltiplicatori colpiti
- fit di anelli Cherenkov ai PMT

- correzioni geometriche
- propagazione all'indietro
- $\longrightarrow$ quantità ricostruite: β_π, $\theta_{K\pi}$

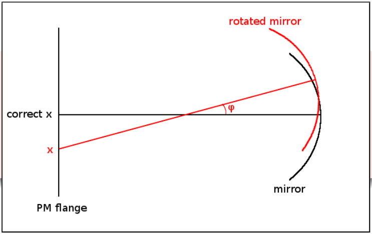
Simulazione e ricostruzione degli eventi sul RICH



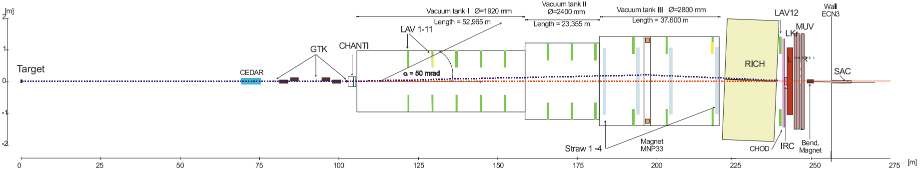
Framework di NA62: simulazione (Geant4 + ROOT) + ricostruzione (ROOT)

- simulazione evento $\longrightarrow$ fotomoltiplicatori colpiti
- fit di anelli Cherenkov ai PMT

- correzioni geometriche
- propagazione all'indietro
- $\longrightarrow$ quantità ricostruite: β_π, $\theta_{K\pi}$



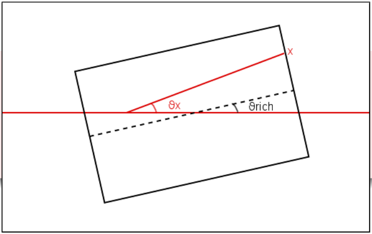
Simulazione e ricostruzione degli eventi sul RICH



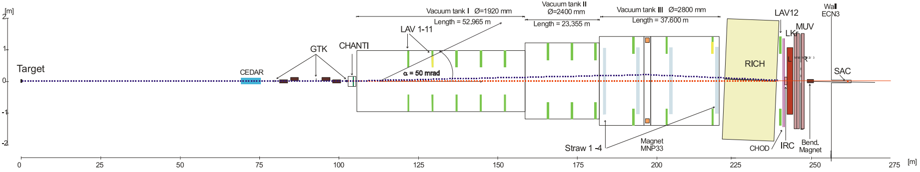
Framework di NA62: simulazione (Geant4 + ROOT) + ricostruzione (ROOT)

- simulazione evento $\longrightarrow$ fotomoltiplicatori colpiti
- fit di anelli Cherenkov ai PMT

- correzioni geometriche
- propagazione all'indietro
- $\longrightarrow$ quantità ricostruite: β_π, $\theta_{K\pi}$



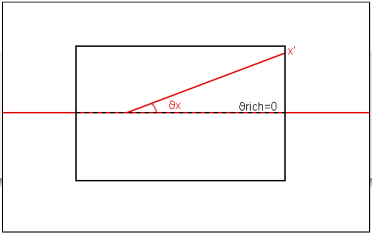
Simulazione e ricostruzione degli eventi sul RICH



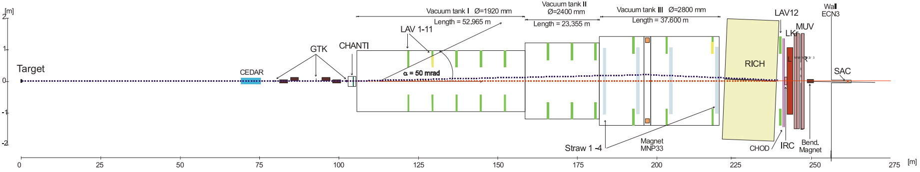
Framework di NA62: simulazione (Geant4 + ROOT) + ricostruzione (ROOT)

- simulazione evento $\longrightarrow$ fotomoltiplicatori colpiti
- fit di anelli Cherenkov ai PMT

- correzioni geometriche
- propagazione all'indietro
- $\longrightarrow$ quantità ricostruite: β_π, $\theta_{K\pi}$



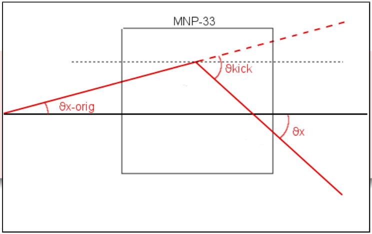
Simulazione e ricostruzione degli eventi sul RICH



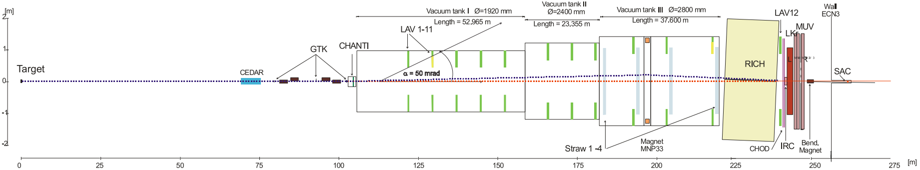
Framework di NA62: simulazione (Geant4 + ROOT) + ricostruzione (ROOT)

- simulazione evento $\longrightarrow$ fotomoltiplicatori colpiti
- fit di anelli Cherenkov ai PMT

- correzioni geometriche
- propagazione all'indietro
- $\longrightarrow$ quantità ricostruite: β_π, $\theta_{K\pi}$



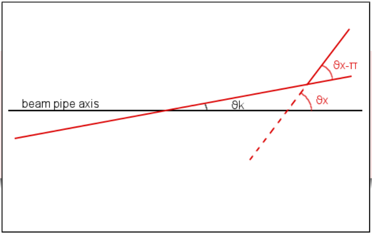
Simulazione e ricostruzione degli eventi sul RICH



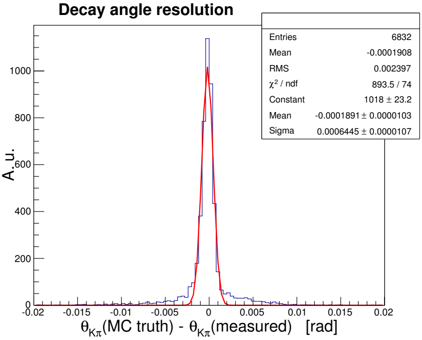
Framework di NA62: simulazione (Geant4 + ROOT) + ricostruzione (ROOT)

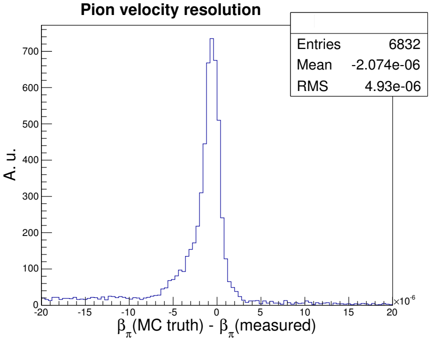
- simulazione evento $\longrightarrow$ fotomoltiplicatori colpiti
- fit di anelli Cherenkov ai PMT

- correzioni geometriche
- propagazione all'indietro
- $\longrightarrow$ quantità ricostruite: β_π, $\theta_{K\pi}$



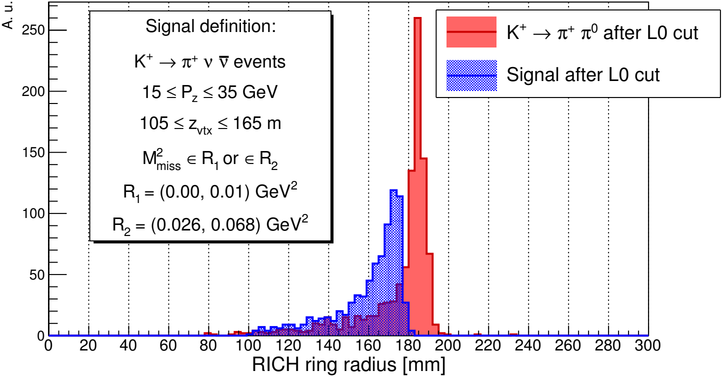
Accuratezza di ricostruzione





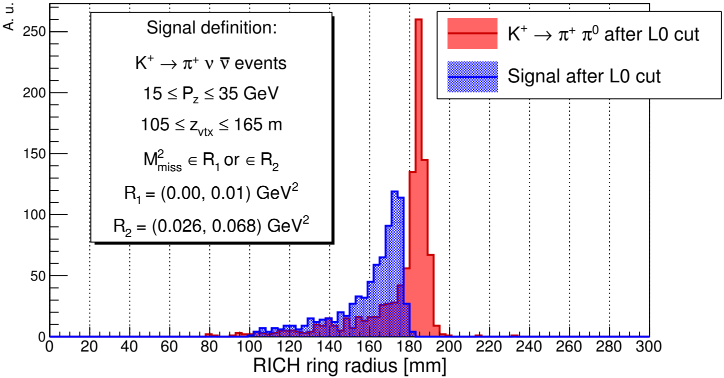
- angolo di decadimento: $\sigma(\theta_{K\pi}) \sim 1$ mrad
- velocità del pione: $\sigma(\beta_\pi) \sim 5 \times 10^{-6}$

Analisi dei fattori di reiezione: impulso



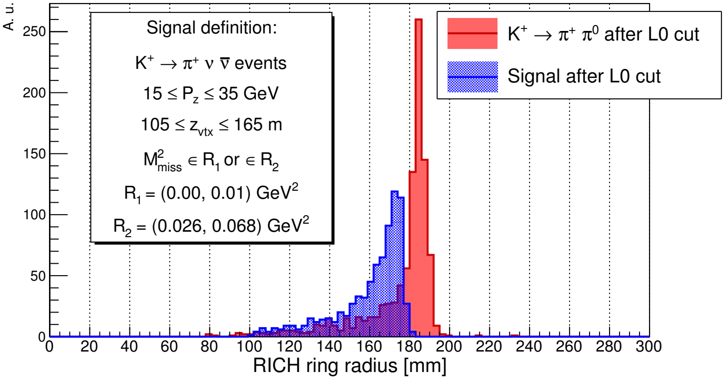
- selezioni stringenti in fase di analisi: $P_\pi \leq 35$ GeV$/c$
- $\exists$ raggio massimo r_{max} degli anelli Cherenkov per il segnale
- distribuzione r_c per $K^+ \to \pi^+\pi^0$

Analisi dei fattori di reiezione: impulso



- selezioni stringenti in fase di analisi: $P_\pi \leq 35$ GeV$/c$
- $\exists$ raggio massimo r_{max} degli anelli Cherenkov per il segnale
- distribuzione r_c per $K^+ \to \pi^+\pi^0$

Analisi dei fattori di reiezione: impulso



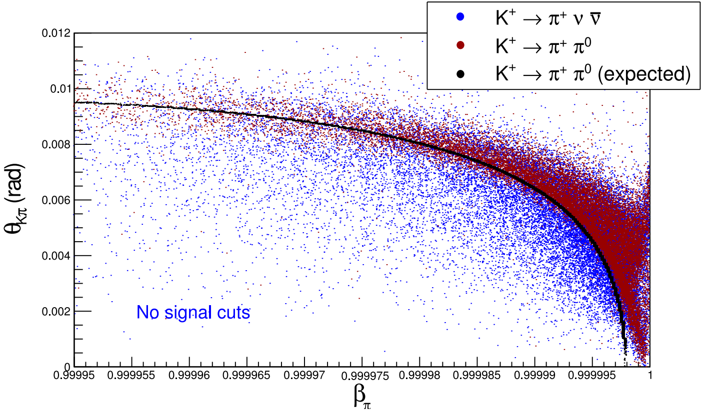
- selezioni stringenti in fase di analisi: $P_\pi \leq 35$ GeV$/c$
- $\exists$ raggio massimo r_{max} degli anelli Cherenkov per il segnale
- distribuzione r_c per $K^+ \to \pi^+\pi^0 \Longrightarrow$ **60÷70% rigettabile**

Analisi dei fattori di reiezione: cinematica $\pi^+\pi^0$

- risoluzione ottenibile a livello L0 $\longrightarrow$
- ricerca di variabili che
  - sfruttino la cinematiche chiusa del $K^+ \to \pi^+\pi^0$
  - permettano la separazione tra segnale e fondo
- ad es.: 'anomalia' angolo di decadimento $\delta \equiv \theta\left(K\pi\right)_{reco} - \theta\left(K\pi\right)_{K^+\to\pi^+\pi^0}$

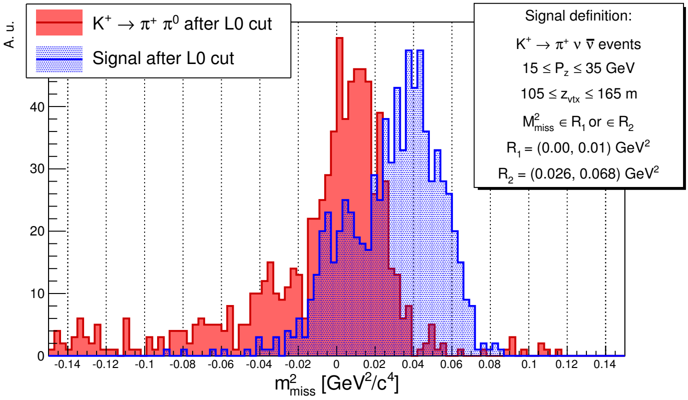
Analisi dei fattori di reiezione: cinematica $\pi^+\pi^0$

- risoluzione ottenibile a livello L0 $\longrightarrow$ ~~tagli bidimensionali~~
- ricerca di variabili che
  - sfruttino la cinematiche chiusa del $K^+ \to \pi^+\pi^0$
  - permettano la separazione tra segnale e fondo
- ad es.: 'anomalia' angolo di decadimento $\delta \equiv \theta(K\pi)_{reco} - \theta(K\pi)_{K^+\to\pi^+\pi^0}$



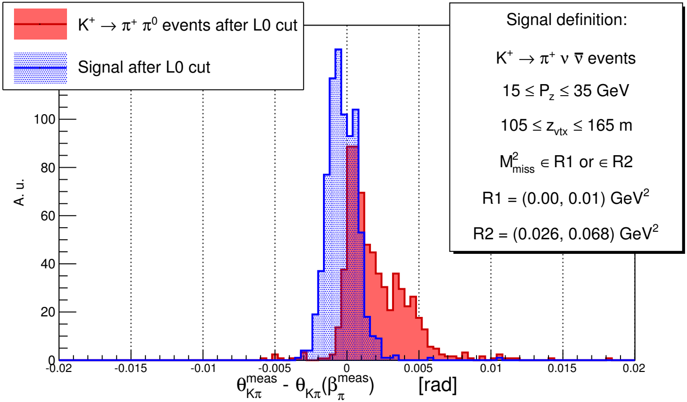
Analisi dei fattori di reiezione: cinematica $\pi^+\pi^0$

- risoluzione ottenibile a livello L0 $\longrightarrow$ ~~tagli bidimensionali~~ $\cancel{m^2_{miss}}$
- ricerca di variabili che
  - sfruttino la cinematiche chiusa del $K^+ \to \pi^+\pi^0$
  - permettano la separazione tra segnale e fondo
- ad es.: 'anomalia' angolo di decadimento $\delta \equiv \theta\,(K\pi)_{reco} - \theta\,(K\pi)_{K^+\to\pi^+\pi^0}$



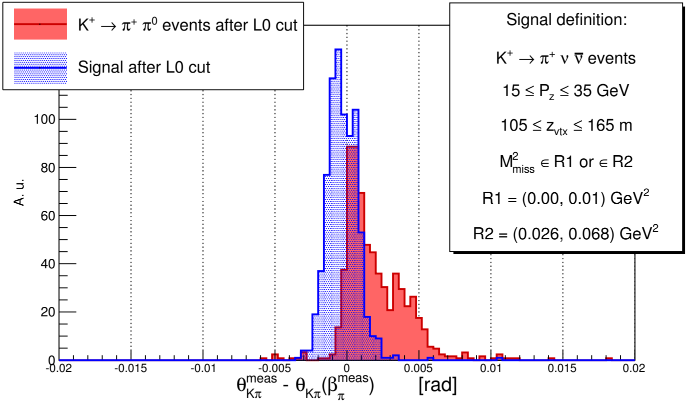
Analisi dei fattori di reiezione: cinematica $\pi^+\pi^0$

- risoluzione ottenibile a livello L0 $\longrightarrow$ ~~tagli bidimensionali~~ $\cancel{m^2_{miss}}$
- ricerca di variabili che
  - sfruttino la cinematiche chiusa del $K^+ \to \pi^+\pi^0$
  - permettano la separazione tra segnale e fondo
- ad es.: ‘anomalia’ angolo di decadimento $\delta \equiv \theta(K\pi)_{reco} - \theta(K\pi)_{K^+\to\pi^+\pi^0}$



Analisi dei fattori di reiezione: cinematica $\pi^+\pi^0$

- risoluzione ottenibile a livello L0 $\longrightarrow$ ~~tagli bidimensionali~~ $\cancel{m^2_{miss}}$
- ricerca di variabili che
  - sfruttino la cinematiche chiusa del $K^+ \to \pi^+\pi^0$
  - permettano la separazione tra segnale e fondo
- ad es.: 'anomalia' angolo di decadimento $\delta \equiv \theta\,(K\pi)_{reco} - \theta\,(K\pi)_{K^+\to\pi^+\pi^0}$



Prestazioni massime dell'algoritmo di trigger

Tagli	Efficienza segnale	Reiezione RICH (oltre L0)
$r_c \leq 17.9$ cm	98.6 ± 0.4 %	$\mathbf{65} \pm \mathbf{1}$ %

- Reiezione $\pi^+\pi^0$ del trigger L0 standard: $(76.7 \pm 0.4)\%$
- Raggio Cherenkov:
  - r_{th} da 17.6 cm a 18.1 cm
  - efficienza da 92.6% a 99.6%
  - reiezione $\pi^+\pi^0$ dopo L0 da 59% a 70%
- δ agisce su variabili correlate (P_π)
- $\chi^2 \leq 1$ assicura che ci sia un solo anello Cherenkov (MC: fit di 1 solo cerchio)

Prestazioni massime dell'algoritmo di trigger

Tagli	Efficienza segnale	Reiezione RICH (oltre L0)
$r_c \leq 17.9$ cm	98.6 ± 0.4 %	$\mathbf{65} \pm \mathbf{1}$ %
$r_c \leq 17.9$ cm $\delta \leq 0.002$	98.0 ± 0.4 %	$\mathbf{72} \pm \mathbf{1}$ %

- Reiezione $\pi^+\pi^0$ del trigger L0 standard: $(76.7 \pm 0.4)\%$
- Raggio Cherenkov:
  - r_{th} da 17.6 cm a 18.1 cm
  - efficienza da 92.6% a 99.6%
  - reiezione $\pi^+\pi^0$ dopo L0 da 59% a 70%
- δ agisce su variabili correlate (P_π)
- $\chi^2 \leq 1$ assicura che ci sia un solo anello Cherenkov (MC: fit di 1 solo cerchio)

Prestazioni massime dell'algoritmo di trigger

Tagli	Efficienza segnale	Reiezione RICH (oltre L0)
$r_c \leq 17.9$ cm	98.6 ± 0.4 %	$\mathbf{65 \pm 1}$ %
$r_c \leq 17.9$ cm $\delta \leq 0.002$	98.0 ± 0.4 %	$\mathbf{72 \pm 1}$ %
$r_c \leq 17.9$ cm $\delta \leq 0.002$ $\chi^2 \leq 1$	96.2 ± 0.7 %	$\mathbf{77 \pm 1}$ %

- Reiezione $\pi^+\pi^0$ del trigger L0 standard: $(76.7 \pm 0.4)\%$
- Raggio Cherenkov:
  - r_{th} da 17.6 cm a 18.1 cm
  - efficienza da 92.6% a 99.6%
  - reiezione $\pi^+\pi^0$ dopo L0 da 59% a 70%
- δ agisce su variabili correlate (P_π)
- $\chi^2 \leq 1$ assicura che ci sia un solo anello Cherenkov (MC: fit di 1 solo cerchio)

1. Introduzione e contesto
2. Studio di fattibilità tramite simulazioni Montecarlo
   - Definizione dell'obiettivo
   - Sviluppo di un algoritmo di ricostruzione eventi per il RICH
   - Analisi dei fattori di reiezione
   - Risultati dello studio e prestazioni ottimali
3. **Sviluppo dell'algoritmo di trigger su GPU**
   - **Fit di anelli Čerenkov multipli**
   - **Architettura del trigger**
4. Test del trigger e conclusioni
   - Efficienza e tempo di esecuzione
   - Prospettive e conclusioni

Necessità di un algoritmo *multi-ring*

- 1 anello Cherenkov $\forall$ particella carica nell'accettanza:
  - $K^+ \to \pi^+\pi^0 \to \pi^+\gamma\, e^+e^-$
  - $K^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-$, e $K^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0$ con conversione di π^0
  - inelastici su materiale, produzione di adroni, rumore
- $\Longrightarrow$ necessità di identificare tutti gli anelli

- trigger dedicati per ricerca di altri canali, ad es. LV / LFV:
  - $K^+ \to \pi^+\mu^\pm e^\mp$
  - $K^+ \to \pi^-\ell^+\ell'^+$
  - statistica di NA62 $\longrightarrow$ migliorare di un fattore 10 i limiti attuali
  - prossimo lavoro su GPU+RICH

Necessità di un algoritmo *multi-ring*

- 1 anello Cherenkov $\forall$ particella carica nell'accettanza:
  - $K^+ \to \pi^+\pi^0 \to \pi^+\gamma\, e^+e^-$
  - $K^+ \to \pi^+\pi^+\pi^-$, e $K^+ \to \pi^+\pi^0\pi^0$ con conversione di π^0
  - inelastici su materiale, produzione di adroni, rumore
- $\Longrightarrow$ necessità di identificare tutti gli anelli

- trigger dedicati per ricerca di altri canali, ad es. LV / LFV:
  - $K^+ \to \pi^+\mu^\pm e^\mp$
  - $K^+ \to \pi^-\ell^+\ell'^+$
  - statistica di NA62 $\longrightarrow$ migliorare di un fattore 10 i limiti attuali
  - prossimo lavoro su GPU+RICH

Sviluppo di un algoritmo di fit parallelizzato

Caratteristiche necessarie:

- velocità di esecuzione compatibile con l'utilizzo in **tempo reale**
- **seedless**: nessuna informazione preventiva sull'evento
- **multi-ring**
- più **accurato** e **robusto** possibile

Non esistono algoritmi paralleli per il fit di cerchi multipli.

– Idea: algoritmo a due passi –

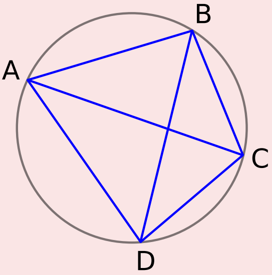
Riconoscimento di pattern: scoprire quanti cerchi sono presenti, e passarli ad un algoritmo di fit di singolo cerchio

$\longrightarrow$
$\longrightarrow$
$\longrightarrow$
$\longrightarrow$
$\longrightarrow$

Fit di singolo cerchio: trovare l'algoritmo più efficace

#1: Riconoscimento di pattern

Il teorema di Tolomeo



In un quadrilatero ciclico, il prodotto delle lunghezze delle diagonali è uguale alla somma dei prodotti delle lunghezze delle due coppie di lati opposti.

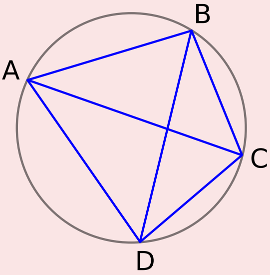
$$\overline{AB} \cdot \overline{CD} + \overline{AD} \cdot \overline{BC} - \overline{AC} \cdot \overline{BD} = 0$$

- Scegliere tre punti (PMT colpiti)
- $\forall$ 4°punto, verificare la relazione
- Vale la relazione $\Rightarrow$ i 4 punti appartengono allo stesso cerchio
- Candidati $\longrightarrow$ fit di singoli cerchi

Triplette iniziali?

#1: Riconoscimento di pattern

Il teorema di Tolomeo



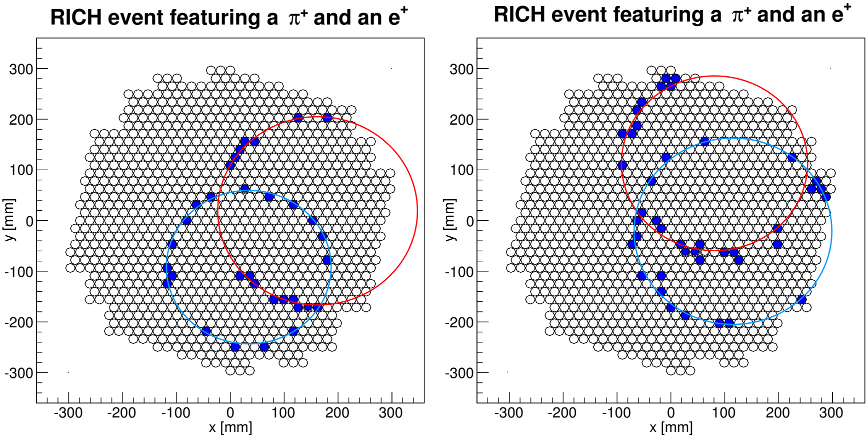
In un quadrilatero ciclico, il prodotto delle lunghezze delle diagonali è uguale alla somma dei prodotti delle lunghezze delle due coppie di lati opposti.

$$\overline{AB} \cdot \overline{CD} + \overline{AD} \cdot \overline{BC} - \overline{AC} \cdot \overline{BD} = 0$$

- Scegliere tre punti (PMT colpiti)
- $\forall$ 4°punto, verificare la relazione
- Vale la relazione $\Rightarrow$ i 4 punti appartengono allo stesso cerchio
- Candidati $\longrightarrow$ fit di singoli cerchi

Triplette iniziali?

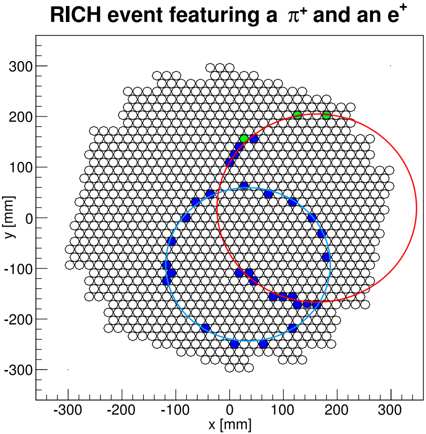
#1: Riconoscimento di pattern

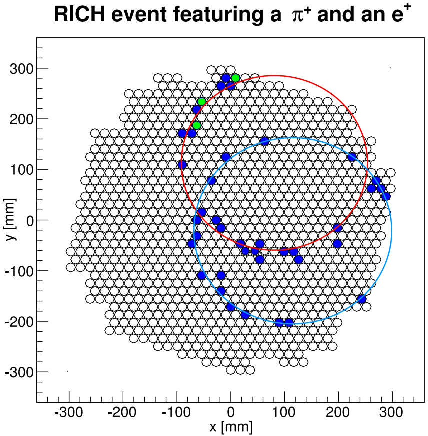


Selezione triplette: caratteristiche necessarie

- punti ben separati
- massimizzare la probabilità di appartenere allo stesso anello

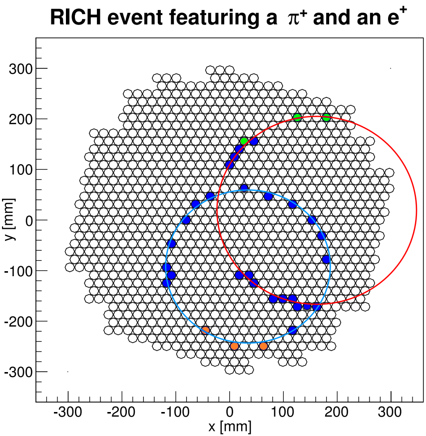
#1: Riconoscimento di pattern

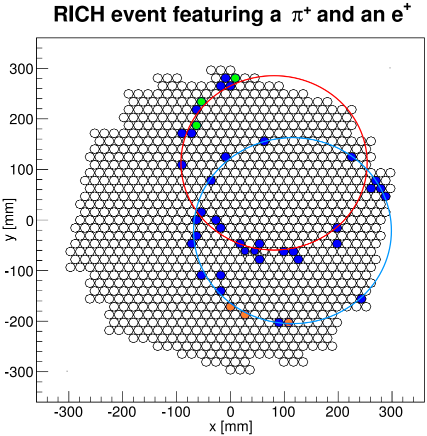




1. i tre punti più in alto
2. i tre punti più in basso
3. i tre punti più a sinistra
4. i tre punti più a destra

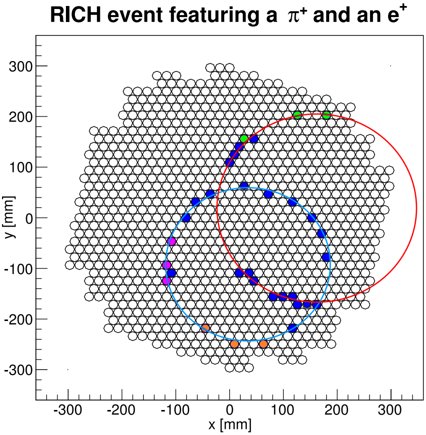
#1: Riconoscimento di pattern

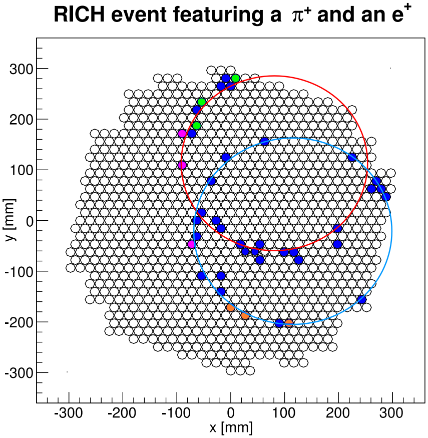




1. i tre punti più in **alto**
2. i tre punti più in **basso**
3. i tre punti più a **sinistra**
4. i tre punti più a **destra**

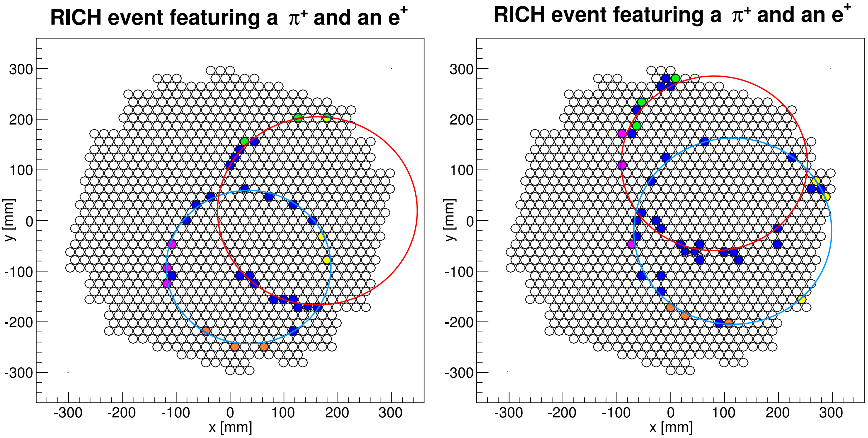
#1: Riconoscimento di pattern





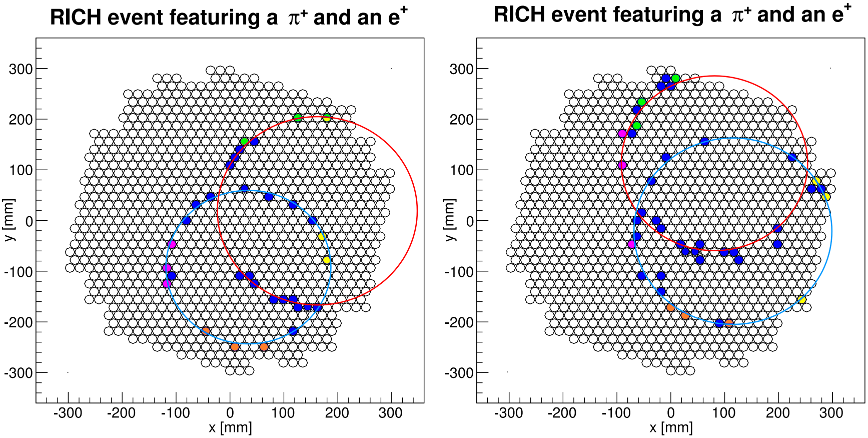
1. i tre punti più in **alto**
2. i tre punti più in **basso**
3. i tre punti più a **sinistra**
4. i tre punti più a **destra**

#1: Riconoscimento di pattern



1. i tre punti più in **alto**
2. i tre punti più in **basso**
3. i tre punti più a **sinistra**
4. i tre punti più a **destra**

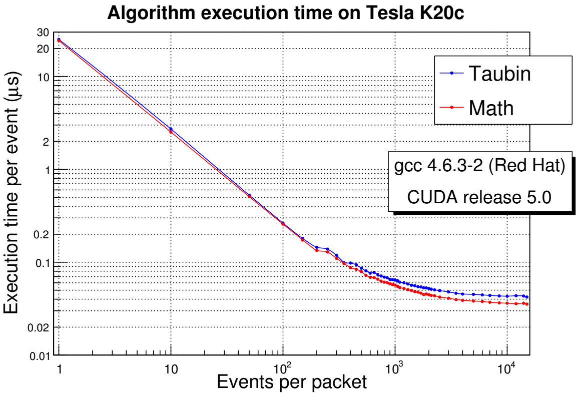
#1: Riconoscimento di pattern



In questi due eventi, entrambi i cerchi verranno identificati.
Più aumenta il numero di cerchi, più questo metodo perderà efficienza.

#2: Identificazione dei singoli cerchi

- Precedentemente testati vari algoritmi, anche parallelizzati
- Più accurato e veloce: metodo dei minimi quadrati (fit algebrico)
- Ricerca di algoritmi più robusti $\longrightarrow$ metodo di Taubin
- Tempo di esecuzione compatibile? Implementazione semi-parallela: $\Delta t \sim 0.03 \div 0.2$ µs/evt (n eventi in parallelo su GPU)

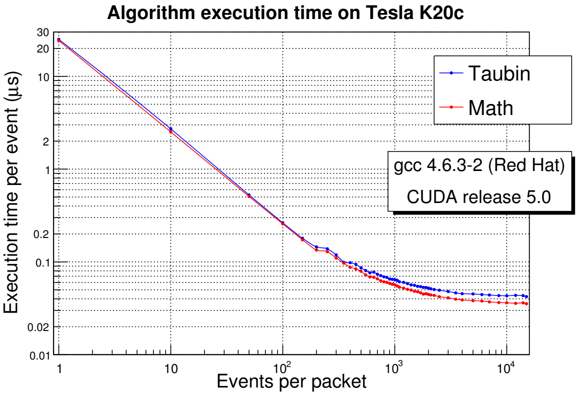


#2: Identificazione dei singoli cerchi

$$r_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2}$$

$$\sum_i (r_i - R)^2 (r_i + R)^2 \longrightarrow \sum_i (r_i - R)^2$$

- Precedentemente testati vari algoritmi
- Più accurato e veloce: metodo dei mi
- Ricerca di algoritmi più robusti $\longrightarrow$ metodo di Taubin
- Tempo di esecuzione compatibile? Implementazione semi-parallela: $\Delta t \sim 0.03 \div 0.2$ μs/evt (n eventi in parallelo su GPU)



Architettura parallela

n_E	numero di eventi da processare simultaneamente
n_h	massimo numero di hit per evento
4	triplette per evento

Architettura programma (CUDA):

- dati trasmessi dalle schede di lettura all'*host* (CPU) via ethernet
- *mentre* i dati vengono letti, creazione delle triplette (CPU)
- esecuzione del *kernel* su GPU con:
  - ($n_E \times 4$) blocchi da
  - n_h threads ciascuno

  che eseguono le stesse istruzioni simultaneamente:
  - test della formula di Tolomeo (parallelo)
  - assegnazione degli hit ai candidati anelli (parallelo)
  - fit di cerchi ai candidati (semi-parallelo)

Architettura parallela

n_E	numero di eventi da processare simultaneamente
n_h	massimo numero di hit per evento
4	triplette per evento

Architettura programma (CUDA):

- dati trasmessi dalle schede di lettura all'*host* (CPU) via ethernet
- *mentre* i dati vengono letti, creazione delle triplette (CPU)
- esecuzione del *kernel* su GPU con:
  - $(n_E \times 4)$ blocchi da
  - n_h threads ciascuno

  che eseguono le stesse istruzioni simultaneamente:
  - test della formula di Tolomeo (parallelo)
  - assegnazione degli hit ai candidati anelli (parallelo)
  - fit di cerchi ai candidati (semi-parallelo)

Definizione delle selezioni di trigger

Trigger **standard**: miglioramento della reiezione di $K^+ \to \pi^+\pi^0$ in tempo reale

Definizione di un anello utilizzabile come elemento di trigger:

- raggio "ragionevole": $r_{min} \leq r \leq r_{max}$
- numero di hit assegnati al candidato: $n > n_{th}$
- frazione di hit assegnati al candidato: $n/n_{hit} > f_{th}$
- anelli diversi: $|r_i - r_j| > \Delta r_{th}$ e distanza tra i centri $d_{ij} > d_{th}$

$\vee$ $n > 1$ anelli identificati
  - $\wedge$ n_{hit} compatibile con n particelle
  - $\wedge$ candidati disgiunti

$\vee$ $n \geq 1$ anelli con raggio $r > r_{th}$

$\vee$ $n \geq 1$ anelli con cinematica tale che $\delta > \delta_{th}$

$\Longrightarrow$ **Evento scartato**

Definizione delle selezioni di trigger

Trigger **standard**: miglioramento della reiezione di $K^+ \to \pi^+\pi^0$ in tempo reale

Definizione di un anello utilizzabile come elemento di trigger:

- raggio "ragionevole": $r_{min} \leq r \leq r_{max}$
- numero di hit assegnati al candidato: $n > n_{th}$
- frazione di hit assegnati al candidato: $n/n_{hit} > f_{th}$
- anelli diversi: $|r_i - r_j| > \Delta r_{th}$ e distanza tra i centri $d_{ij} > d_{th}$

$\vee$ $n > 1$ anelli identificati

  $\wedge$ n_{hit} compatibile con n particelle

  $\wedge$ candidati disgiunti

$\vee$ $n \geq 1$ anelli con raggio $r > r_{th}$

$\vee$ $n \geq 1$ anelli con cinematica tale che $\delta > \delta_{th}$

$\Longrightarrow$ Evento scartato

Definizione delle selezioni di trigger

Trigger **standard**: miglioramento della reiezione di $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ in tempo reale

Definizione di un anello utilizzabile come elemento di trigger:

- raggio "ragionevole": $r_{min} \leq r \leq r_{max}$
- numero di hit assegnati al candidato: $n > n_{th}$
- frazione di hit assegnati al candidato: $n/n_{hit} > f_{th}$
- anelli diversi: $|r_i - r_j| > \Delta r_{th}$ e distanza tra i centri $d_{ij} > d_{th}$

$\vee$ $n > 1$ anelli identificati
  $\wedge$ n_{hit} compatibile con n particelle
  $\wedge$ candidati disgiunti
$\vee$ $n \geq 1$ anelli con raggio $r > r_{th}$
$\vee$ $n \geq 1$ anelli con cinematica tale che $\delta > \delta_{th}$

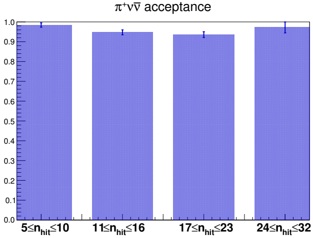
$\Longrightarrow$ **Evento scartato**

1. Introduzione e contesto
2. Studio di fattibilità tramite simulazioni Montecarlo
   - Definizione dell'obiettivo
   - Sviluppo di un algoritmo di ricostruzione eventi per il RICH
   - Analisi dei fattori di reiezione
   - Risultati dello studio e prestazioni ottimali
3. Sviluppo dell'algoritmo di trigger su GPU
   - Fit di anelli Cerenkov multipli
   - Architettura del trigger
4. **Test del trigger e conclusioni**
   - Efficienza e tempo di esecuzione
   - Prospettive e conclusioni

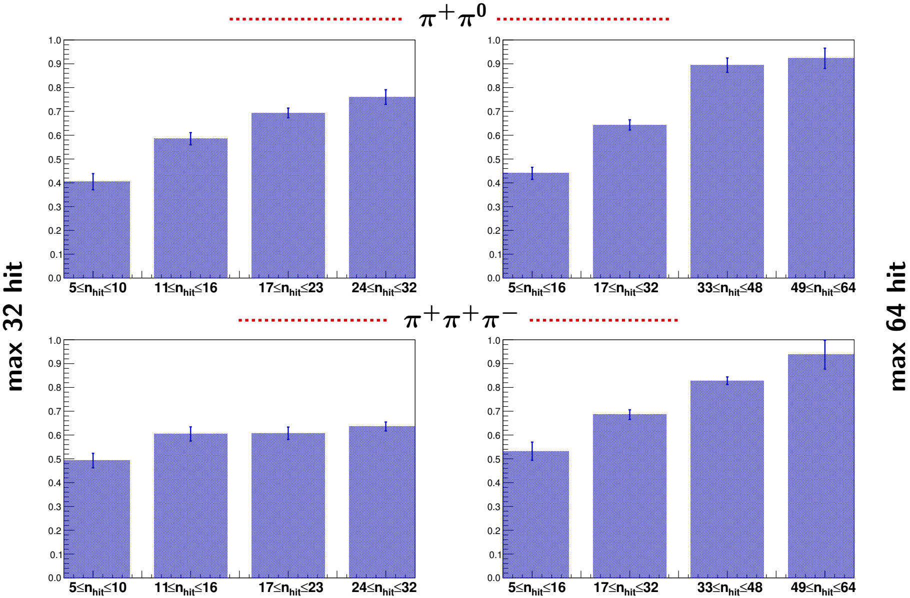
Efficienza del trigger

Tipo di dati	Filtro	Efficienza (%)	Reiezione (%)
$\pi^+\nu\bar{\nu}$	L0 + segnale	**95.1 ± 0.8**	–
$\pi^+\pi^0$	L0 standard	–	**62.5 ± 1.4**
$\pi^+\pi^+\pi^-$	L0 standard	–	**59.9 ± 1.3**
$\pi^+\nu\bar{\nu}$	Segnale	**95.1 ± 0.8**	–
$\pi^+\pi^0$	$5 \leq n_{hit} \leq 64$	–	**60.4 ± 1.5**
$\pi^+\pi^+\pi^-$	$5 \leq n_{hit} \leq 64$	–	**73.1 ± 1.2**

- Dati simulati e riformattati per massimizzare il *throughput*
- Trasmissione TEL62 $\rightarrow$ PC ad 1 Gbit/s
- Algoritmo ottimizzato per $\pi^+\pi^0$, ma con taglio sul numero di anelli $\rightarrow$ test su 3π



Reiezione dei fondi



Possibile alternativa al trigger L0 standard

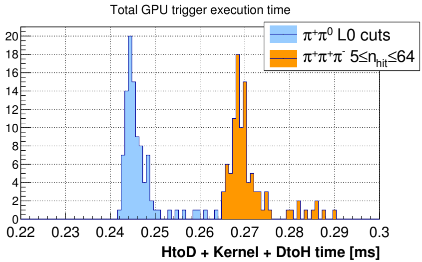
- pochi hit $\longrightarrow$ anelli (veri e ricostruiti) di bassa qualità
- il potere di reiezione cresce con il numero di hit
  - molti anelli, pochi hit $\longrightarrow$ difficile separazione con 4 triplette (3π)
  - incrementare il numero di triplette, oppure
  - ridisegnare l'architettura dell'algoritmo
- elevata capacità di identificazione dei principali fondi per eventi a molti hit:
  - possibile rilassare o eliminare i tagli di molteplicità a livello hardware
  - utilizzare solo le GPU per rigettare eventi di fondo adronici
  - ottimizzare algoritmo per l'identificazione di questo tipo di eventi
  - programmare trigger *ad hoc* per canali leptonici LV / LFV

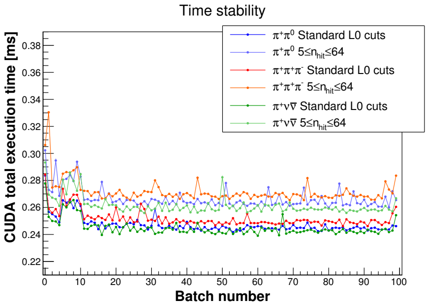
Tempo di esecuzione e stabilità

Latenza massima del trigger L0 standard: 1 ms (dimensione memorie circolari)

$\Longrightarrow$ necessità di:

- sostenere un rate di eventi $\mathcal{O}(10)$ MHz
- con un tempo di esecuzione stabile $\Delta t < 1$ ms
- tempi di esecuzione con $n_E = 256$ eventi in parallelo:



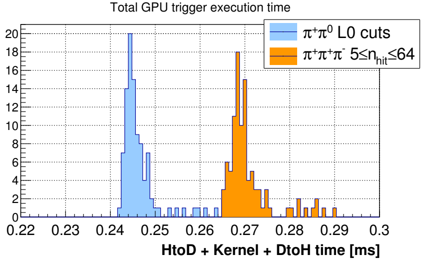


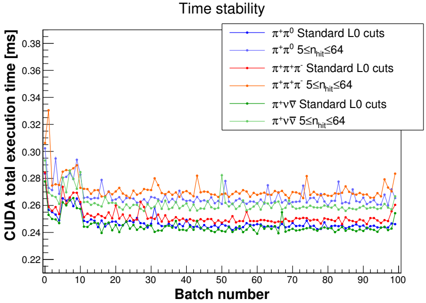
Tempo di esecuzione e stabilità

Latenza massima del trigger L0 standard: 1 ms (dimensione memorie circolari)

$\Longrightarrow$ necessità di:

- sostenere un rate di eventi $\mathcal{O}(10)$ MHz $\longrightarrow$ $\mathcal{O}(10)$ GPU
- con un tempo di esecuzione stabile $\Delta t < 1$ ms
- tempi di esecuzione con $n_E = 256$ eventi in parallelo:





Tempo di esecuzione *per evento*:

$$\Delta t_{32} = (0.97 \pm 0.02)\ \mu\text{s}$$

$$\Delta t_{64} = (1.06 \pm 0.02)\ \mu\text{s}$$

Risultati e prospettive

- Necessità di un *"toy montecarlo"* che generi un numero **conosciuto** di anelli per testare l'efficacia della fase di riconoscimento di pattern

- Efficienza di trigger e capacità di reiezione del fondo come da aspettative
- $\mathcal{O}(10)$ schede per affiancarsi al L0 standard
  - $\mathcal{O}(1)$ scheda a livello 0.5!

- Prima implementazione testata su dati verosimili con un framework di acquisizione "definitivo"
- **Ottimizzazioni** ed altre **architetture** possibili, il numero può solo diminuire
  - 1 thread $\longleftrightarrow$ 1 tripletta
  - costruire uno *stream* continuo di dati per trovare il numero ottimale di eventi da processare simultaneamente

- Implementazione del programma come *trigger parassita* nei primi mesi di presa dati per **validarne** il comportamento su dati reali

Risultati e prospettive

- Necessità di un *"toy montecarlo"* che generi un numero **conosciuto** di anelli per testare l'efficacia della fase di riconoscimento di pattern

- Efficienza di trigger e capacità di reiezione del fondo come da aspettative
- $\mathcal{O}(10)$ schede per affiancarsi al L0 standard
  - $\mathcal{O}(1)$ scheda a livello 0.5!

- Prima implementazione testata su dati verosimili con un framework di acquisizione "definitivo"
- **Ottimizzazioni** ed altre **architetture** possibili, il numero può solo diminuire
  - 1 thread $\longleftrightarrow$ 1 tripletta
  - costruire uno *stream* continuo di dati per trovare il numero ottimale di eventi da processare simultaneamente

- Implementazione del programma come *trigger parassita* nei primi mesi di presa dati per **validarne** il comportamento su dati reali

Risultati e prospettive

- Necessità di un *"toy montecarlo"* che generi un numero **conosciuto** di anelli per testare l'efficacia della fase di riconoscimento di pattern

- Efficienza di trigger e capacità di reiezione del fondo come da aspettative
- $\mathcal{O}(10)$ schede per affiancarsi al L0 standard
  - $\mathcal{O}(1)$ scheda a livello 0.5!

- Prima implementazione testata su dati verosimili con un framework di acquisizione "definitivo"
- **Ottimizzazioni** ed altre **architetture** possibili, il numero può solo diminuire
  - 1 thread $\longleftrightarrow$ 1 tripletta
  - costruire uno *stream* continuo di dati per trovare il numero ottimale di eventi da processare simultaneamente

- Implementazione del programma come *trigger parassita* nei primi mesi di presa dati per **validarne** il comportamento su dati reali

Conclusioni: GPU in NA62 e altre applicazioni

- GPU **già utilizzate** per trigger di alto livello ed analisi (ATLAS, ALICE...), simulazione (BES, FAIR...), calcolo (QCD, reticoli...)
- Fisica Medica (riconoscimento di pattern ed *image processing*), Astrofisica e Cosmologia (N corpi)...
- Altre discipline: statistica, finanza, medicina (genetica), biologia (strutture proteiche)...

Questo lavoro: punto di partenza per l'introduzione di trigger di basso livello basati su GPU in Fisica delle Particelle (mai fatto prima)

- Identificare anelli Cherenkov in tempo reale $\longrightarrow$ trigger selettivi
- Analisi cinematica di base in tempo reale $\longrightarrow$ architetture "triggerless"

- In **NA62**:
  - Fondi principali **soppressi** di un fattore $\geq 60\%$ oltre al L0 standard
  - possibilità di rilassare il taglio sul numero di particelle cariche
  - costruzione di trigger specifici per altri canali rari

Conclusioni: GPU in NA62 e altre applicazioni

- GPU **già utilizzate** per trigger di alto livello ed analisi (ATLAS, ALICE...), simulazione (BES, FAIR...), calcolo (QCD, reticoli...)
- Fisica Medica (riconoscimento di pattern ed *image processing*), Astrofisica e Cosmologia (N corpi)...
- Altre discipline: statistica, finanza, medicina (genetica), biologia (strutture proteiche)...

Questo lavoro: punto di partenza per l'introduzione di trigger di basso livello basati su GPU in Fisica delle Particelle (mai fatto prima)

- Identificare anelli Cherenkov in tempo reale $\longrightarrow$ trigger selettivi
- Analisi cinematica di base in tempo reale $\longrightarrow$ architetture "triggerless"
- In **NA62**:
  - Fondi principali **soppressi** di un fattore $\geq 60\%$ oltre al L0 standard
  - possibilità di rilassare il taglio sul numero di particelle cariche
  - costruzione di trigger specifici per altri canali rari

Conclusioni: GPU in NA62 e altre applicazioni

- GPU **già utilizzate** per trigger di alto livello ed analisi (ATLAS, ALICE...), simulazione (BES, FAIR...), calcolo (QCD, reticoli...)
- Fisica Medica (riconoscimento di pattern ed *image processing*), Astrofisica e Cosmologia (N corpi)...
- Altre discipline: statistica, finanza, medicina (genetica), biologia (strutture proteiche)...

Questo lavoro: punto di partenza per l'introduzione di trigger di basso livello basati su GPU in Fisica delle Particelle (mai fatto prima)

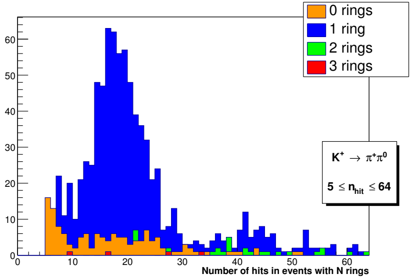
- Identificare anelli Cherenkov in tempo reale $\longrightarrow$ trigger selettivi
- Analisi cinematica di base in tempo reale $\longrightarrow$ architetture "triggerless"

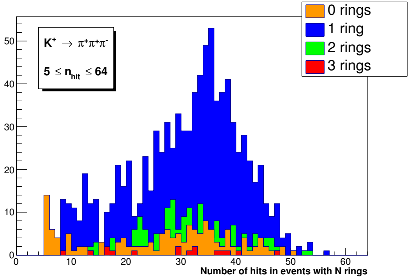
- In **NA62**:
  - Fondi principali **soppressi** di un fattore $\geq 60\%$ oltre al L0 standard
  - possibilità di rilassare il taglio sul numero di particelle cariche
  - costruzione di trigger specifici per altri canali rari

Grazie per l'attenzione!

Slides di supporto

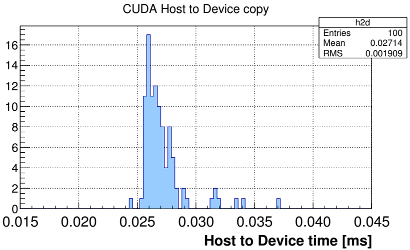
Commenti sulle prestazioni dell'algoritmo

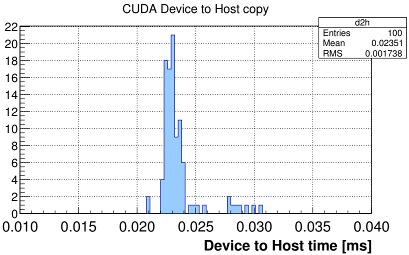


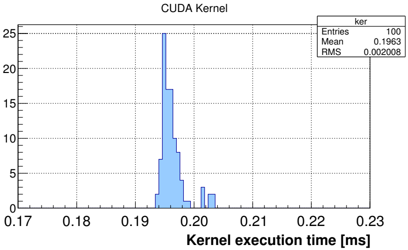


- $\pi^+\pi^0$: inefficienza $\to$ 0 per $n_{hit} \gtrsim 32$
- $\pi^+\pi^+\pi^-$: molti eventi a 2 anelli, ma al crescere di n_{hit} diventa difficile identificarli
- alcuni eventi con 3 anelli identificati. Quanti in realtà?

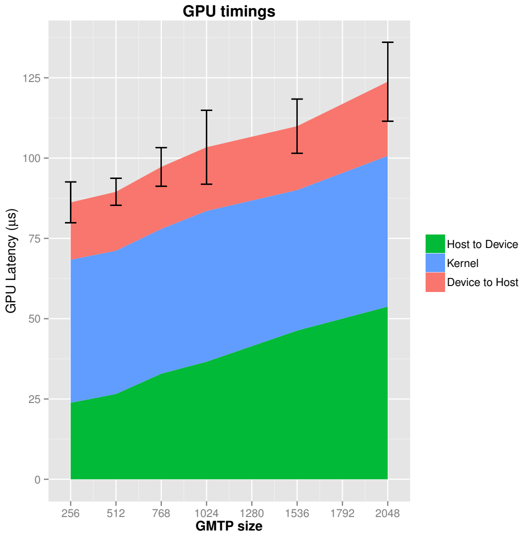
Latenze parziali







Latency tests: single-ring



Preliminary latency tests performed with a **single-ring fitting** kernel.

Il meccanismo GIM

Generalizzazione del principio di universalità di Cabibbo:

$$J_\mu = \bar{u}\,\gamma_\mu\,(1+\gamma_5)\,(\cos\theta d + \sin\theta s)$$

Glashow - Iliopoulos - Maiani

$$J_\mu = \bar{u}\,\gamma_\mu\,(1+\gamma_5)\,\tilde{d} + \bar{c}\,\gamma_\mu\,(1+\gamma_5)\,\tilde{s}$$
$$\tilde{d} = \cos\theta d + \sin\theta s$$
$$\tilde{s} = -\sin\theta d + \cos\theta s$$

- previsto quark c con $q = (2/3)e$
- $J_3 = \left[J, J^\dagger\right]$ diagonale nello spazio dei flavour
- FCNC soppressi a livello albero

La matrice CKM (1)

Si include anche la terza famiglia di quark:

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Nella parametrizzazione di Wolfenstein:

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1-\lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

con:

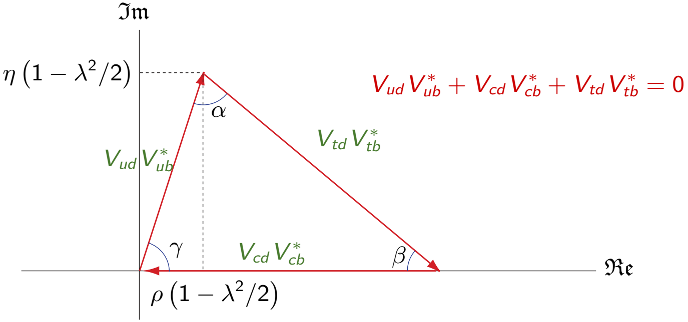
$$A, \lambda > 0$$
$$\lambda = \sin\theta_{12} = \sin\theta_C$$
$$A\lambda^2 = \sin\theta_{23}$$
$$A\lambda^3(\rho - i\eta) = \sin\theta_{13} e^{-i\varphi}$$

La matrice CKM (2)

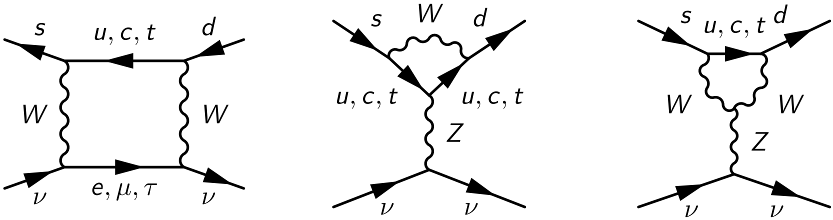
Status sperimentale:

$$\left|V_{CKM}\right| = \begin{pmatrix} 0.97425 \pm 0.00022 & 0.2252 \pm 0.0009 & (4.15 \pm 0.49)\,10^{-3} \\ 0.230 \pm 0.011 & 1.006 \pm 0.023 & (40.9 \pm 1.1)\,10^{-3} \\ (8.4 \pm 0.6)\,10^{-3} & (42.9 \pm 2.6)\,10^{-3} & 0.89 \pm 0.07 \end{pmatrix}$$

Unitarietà $\Longrightarrow$ 9 condizioni, di cui 6 rappresentabili come triangoli sul piano complesso. Ad esempio:



$K \to \pi\nu\bar{\nu}$ (1)



Al primo ordine non nullo:
$A_q \sim \left(m_q^2/m_W^2\right) \Longrightarrow$ domina il quark t (processo a **corto raggio**)

$$H_{\text{eff}} = \frac{\alpha G_F}{2\sqrt{2}\pi \sin^2\theta_W} \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \left(V_{cs}^* V_{cd} X_\ell + V_{ts}^* V_{td} Y_t\right)(\bar{s}d)(\bar{\nu}_\ell \nu_\ell)$$

- X_ℓ ($\ell = e, \mu, \tau$) contributi del quark c
- Y_t contributo del quark t

$K \to \pi\nu\bar{\nu}$ (2)

Grazie alla simmetria di isospin:

$$\frac{BR(K^+ \to \pi^+\nu\bar{\nu})}{BR(K^+ \to \pi^0 e^+ \nu_e)} = \frac{r_K}{\lambda^2}\left\{\left[\Im(V_{ts}^* V_{td})\right]^2 Y_t^2 + \left[\lambda^4 \Re(V_{cs}^* V_{cd}) P_0 + \Re(V_{ts}^* V_{td}) Y_t\right]^2\right\}$$

con:

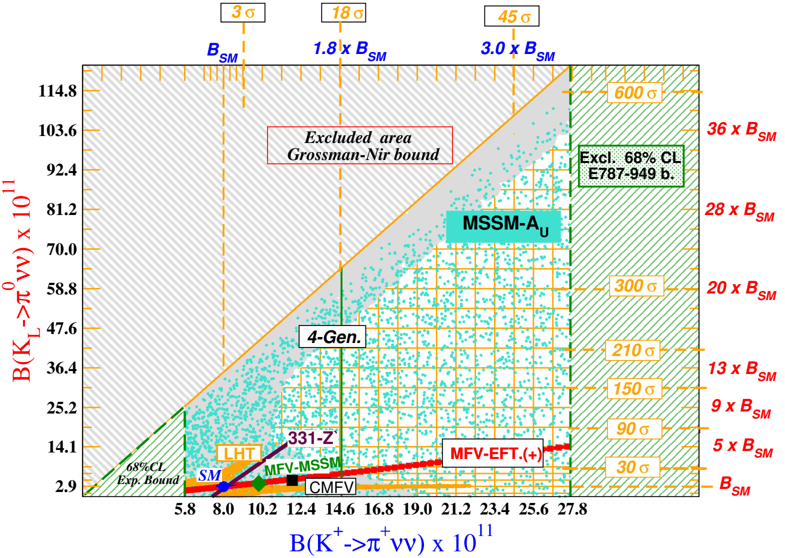
$$BR(K^+ \to \pi^0 e^+ \nu_e) \simeq 5\%$$

$$r_K = 0.901$$

$$P_0 \propto \sum_\ell X_\ell = 0.42 \pm 0.06$$

$$Y_t = 1.469 \pm 0.017 \pm 0.002$$

$K \to \pi\nu\bar{\nu}$ (3)

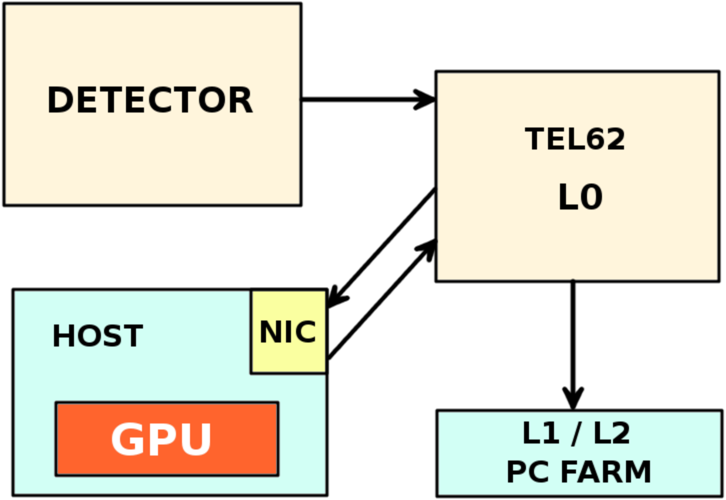


Canali LV / LFV

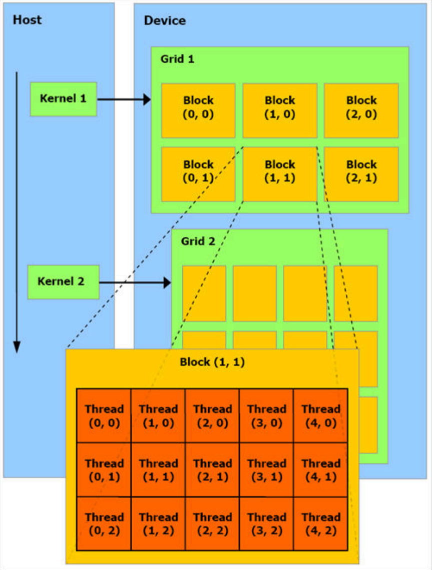
K^+ decay mode	SM violation	Branching ratio at 90% C.L.	Experiment
$\pi^+\mu^+e^-$	LF	$< 1.3 \times 10^{-11}$	BNL E777 – E865
$\pi^+\mu^-e^+$	LF	$< 5.2 \times 10^{-10}$	BNL E865 – CERN NA48/2
$\pi^-\mu^+e^+$	L	$< 5.0 \times 10^{-10}$	BNL E865 – CERN NA48/2
$\pi^-e^+e^+$	L	$< 6.4 \times 10^{-10}$	BNL E865 – CERN NA48/2
$\pi^-\mu^+\mu^+$	L	$< 1.1 \times 10^{-9}$	CERN NA48/2

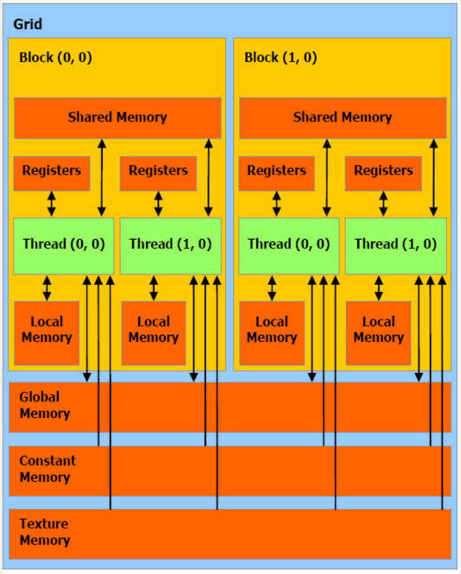
Tabella: Selected Lepton Number (L) and Lepton Flavour Number (LF) violating K^+ decay modes, and current experimental limits

Ambiente di test



Architettura GPU





Selezioni di trigger: numeri

Trigger **standard**: miglioramento della reiezione di $K^+ \to \pi^+\pi^0$ in tempo reale

Definizione di un anello utilizzabile come elemento di trigger:

- raggio "ragionevole": 50 cm $\leq r \leq$ 350 cm
- numero di hit assegnati al candidato: $n > 5$
- frazione di hit assegnati al candidato: $n/n_{hit} > 1/3$
- anelli diversi: $|r_i - r_j| > 1$ cm e distanza tra i centri $d_{ij} > 2$ cm

$\vee$ $N_R > 1$ anelli identificati

$\wedge$ $n_{hit} > 16 + n_{th} \times (N_R - 1)$

$\wedge$ candidati disgiunti: $\sum_i^{N_R} n_i < (n_{hit} + 30\%)$

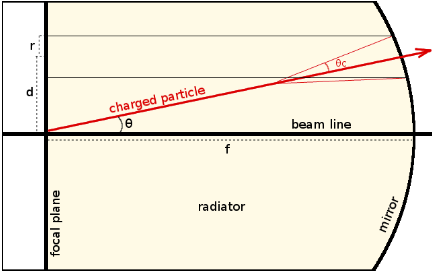
$\vee$ $n \geq 1$ anelli con raggio $r > 17.9$ cm

$\vee$ $n \geq 1$ anelli con cinematica tale che $\delta > 0.002$

$\Longrightarrow$ **Evento scartato**

RICH: formule

- soglia: $\beta_{th} = 1/n$
- ovvero: $p_{th}(m) = m/\sqrt{n^2 - 1}$
- eqn. di Clausius - Mossotti: $(n^2 - 1)/(n^2 + 2) \propto \rho$
- ampiezza cono: $\cos\theta_c = 1/(n\,\beta)$
- misura: $1/\beta = n \cos\left[\arctan(r/f)\right]$
- misura: $\theta = \tan(d/f)$



Misura di impulso:

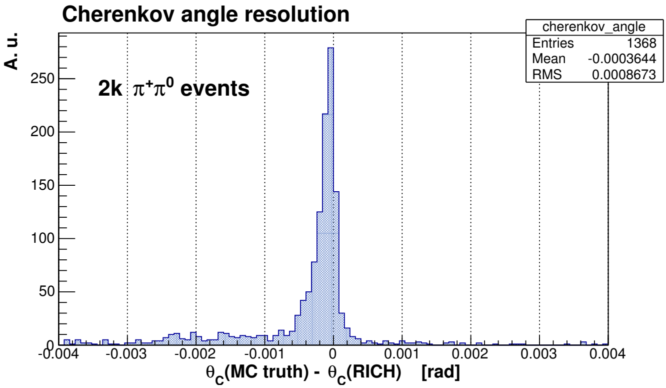
$$p(m, r) \simeq \frac{m\,f}{\sqrt{r_{max}^2 - r^2}}$$

$$r_{max} = f\sqrt{n^2 - 1}$$

$$\Delta p \simeq 1.5\%\, p \;\; \text{(misurata al test beam)}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial r} = \frac{r}{f^2\, n\sqrt{(r/f)^2 + 1}}$$

Risoluzione angolo Cherenkov



Per particelle di impulso elevato, l'angolo di emissione Cherenkov è leggermente sovrastimato.

Ring fitting: parametrizzazione

Parametrizzione **geometrica**:

$$(x - \mathrm{a})^2 + (y - \mathrm{b})^2 - \mathrm{R}^2 = 0$$
$$\mathrm{R} > 0$$

Fit geometrico dei minimi quadrati:

$$r_i(a, b) \equiv \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2}$$
$$\mathcal{F}(a, b, R) = \sum_i (r_i - R)^2$$
$$\hat{R} = \frac{1}{n} \sum_i r_i = \bar{r} \quad \Longrightarrow \quad \mathcal{F}(a, b, \bar{r}) = \sum_i (r_i - \bar{r})^2$$

Parametrizzazione **algebrica**:

$$\mathrm{A}(x^2 + y^2) + \mathrm{B}x + \mathrm{C}y + \mathrm{D} = 0$$
$$\mathrm{A} \neq 0$$
$$\mathrm{B}^2 + \mathrm{C}^2 - 4\mathrm{AD} > 0$$

più un vincolo addizionale (i parametri sono determinabili a meno di una costante).

Ring fitting: algoritmo "math"

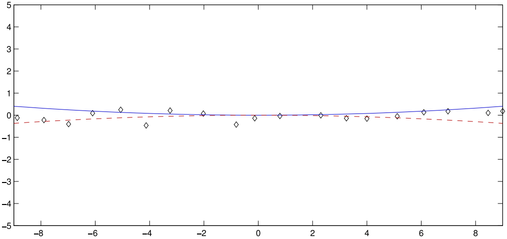
Definendo

$$f_i \equiv (x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2$$

si minimizza la funzione $\mathcal{F}_1 \equiv \sum_i f_i^2$, leggermente diversa dalla precedente $\mathcal{F}$ (si tratta di un fit algebrico). Passando ai parametri algebrici:

$$\mathcal{F}_1 = \sum_i \left(x_i^2 + y_i^2 + Bx_i + Cy_i + D\right)^2$$

Scarsa robustezza rispetto al raggio dell'anello: $f_i = (r_i - R) \times (r_i + R)$



Ring fitting: algoritmo di Taubin

Definiamo $d_i = r_i - R$ e $D_i = r_i + R$. Se i punti sono vicini al cerchio:

$$\left.\begin{array}{l} D_i = d_i + 2R \\ |d_i| \ll R \end{array}\right\} \Longrightarrow \mathcal{F}_1 \approx 4R^2 \sum_i d_i^2 \equiv \mathcal{F}_2$$

Dalla naturale assunzione $|d_i| \ll R$ segue

$$R^2 \approx \frac{1}{n} \sum_i (R + d_i)^2 = \frac{1}{n} \sum_i \left[(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2\right] = \frac{1}{n} \sum_i r_i^2$$

$$\mathcal{F}_2 = \left(\frac{4}{n} \sum_i r_i^2\right) \times \left(\sum_i d_i^2\right) \equiv \mathcal{F}_r \times \mathcal{F}_d$$

Vogliamo minimizzare il secondo fattore. Usiamo quindi come funzione minimizzanda $\mathcal{F}_d \approx \mathcal{F}_1 / \mathcal{F}_r$, che equivale a minimizzare

$$\mathcal{F}_3 \equiv \sum_i \left[A(x_i^2 + y_i^2) + Bx_i + Cy_i + D\right]^2$$

con il vincolo $4A^2(x_i^2 + y_i^2) + 4ABx_i + 4ACy_i + B^2 + C^2 = 1$.

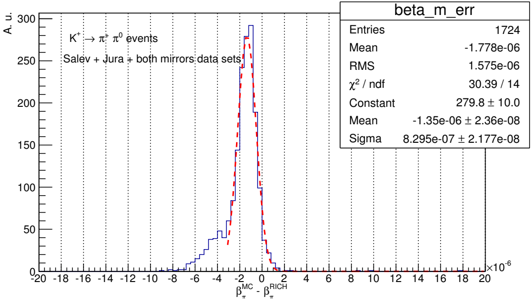
RICH reconstruction

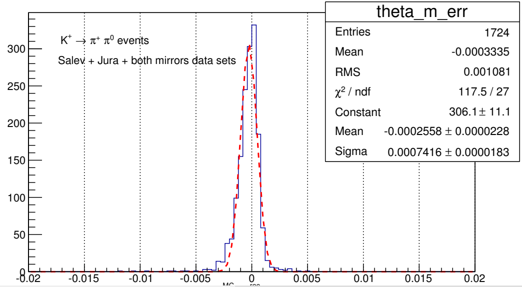
Geometry:

1. correct mirrors tilt (hit by hit)
2. shift $X_{\rm center}$ of the fitted ring according to RICH rotation around the $y-$axis

Propagation:

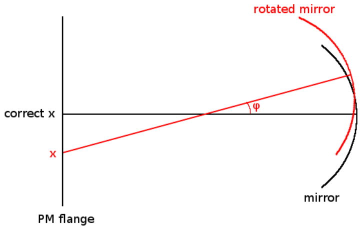
1. Spectrometer magnet: compute $P_{\rm kick}$ assuming particle is a π^+
2. GTK magnet: subtract 12 mrad from $\theta_{K\pi}$





Geometry: mirrors tilt

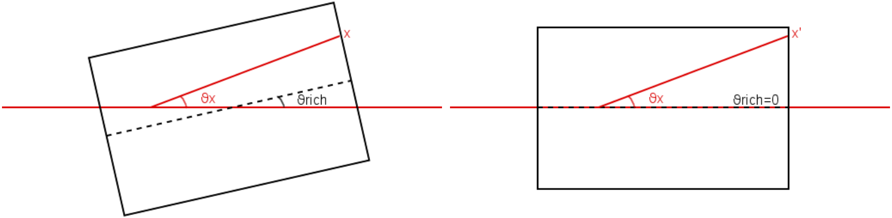
Mirrors are tilted by different angles ϕ, ϕ' w.r.t. the RICH axis. Hit by hit, we check **which** spot was hit and apply a **corrective shift** to the coordinates of the firing PMT. Ring fitting is then performed on the new coordinate sets.




```
TVector2 RICHReconstruction::computeHitCorrection(Int_t ChId)
{
  TVector2 corrections(0,0);
  TVector2 beta(0,0);                          // TVector2, in case we need a vertical rotation
  if(ChId < (fNChannels/2))
      beta = fJuraRotation;  //(0.0027316, 0)
  else
      beta = fSalevRotation;  //(0.00427106, 0)
  corrections.Set(beta.X() * fFocalLenght * 2 , beta.Y() * fFocalLenght);          // f = R/2
  return corrections;
}
```

```
TVector2 hitCorrection = computeHitCorrection(fiHitCh[iHitCh]);              // ...fitting...
hitPositions.push_back( Position - hitCorrection );
Xcog += ( Position - hitCorrection ).X() ;                                   //center of gravity
Ycog += ( Position - hitCorrection ).Y() ;
```

Geometry: RICH alignment



- The particle **direction** is computed **w.r.t. the RICH frame**
- Detector placed at an angle θ_{rich} w.r.t. the lab frame
- Perform the ring fit, **then** apply a corrective shift to the **ring center**:

$$\tan\theta'_x = \frac{x}{f} \qquad (f = \text{focal length}) \qquad \theta'_x = \text{ angle w.r.t. the RICH axis}$$

$$\theta_x = \theta'_x + \theta_{rich} = \arctan\frac{x}{f} + \theta_{rich} \qquad \theta_x = \text{ angle w.r.t. the lab } z\text{-axis}$$

$$\tan\theta_x = \frac{x'}{f} \Longrightarrow \mathbf{x' = f\tan\left(\arctan\frac{x}{f} + \theta_{rich}\right)} \qquad \text{new center position}$$

Backwards propagation

Geometry: hit-by-hit and ring-wide corrective shifts $x \to x'$ (with INFN Firenze)

- ring radius $r \longrightarrow \mathbf{1/\beta = n \cos[\arctan(r/f)]}$
- ring center (x', y)

1. Compute the components of the particle direction:

$$\theta_x = \arctan(x'/f) \qquad \theta_y = \arctan(y/f)$$

2. **assume** the detected particle is a π^+.
3. **propagate** the track backwards across MNP33, and compute the direction of the particle w.r.t. that of the decaying beam K^+:
   - compute $\theta_{kick} = P_{kick}/P(\beta)$
   - propagate $(\theta_{K\pi})_x = \theta_x - \theta_{kick} - \theta_K$
   - obtain $\boldsymbol{(\theta_{K\pi})^2 = \left[(\theta_{K\pi})_x\right]^2 + \theta_y^2}$
4. variables β and $\boldsymbol{\theta_{K\pi}}$ available for the definition of a selection algorithm

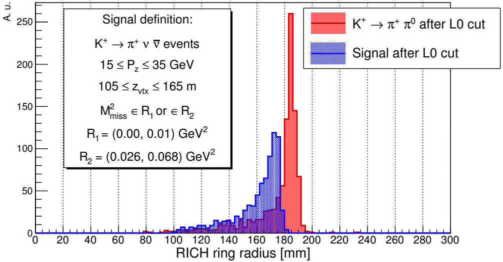
$$P_{kick} = -270 \text{ MeV/c} \qquad \theta_K = +0.0012 \text{ rad}$$

Kinematic rejection of $\pi^+\pi^0$

Signal $(\pi\nu\bar{\nu})$:

$$15 \leq P_z \leq 35\,\text{GeV}$$

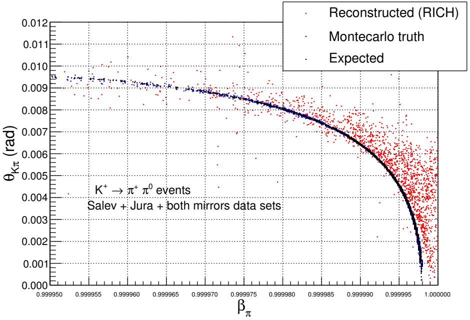
- $\exists$ a maximum Čerenkov cone aperture
- trigger on $\mathbf{R} \leq \mathbf{R_{th}}$

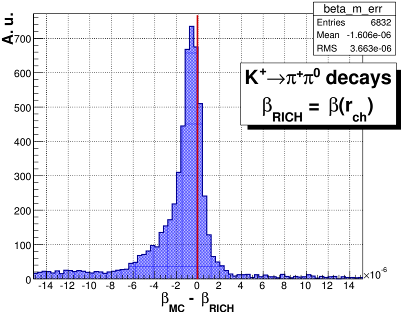


$R_{\rm th}$ (mm)	Signal efficiency	RICH only	RICH after L0	RICH and L0
176.0	0.926	0.634	**0.701**	0.930
177.0	0.960	0.613	**0.683**	0.926
177.5	0.971	0.598	**0.677**	0.925
178.0	0.976	0.585	**0.670**	0.923
178.5	0.983	0.568	**0.660**	0.921
179.0	0.986	0.552	**0.648**	0.918
179.5	0.990	0.533	**0.638**	0.915
180.0	0.995	0.513	**0.620**	0.912
181.0	0.996	0.470	**0.590**	0.904

Computational limits

- slight reconstruction **asymmetry** in β, overestimated (at least for high-energy pions): **not yet completely understood**
- it results in an error in $\theta_{K\pi}$ through $P(\beta)$ and $P_{kick}(P)$
- β, $\theta_{K\pi}$ functionally dependent in 2-body decay $\longrightarrow$ strong **correlation**
- **errors "explode"** when computing $f(\beta, \theta_{K\pi})$, e.g. $M^2_{\mathrm{miss}}(K^+, \pi^+)$





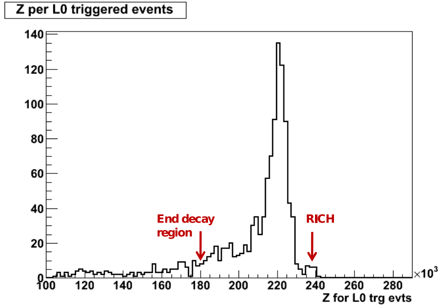
$\pi^+\pi^0$ rejection at L1

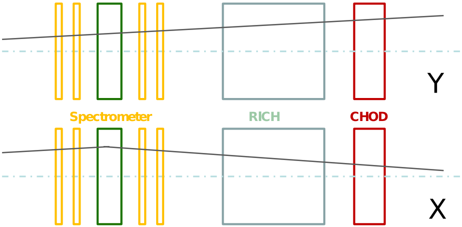
Possibility: use **CHOD and RICH** together to trace back the decay vertex.

$\pi^+\pi^0$ surviving L0 are produced **far from the fiducial decay region**

$\Downarrow$

$\sim$80% can be cut without affecting the signal even with limited z_{vtx} resolution (G. Lamanna – 2011).





NVIDIA Tesla K20c GPU: specifiche tecniche

```
Device 0:  Tesla K20c
CUDA Driver Version / Runtime Version 5.0 / 5.0
CUDA Capability Major/Minor version number:  3.5
Total amount of global memory:  4800 MBytes (5032706048 bytes)
(13) Multiprocessors x (192) CUDA Cores/MP: 2496 CUDA Cores
GPU Clock rate:  706 MHz (0.71 GHz)
Memory Clock rate:  2600 Mhz
Memory Bus Width:  320-bit
L2 Cache Size:  1310720 bytes
Max Texture Dimension Size (x,y,z) 1D=(65536), 2D=(65536,65536), 3D=(4096,4096,4096)
Max Layered Texture Size (dim) x layers 1D=(16384) x 2048, 2D=(16384,16384) x 2048
Total amount of constant memory:  65536 bytes
Total amount of shared memory per block:  49152 bytes
Total number of registers available per block:  65536
Warp size:  32
Maximum number of threads per multiprocessor:  2048
Maximum number of threads per block:  1024
Maximum sizes of each dimension of a block:  1024 x 1024 x 64
Maximum sizes of each dimension of a grid:  2147483647 x 65535 x 65535
Maximum memory pitch:  2147483647 bytes
Texture alignment:  512 bytes
Concurrent copy and kernel execution:  Yes with 2 copy engine(s)
Run time limit on kernels:  No
Integrated GPU sharing Host Memory:  No
Support host page-locked memory mapping:  Yes
Alignment requirement for Surfaces:  Yes
Device has ECC support:  Enabled
Device supports Unified Addressing (UVA): Yes
Device PCI Bus ID / PCI location ID: 132 / 0
Compute Mode:
< Default (multiple host threads can use ::cudaSetDevice() with device simultaneously) >
deviceQuery, CUDA Driver = CUDART, CUDA Driver Version = 5.0, CUDA Runtime Version = 5.0, NumDevs = 1, Device0 = Tesla K20c
```