

**Simone Valdré**

INFN – Sezione di Firenze

Identificazione di  
particelle cariche  
tramite tempo di volo  
in FAZIA

**Consiglio di Sezione**

Sesto Fiorentino, 10 gennaio 2020



# Progetto FURBO

## FAZIA Upgrade for Radioactive Beam Operation (Grant INFN per neoassunti)

# Progetto FURBO

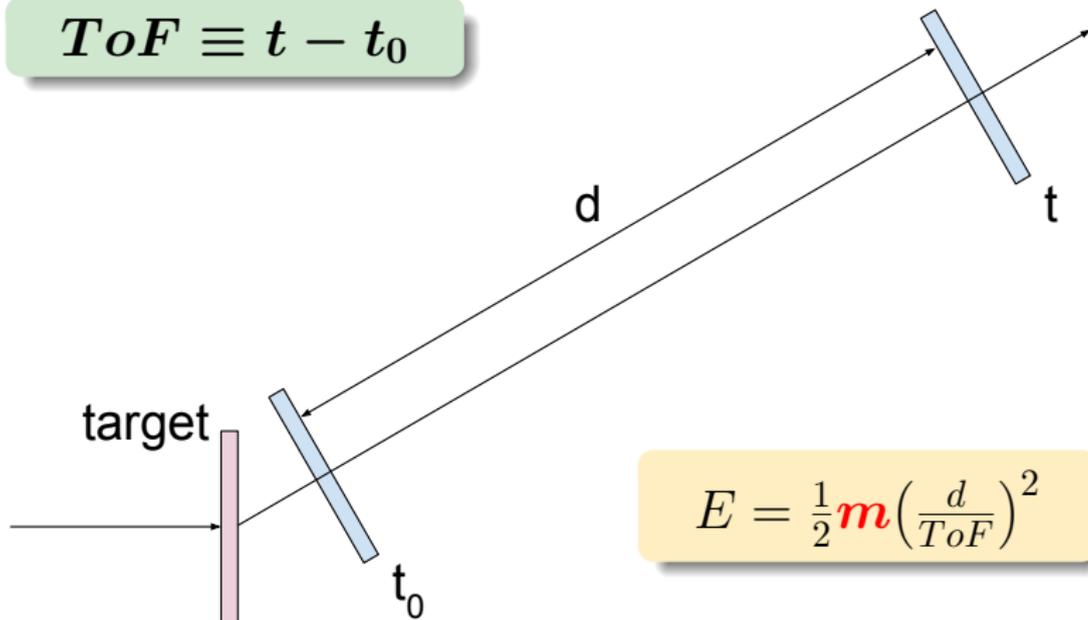
## FAZIA Upgrade for Radioactive Beam Operation (Grant INFN per neoassunti)

### Riduzione delle soglie di identificazione

- Fondamentale per misurare con fasci ISOL (SPES, Spiral2, . . .)
- Studio della fisica del quasi-target
- Investigate alcune possibili soluzioni:
  - implementazione del **tempo di volo** (questo lavoro)
  - uso di rivelatori al silicio **sottili** come primo stadio
  - uso di rivelatori **alternativi**

# Identificazione tramite tempo di volo (ToF)

$$ToF \equiv t - t_0$$

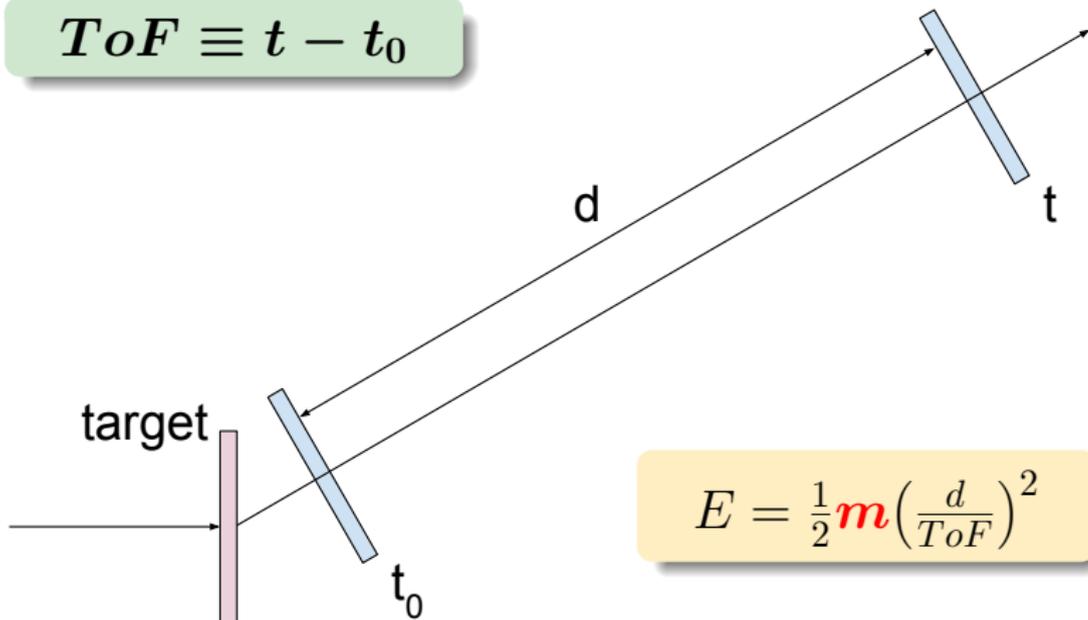


$$E = \frac{1}{2} m \left( \frac{d}{ToF} \right)^2$$

**Massa delle particelle dal ToF e dall'energia**

# Identificazione tramite tempo di volo (ToF)

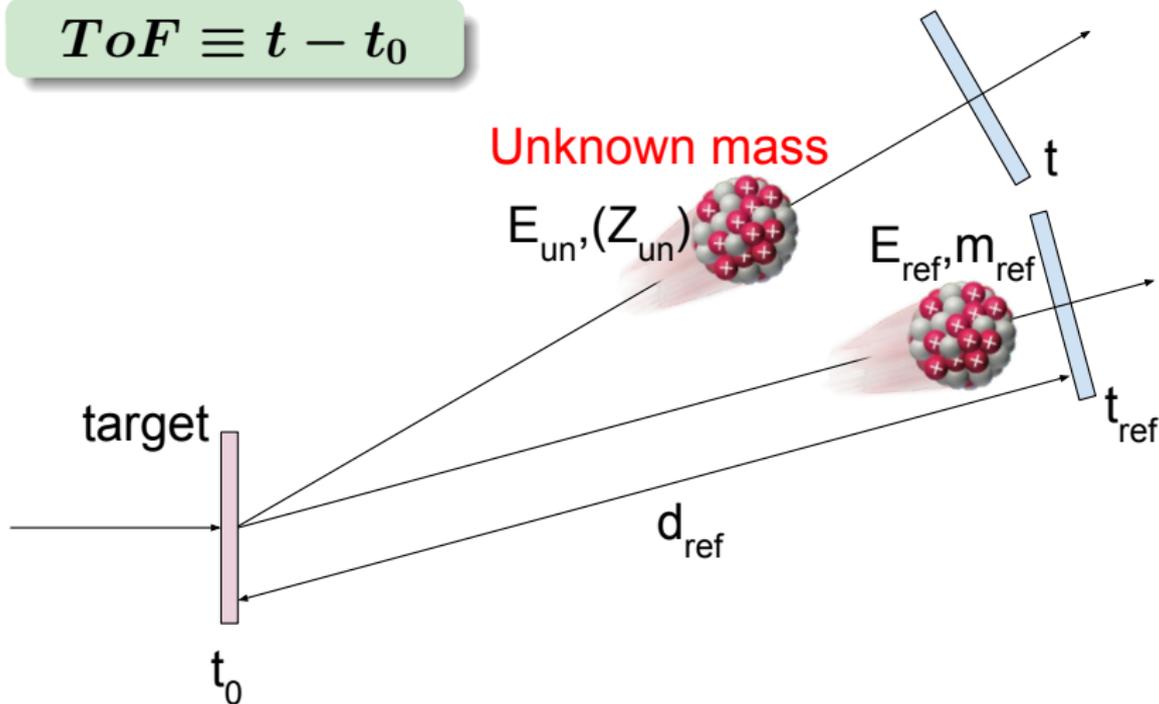
$$ToF \equiv t - t_0$$



Necessaria una marca di tempo di **start!**

# Identificazione tramite ToF (eventi con $M > 1$ )

$$ToF \equiv t - t_0$$

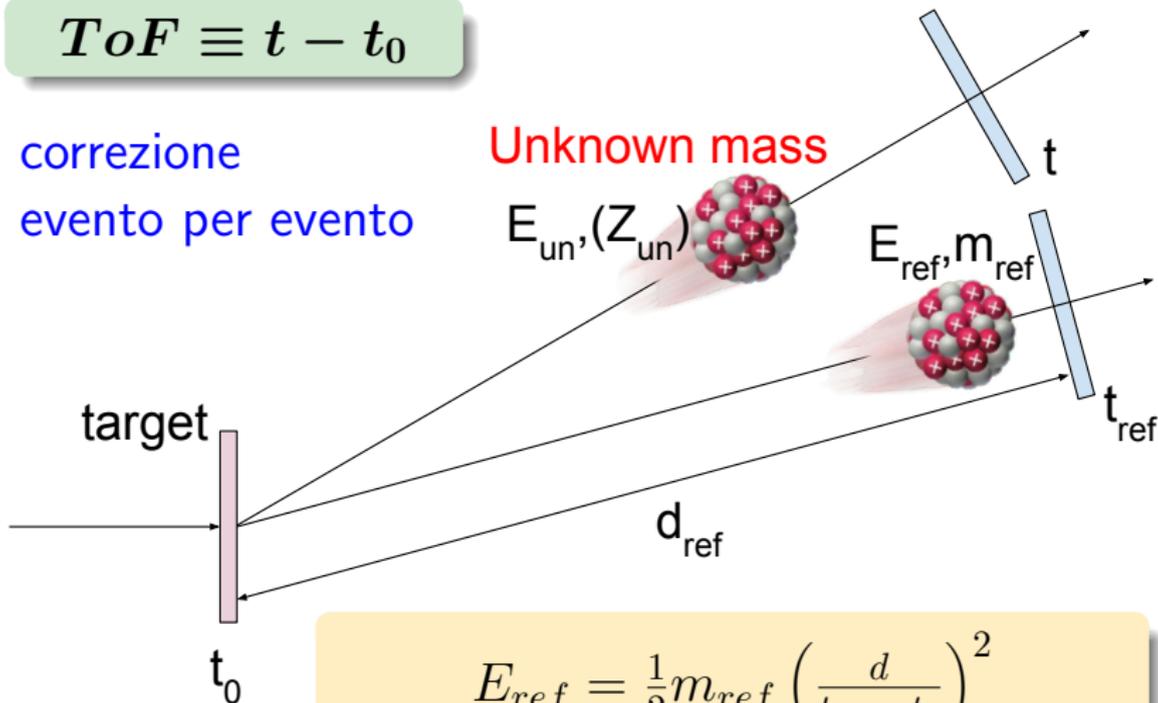


Soluzione **senza rivelatore di start**

# Identificazione tramite ToF (eventi con $M > 1$ )

$$ToF \equiv t - t_0$$

correzione  
evento per evento

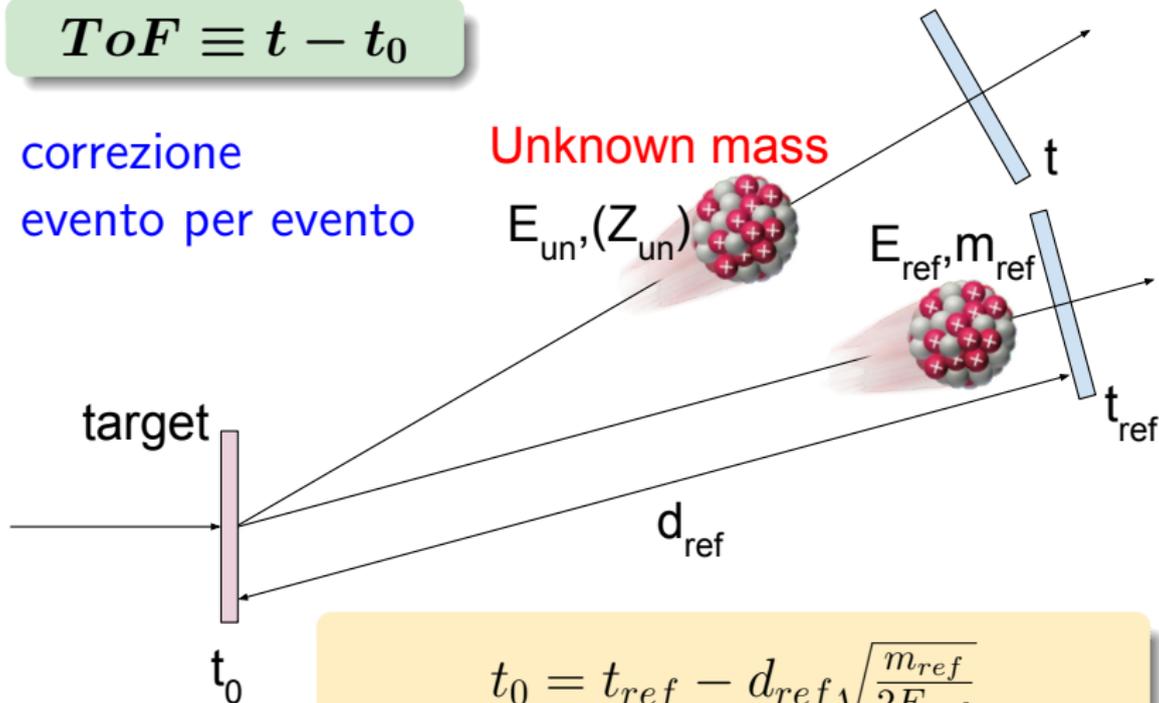


$$E_{ref} = \frac{1}{2} m_{ref} \left( \frac{d}{t_{ref} - t_0} \right)^2$$

# Identificazione tramite ToF (eventi con $M > 1$ )

$$ToF \equiv t - t_0$$

correzione  
evento per evento

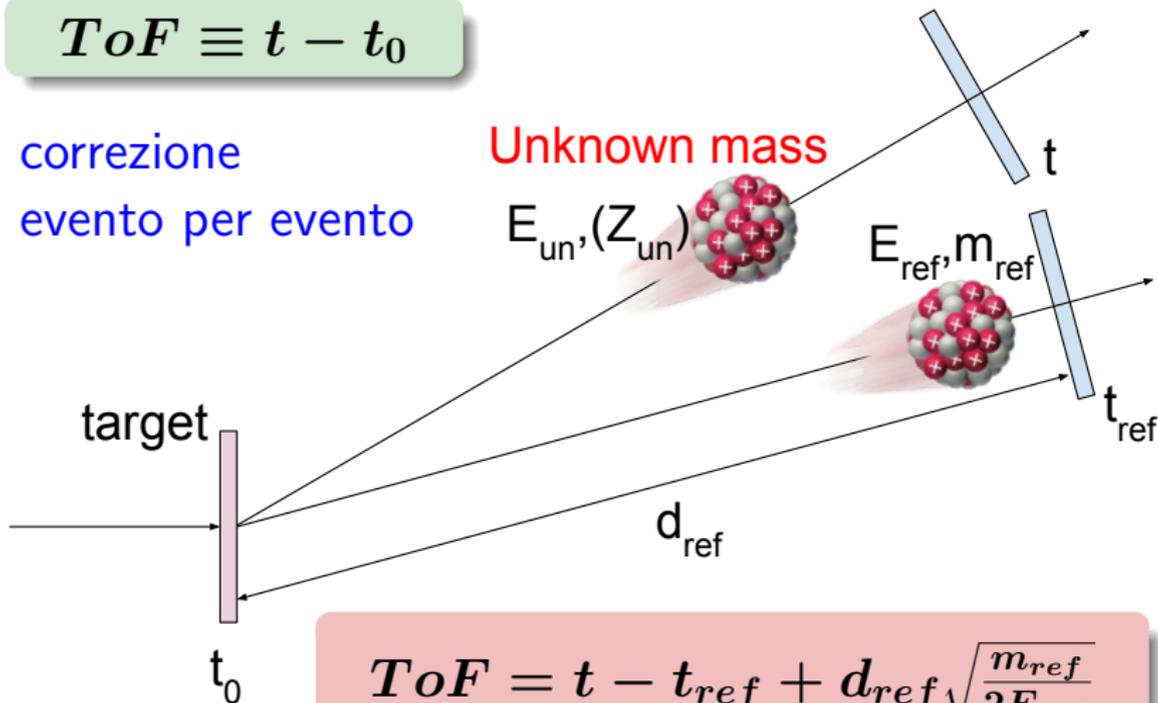


$$t_0 = t_{ref} - d_{ref} \sqrt{\frac{m_{ref}}{2E_{ref}}}$$

# Identificazione tramite ToF (eventi con $M > 1$ )

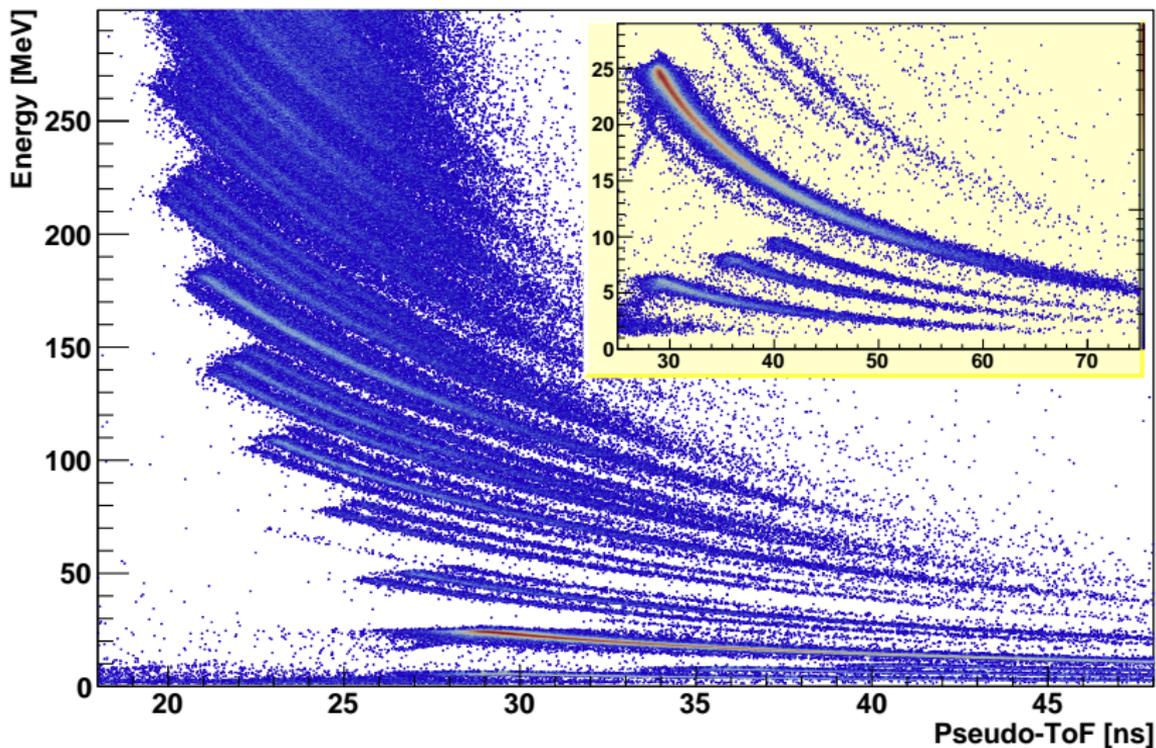
$$ToF \equiv t - t_0$$

correzione  
evento per evento



$$ToF = t - t_{ref} + d_{ref} \sqrt{\frac{m_{ref}}{2E_{ref}}}$$

# Identificazione tramite ToF



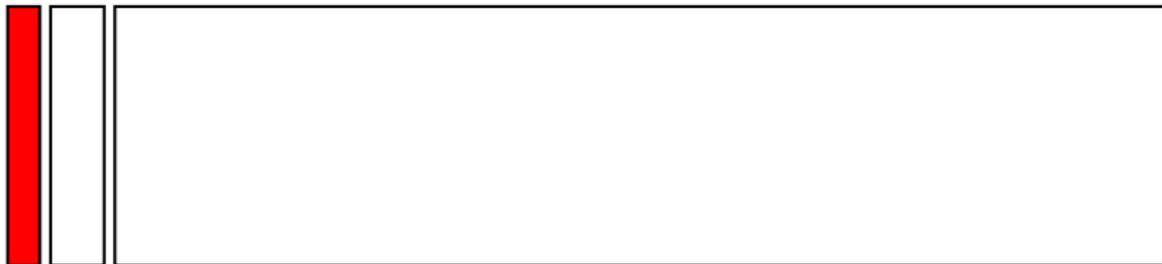
“Spoiler” delle capacità di discriminazione

# Il telescopio FAZIA

## Gli stadi del telescopio

- 1 rivelatore al Si da 300  $\mu\text{m}$  (reverse-mounted);
- 2 rivelatore al Si da 500  $\mu\text{m}$  (reverse-mounted);
- 3 cristallo CsI(Tl) da 10 cm letto da fotodiode.

*Per ottenere la migliore risoluzione energetica e identificazione in  $Z$  e  $A$  i rivelatori al Si sono prodotti da un lingotto  $nTD$  tagliato ad un angolo "random" per evitare effetti di channeling.*

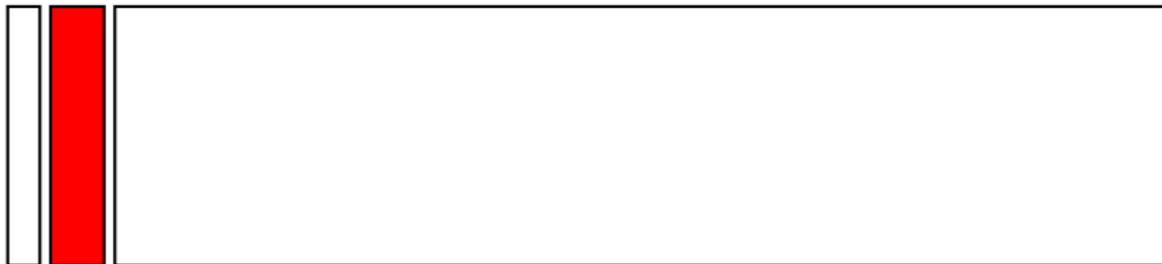


# Il telescopio FAZIA

## Gli stadi del telescopio

- 1 rivelatore al Si da 300  $\mu\text{m}$  (reverse-mounted);
- 2 rivelatore al Si da 500  $\mu\text{m}$  (reverse-mounted);
- 3 cristallo CsI(Tl) da 10 cm letto da fotodiode.

*Per ottenere la migliore risoluzione energetica e identificazione in  $Z$  e  $A$  i rivelatori al Si sono prodotti da un lingotto  $nTD$  tagliato ad un angolo "random" per evitare effetti di channeling.*



# Il telescopio FAZIA

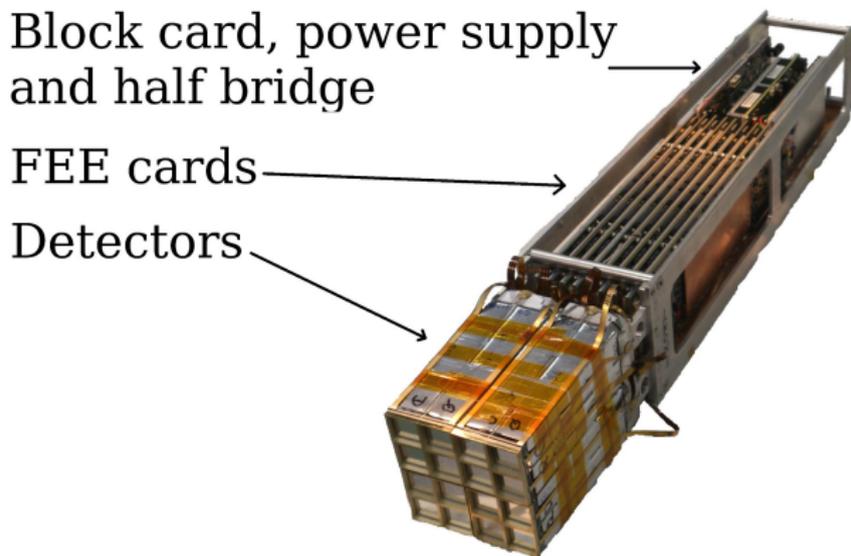
## Gli stadi del telescopio

- 1 rivelatore al Si da 300  $\mu\text{m}$  (reverse-mounted);
- 2 rivelatore al Si da 500  $\mu\text{m}$  (reverse-mounted);
- 3 **cristallo CsI(Tl) da 10 cm letto da fotodiodo.**

*Per ottenere la migliore risoluzione energetica e identificazione in  $Z$  e  $A$  i rivelatori al Si sono prodotti da un lingotto  $nTD$  tagliato ad un angolo "random" per evitare effetti di channeling.*



## Il blocco FAZIA



***16 telescopi**, con le schede di **front-end**,  
formano un **blocco** che opera in **vuoto**.*

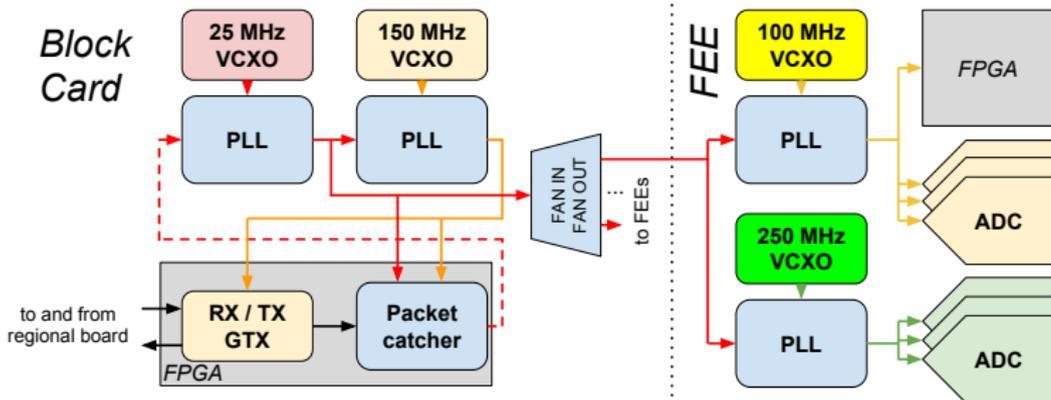
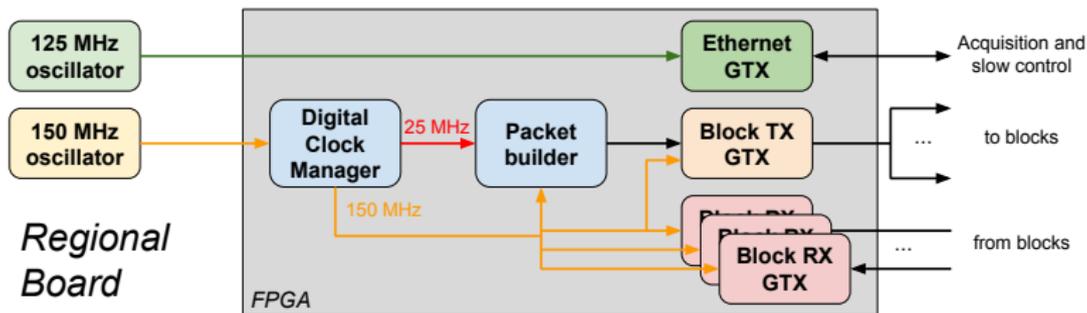
# Elettronica di front-end

- Catena analogica: preamplificatori di carica e filtri anti-aliasing
- I segnali sono subito digitalizzati con ADC a **14-bit**:
  - elaborazione on-line su FPGA
  - risoluzione energetica migliore dell'1 %  
da 5 MeV a 4 GeV

# Elettronica di front-end

- Catena analogica: preamplificatori di carica e filtri anti-aliasing
- I segnali sono subito digitalizzati con ADC a **14-bit**:
  - elaborazione on-line su FPGA
  - risoluzione energetica migliore dell'1 %  
da 5 MeV a 4 GeV
- **distribuzione comune del clock per campionamento sincrono**

# Elettronica di front-end



# Elettronica di front-end

- Catena analogica: preamplificatori di carica e filtri anti-aliasing
- I segnali sono subito digitalizzati con ADC a **14-bit**:
  - elaborazione on-line su FPGA
  - risoluzione energetica migliore dell'1 %  
da 5 MeV a 4 GeV
- distribuzione comune del clock per campionamento **sincrono**



- Compattezza e modularità
- Ottima discriminazione isotopica
- Soglie (2–10 MeV/u) adatte alle energie di Fermi

# Metodi di identificazione

## Correlazione $\Delta E - E$

- sfrutta il meccanismo di perdite di Bethe-Bloch
- soglia di energia legata allo spessore del primo stadio

## Pulse Shape Discrimination<sup>a</sup>

- la raccolta della carica dipende dal nucleo incidente
- soglia di identificazione di 100–200  $\mu\text{m}$  di penetrazione

---

<sup>a</sup> N. Le Neindre *et al*, Nucl. Instr. and Meth. A 701 (145), 2013

# Metodi di identificazione

## Correlazione $\Delta E - E$

- sfrutta il meccanismo di perdite di Bethe-Bloch
- soglia di energia legata allo spessore del primo stadio

## Pulse Shape Discrimination<sup>a</sup>

- la raccolta della carica dipende dal nucleo incidente
- soglia di identificazione di 100–200  $\mu\text{m}$  di penetrazione

## Correlazione $E - ToF$

- implementazione in FAZIA descritta qui
- soglie di identificazione minime

<sup>a</sup> N. Le Neindre *et al*, Nucl. Instr. and Meth. A 701 (145), 2013

# Tempo di volo con FAZIA

Non il primo apparato per ioni pesanti ad implementare il ToF<sup>a</sup>

---

<sup>a</sup> F. Amorini *et al*, IEEE T. Nucl. Sci. 55 (717), 2008

# Tempo di volo con FAZIA

Non il primo apparato per ioni pesanti ad implementare il ToF<sup>a</sup>

## Le nostre sfide:

- rivelatori di **grande area** ( $2 \times 2 \text{ cm}^2$ ) e **reverse-mounted**;
- segnali **rallentati** dal filtro anti-aliasing;
- marche di tempo estratte da segnali **campionati** a 250 MS/s;
- non utilizzo del segnale di radio-frequenza dell'acceleratore;
- base di volo **corta** (1 m).

---

<sup>a</sup> F. Amorini *et al*, IEEE T. Nucl. Sci. 55 (717), 2008

## Estrazione della marca di tempo

Dopo alcuni test si è deciso di adottare un algoritmo **ARC-CFD**<sup>a</sup> digitale con  $t_D = 20 \text{ ns}$  e  $f = 20 \%$

---

<sup>a</sup> Anche se il CFD è compensato, rimane una dipendenza residua dalla forma del segnale, per cui discriminiamo gli ioni sia in **massa**, sia in **carica**

# Estrazione della marca di tempo

Dopo alcuni test si è deciso di adottare un algoritmo **ARC-CFD<sup>a</sup>** digitale con  $t_D = 20 \text{ ns}$  e  $f = 20 \%$

La marca di tempo in FAZIA è estratta dal segnale acquisito:

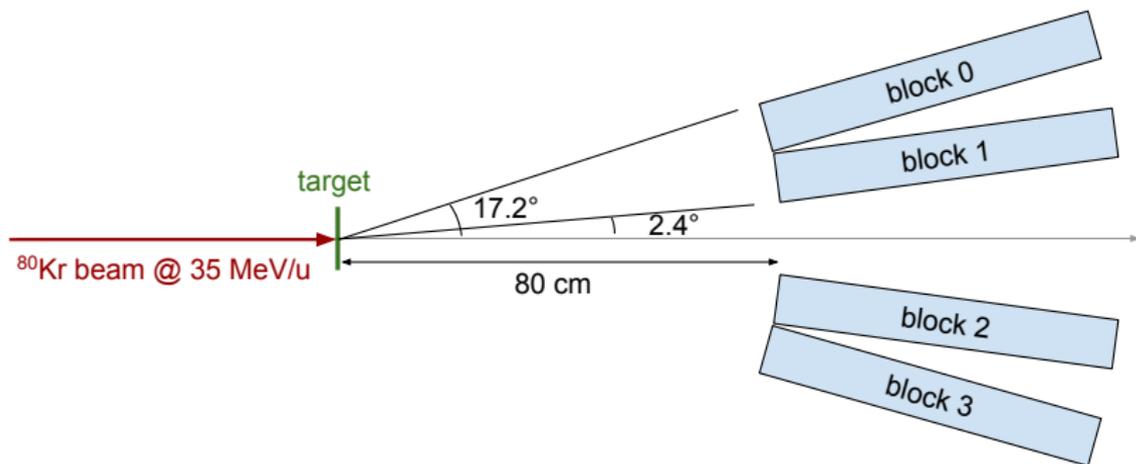
- segnale ad **alto guadagno** del primo stadio (range di  $\sim 300 \text{ MeV}$ , 14-bit @ 250 MS/s);
- tutti i segnali sono riferiti al medesimo tempo di validazione, un offset che varia evento per evento:

$$t^{(\text{ev,det})} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev,det})} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})}$$

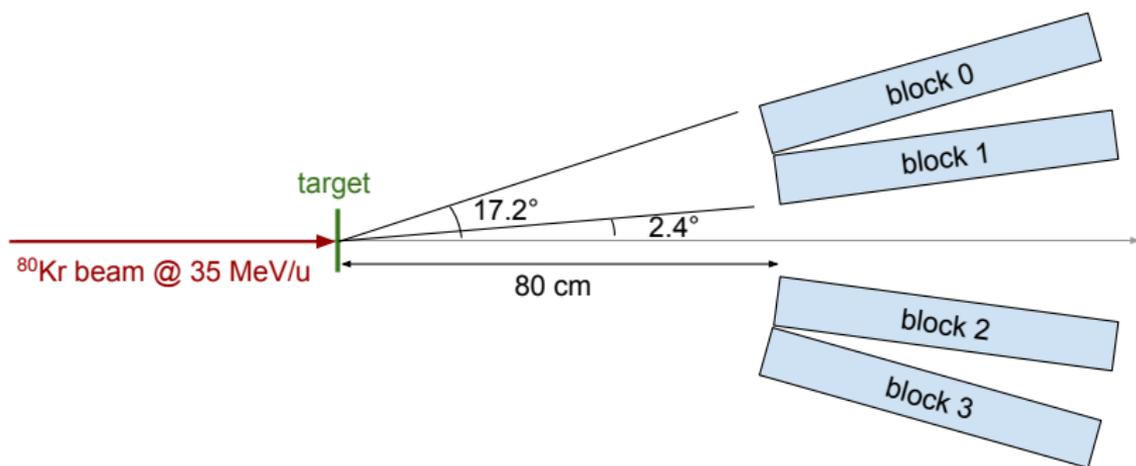
---

<sup>a</sup> Anche se il CFD è compensato, rimane una dipendenza residua dalla forma del segnale, per cui discriminiamo gli ioni sia in **massa**, sia in **carica**

# Esperimento ISOFAZIA a LNS

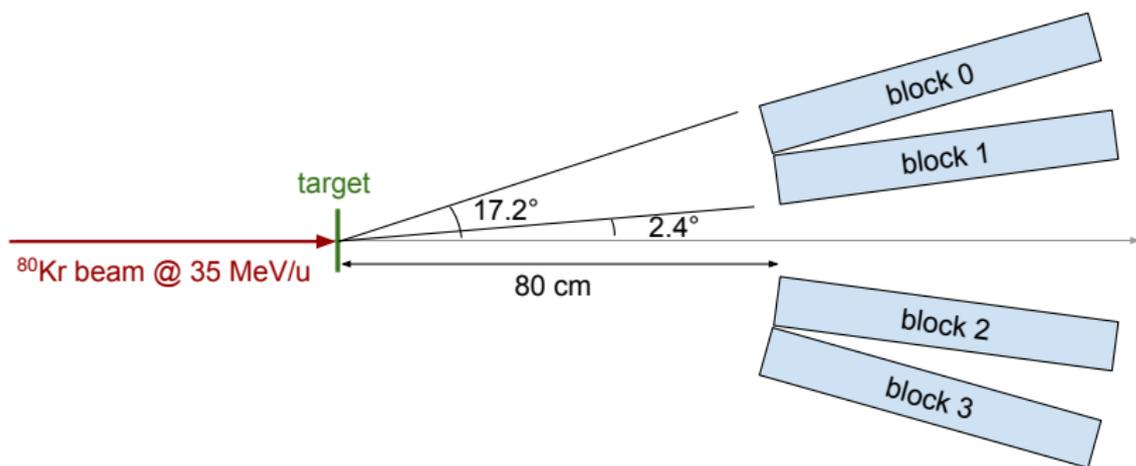


# Esperimento ISOFAZIA a LNS



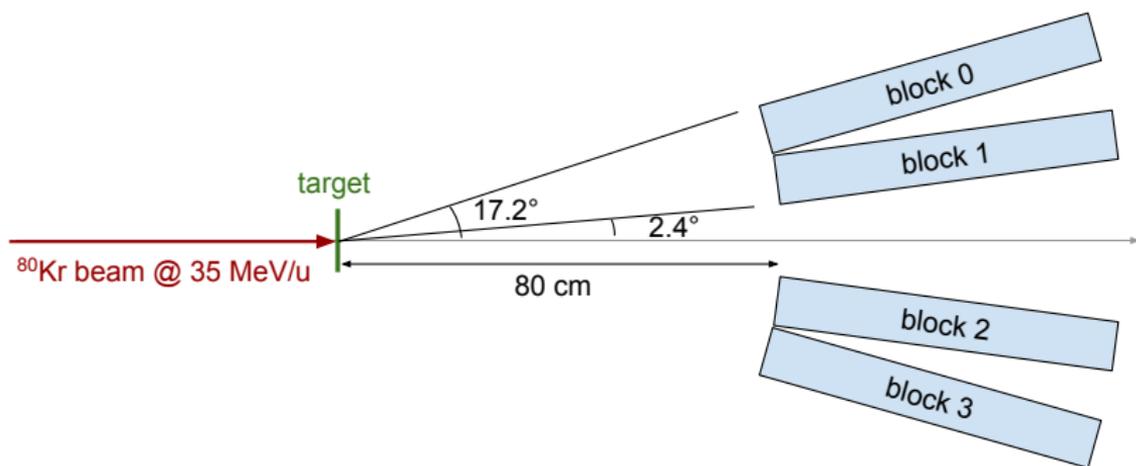
- Primo esperimento FAZIA *physics oriented*

# Esperimento ISOFAZIA a LNS



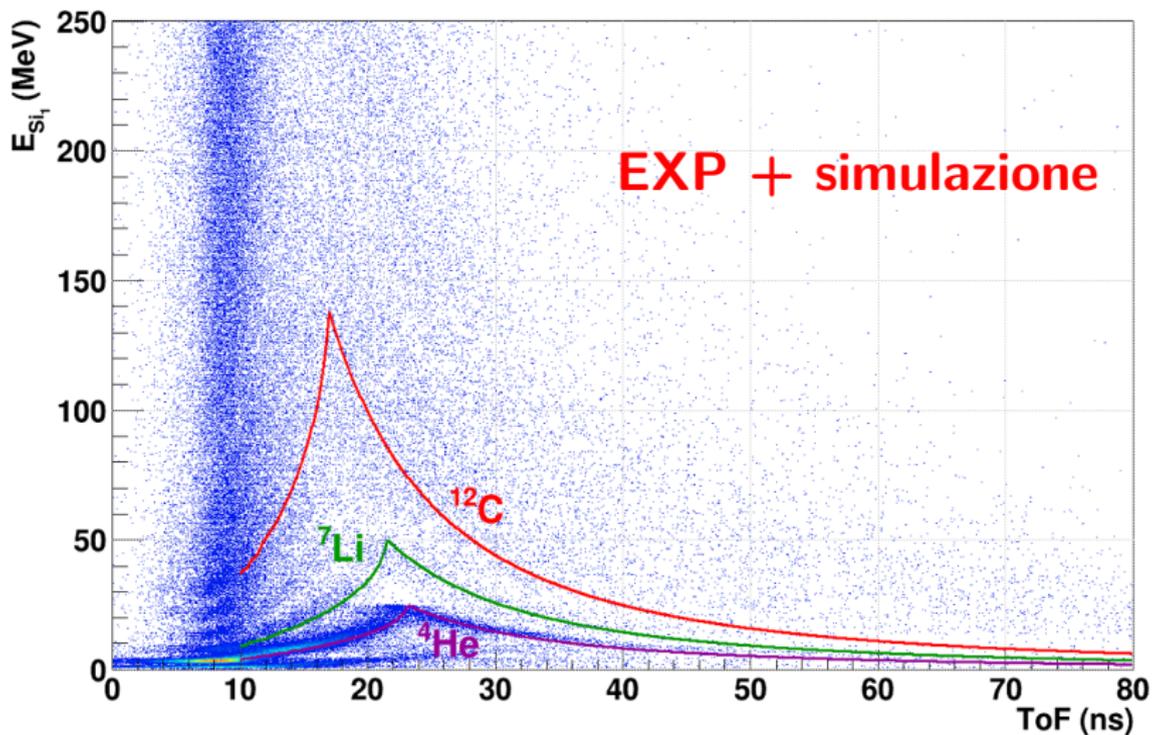
- Primo esperimento FAZIA *physics oriented*
- Interamente calibrato con ID in massa fino a  $Z \sim 24$

# Esperimento ISOFAZIA a LNS

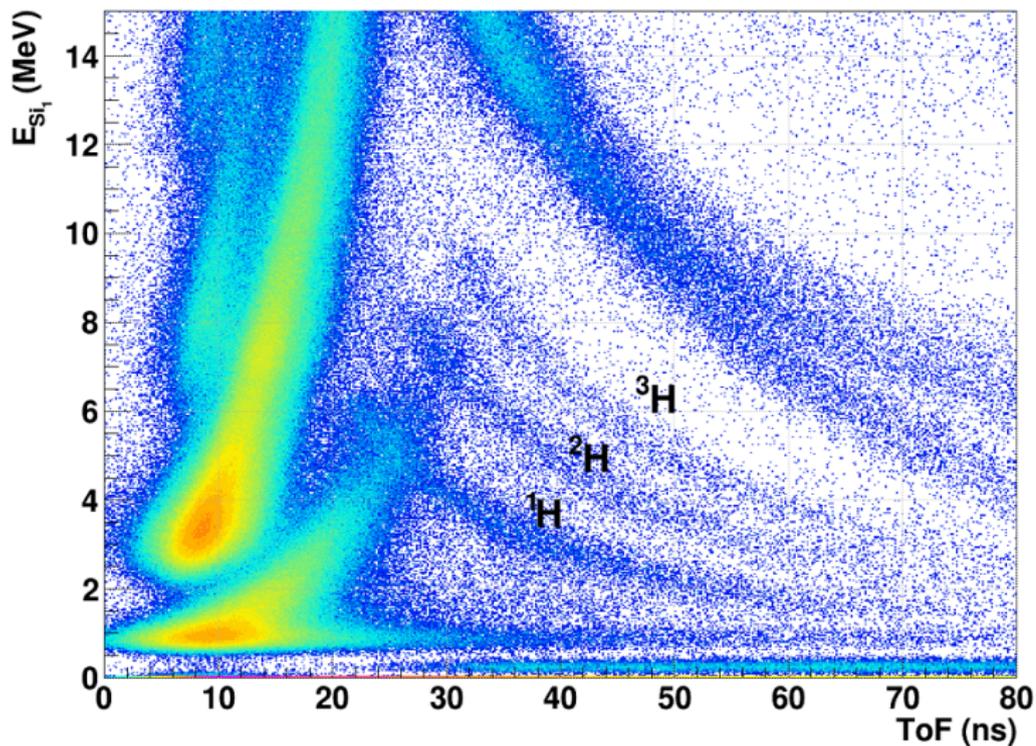


- Primo esperimento FAZIA *physics oriented*
- Interamente calibrato con ID in massa fino a  $Z \sim 24$
- Molti eventi con almeno una particella completamente caratterizzata che permette di recuperare  $t_0$

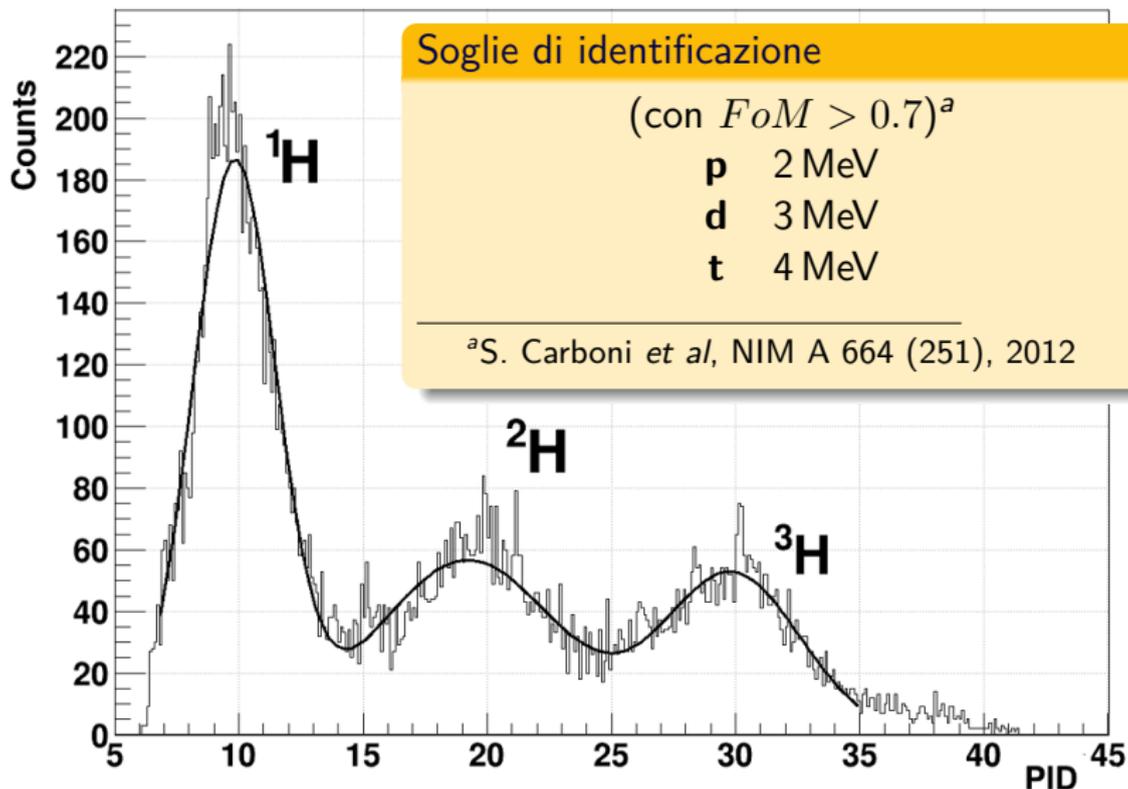
# Esperimento ISOFAZIA a LNS



# Esperimento ISOFAZIA a LNS



# Esperimento ISOFAZIA a LNS



# Esperimento ISOFAZIA a LNS

p,d,t fermati nel primo stadio di Si

- PSD non risolve gli isotopi per  $Z < 3$
- $E - ToF$  permette di recuperare la massa per  $Z = 1$  fino a 2 MeV

# Esperimento ISOFAZIA a LNS

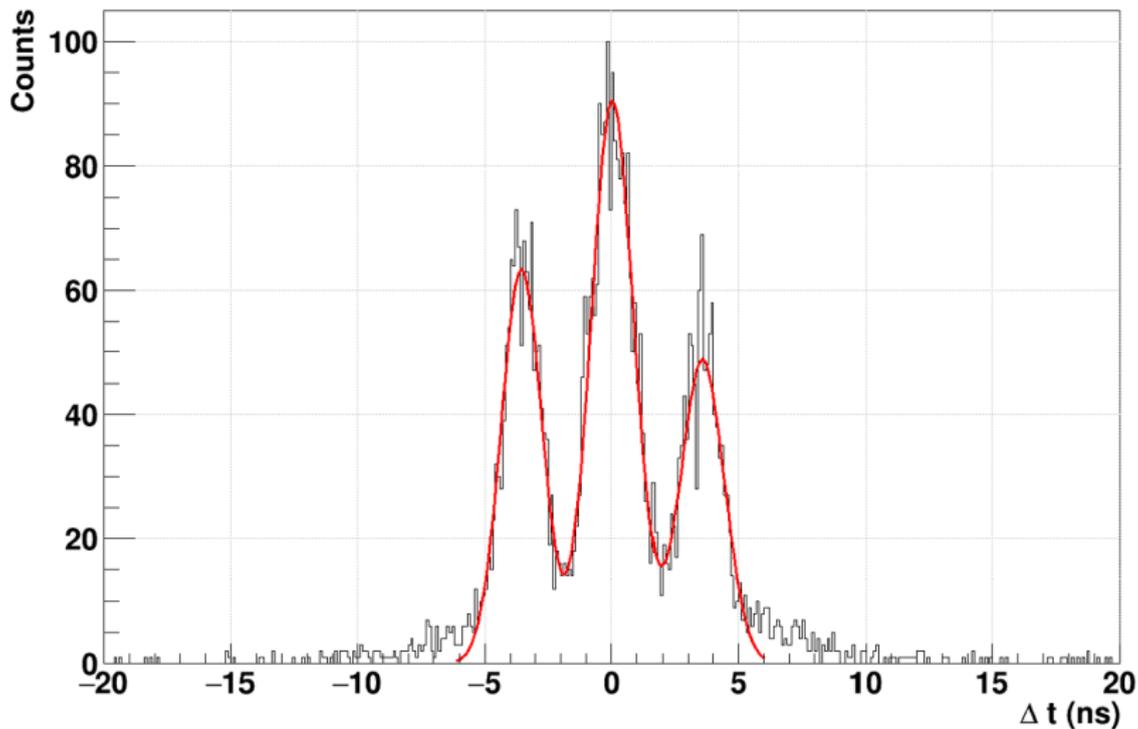
p,d,t fermati nel primo stadio di Si

- PSD non risolve gli isotopi per  $Z < 3$
- $E - ToF$  permette di recuperare la massa per  $Z = 1$  fino a 2 MeV

Limitazioni di  $E - ToF$

- la risoluzione temporale non permette di discriminare gli isotopi per  $Z > 1$
- solo un sottoinsieme di telescopi può essere usato
  - controllo con  $\alpha$  della stessa energia  
(le differenze di tempo dovrebbero essere 0)

# Esperimento ISOFAZIA a LNS



# Fenomeni degradanti la risoluzione temporale

Effetti macroscopici ( $\sim 4$  ns)

Struttura a tre picchi

Effetti secondari ( $< 4$  ns)

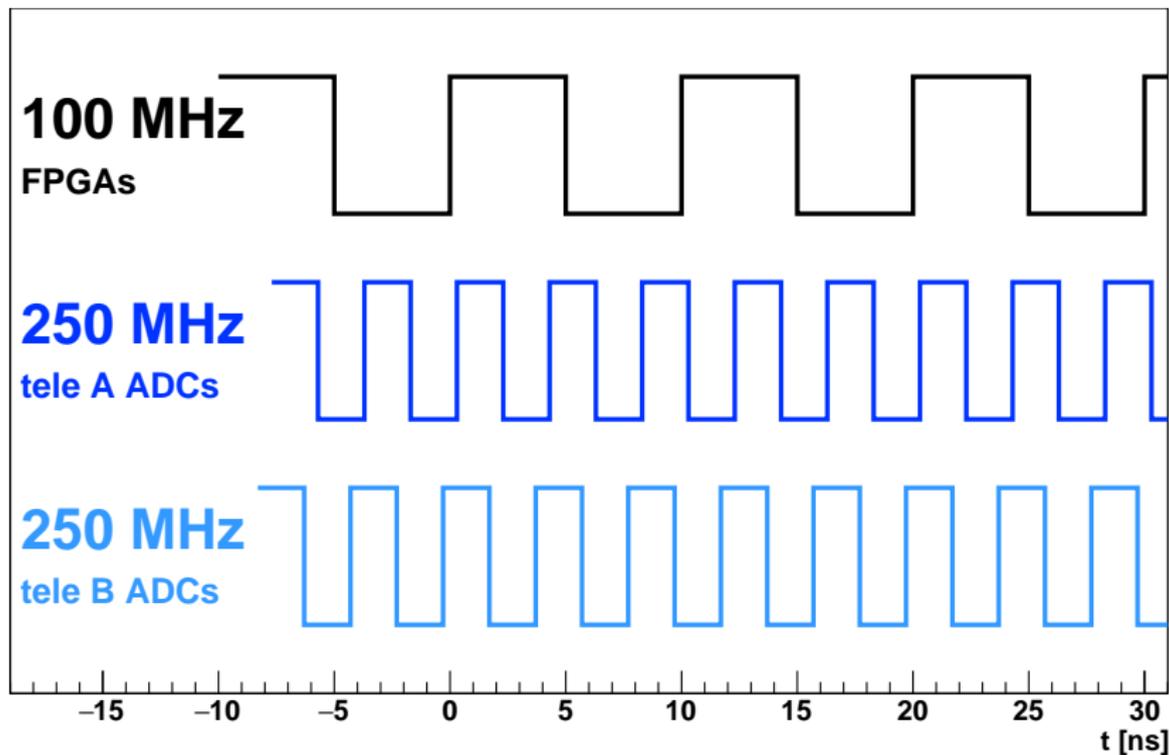
Ritardi di canale residui

# Ritardi nella linea di clock

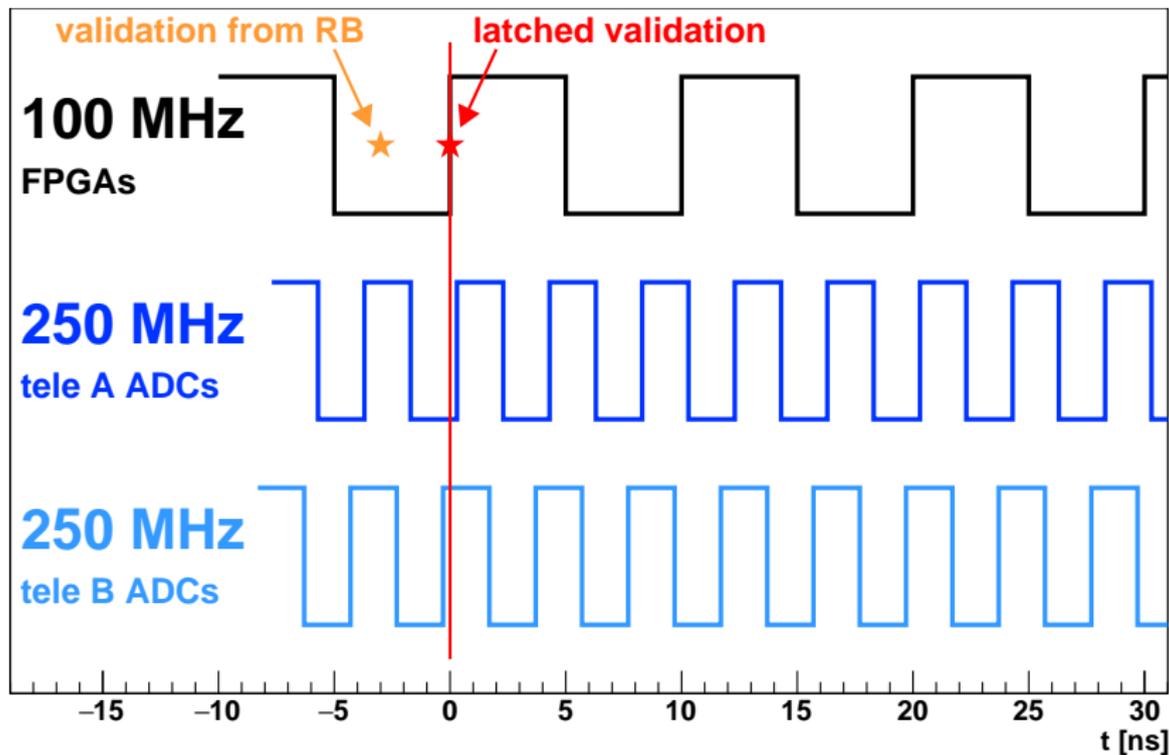
## Studio del fenomeno

- La struttura a tre picchi è associata a diversi ritardi nelle linee di clock di campionamento
- Per il telescopio “A” c’è un fan-in / fan-out in più che introduce un ritardo aggiuntivo!

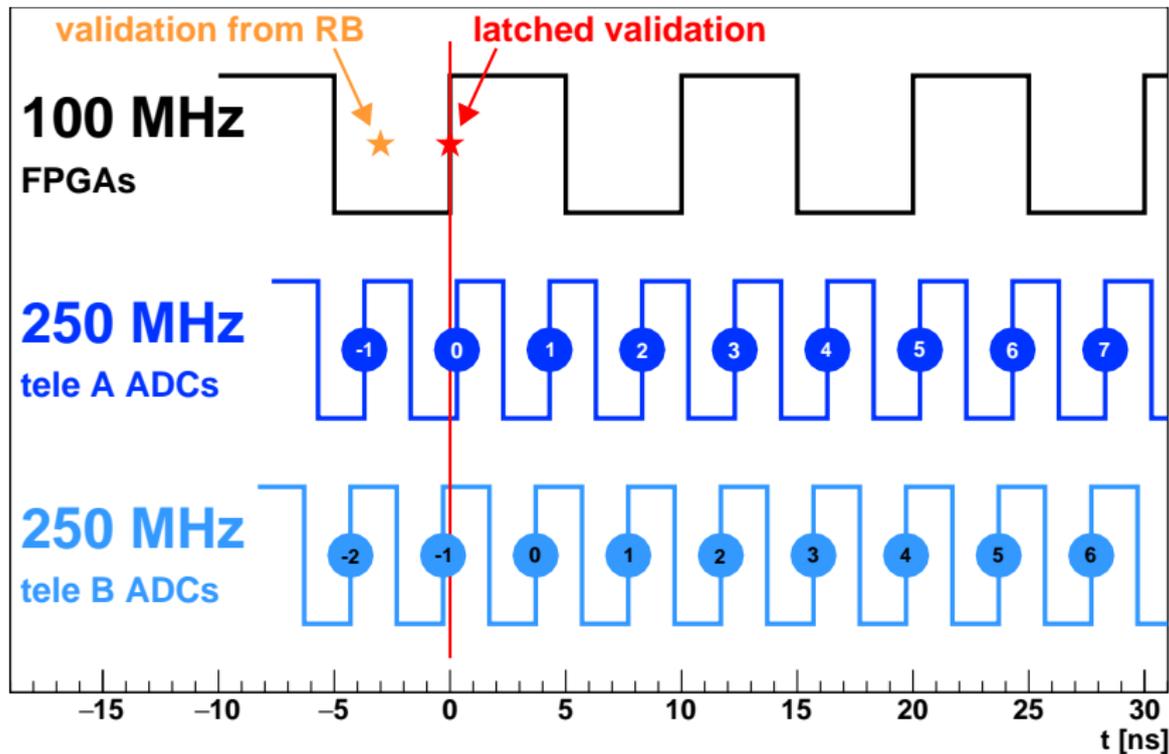
# Ritardi nella linea di clock



# Ritardi nella linea di clock



# Ritardi nella linea di clock



# Ritardi nella linea di clock

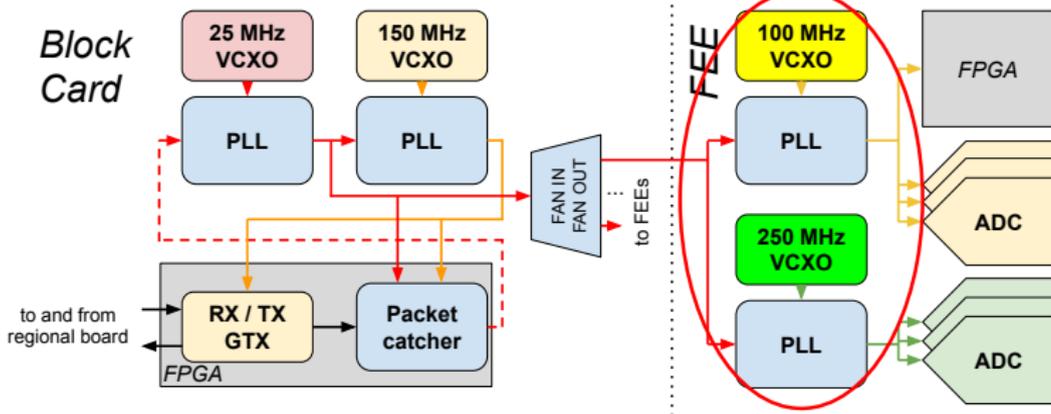
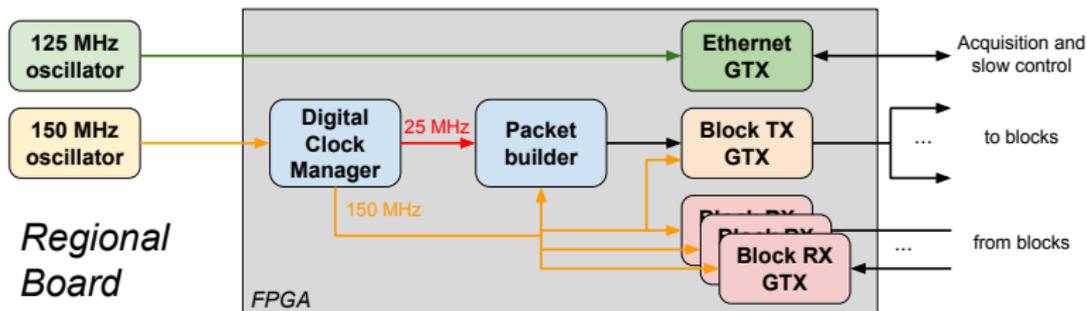
## Studio del fenomeno

- La struttura a tre picchi è associata a diversi ritardi nelle linee di clock di campionamento
- Per il telescopio "A" c'è un fan-in / fan-out in più che introduce un ritardo aggiuntivo!

## Soluzione (dal 2018)

- all'accensione riprogrammiamo i circuiti PLL per introdurre un ritardo di 1.5 ns sui clock a 250 MHz

# Ritardi nella linea di clock



# Ritardi nella linea di clock

## Studio del fenomeno

- La struttura a tre picchi è associata a diversi ritardi nelle linee di clock di campionamento
- Per il telescopio “A” c'è un fan-in / fan-out in più che introduce un ritardo aggiuntivo!

## Soluzione (dal 2018)

- all'accensione riprogrammiamo i circuiti PLL per introdurre un ritardo di 1.5 ns sui clock a 250 MHz
- uscita dalla regione critica di sovrapposizione tra validazione e fronte di campionamento

# Ritardi nella linea di clock

## Studio del fenomeno

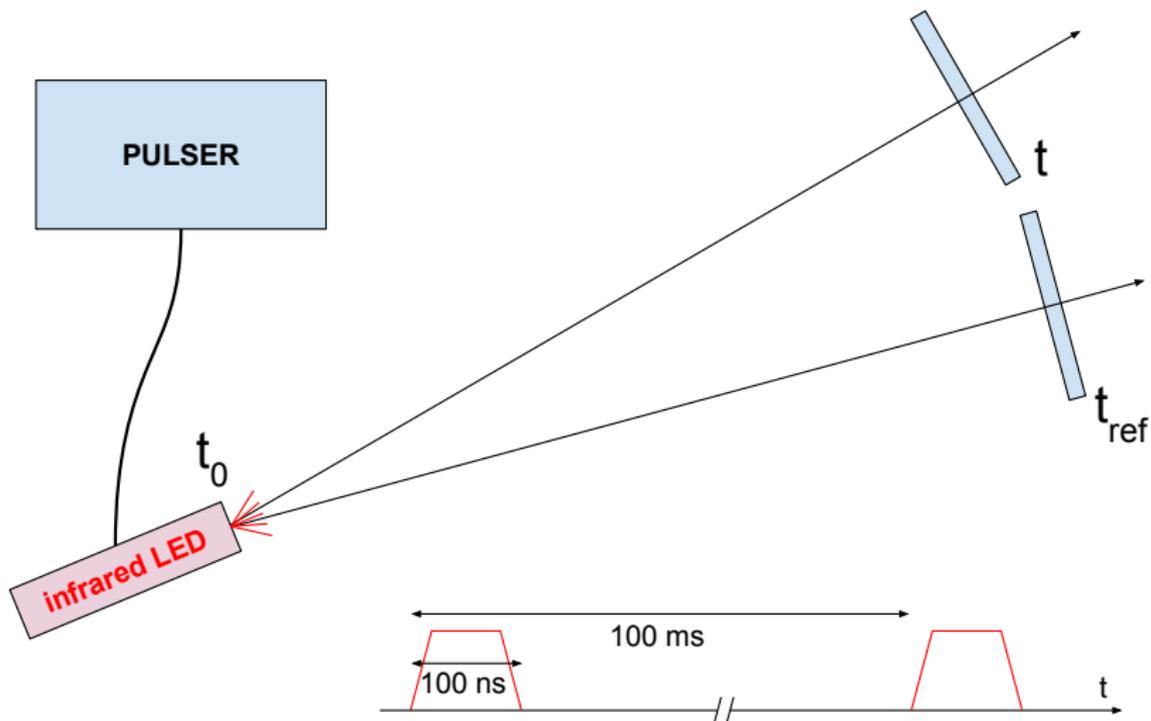
- La struttura a tre picchi è associata a diversi ritardi nelle linee di clock di campionamento
- Per il telescopio "A" c'è un fan-in / fan-out in più che introduce un ritardo aggiuntivo!

## Soluzione (dal 2018)

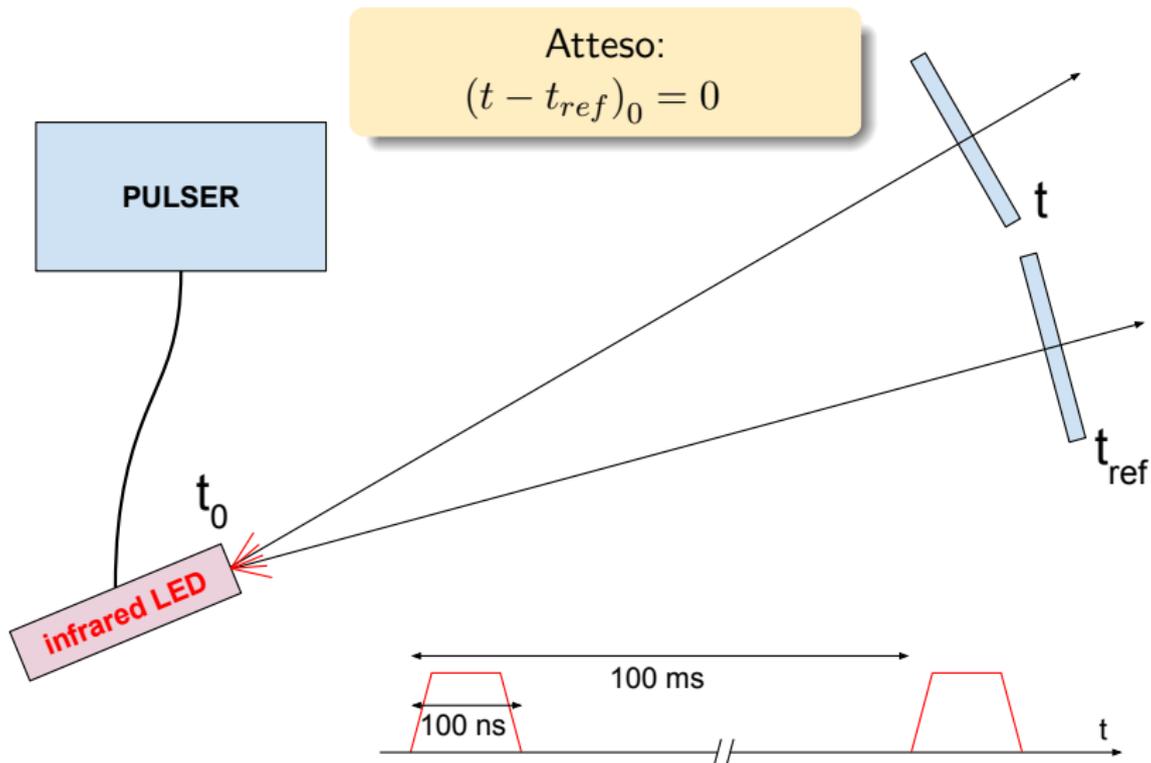
- all'accensione riprogrammiamo i circuiti PLL per introdurre un ritardo di 1.5 ns sui clock a 250 MHz
- uscita dalla regione critica di sovrapposizione tra validazione e fronte di campionamento

**Residui ritardi di campionamento possono rimanere**

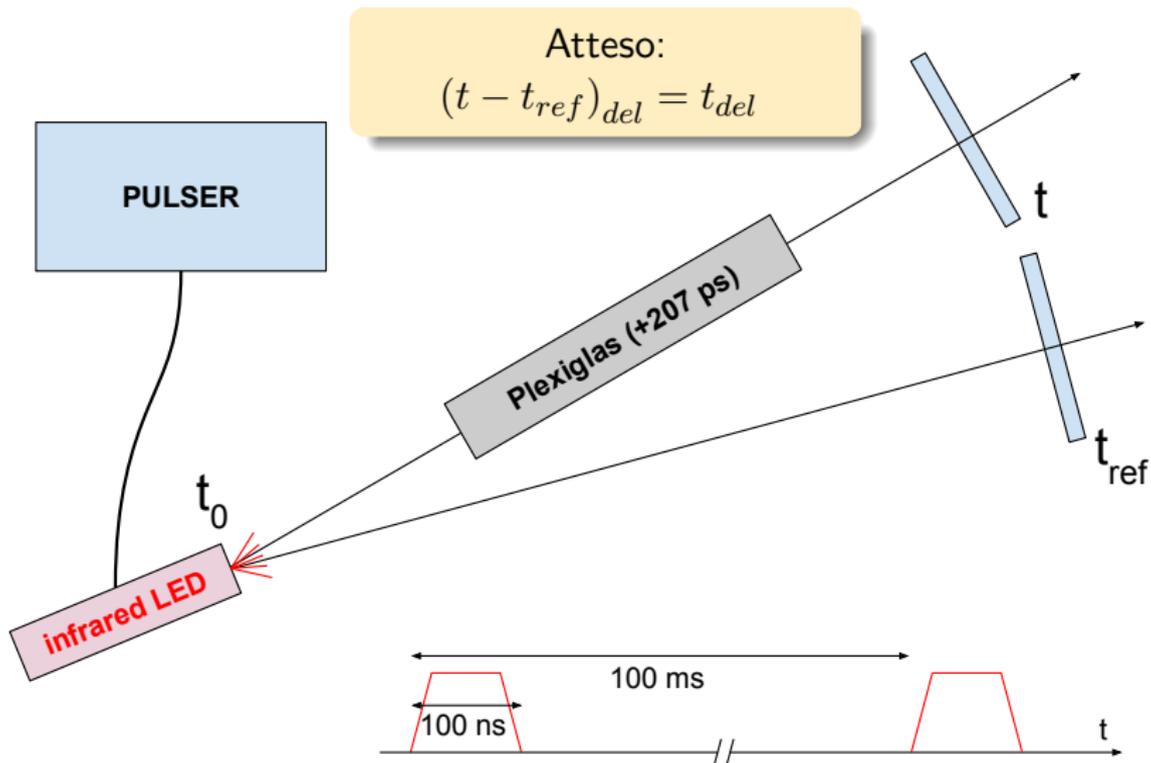
# Test di timing a Firenze



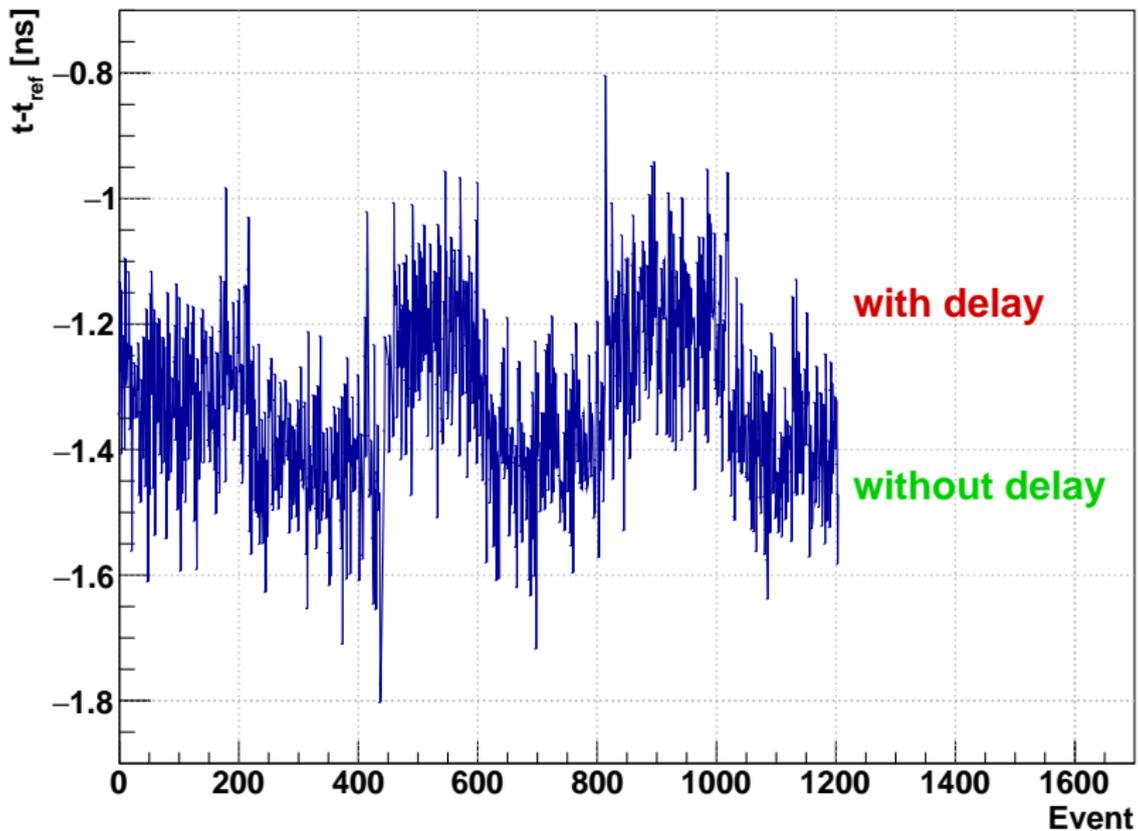
# Test di timing a Firenze



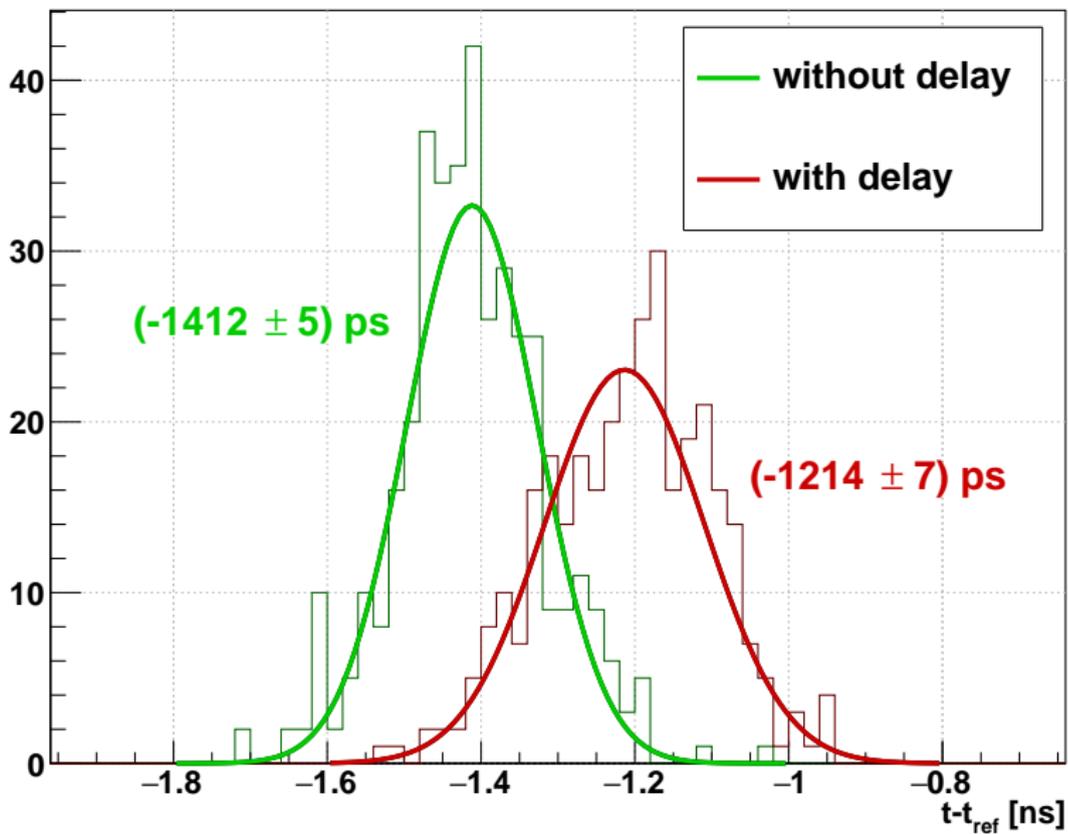
# Test di timing a Firenze



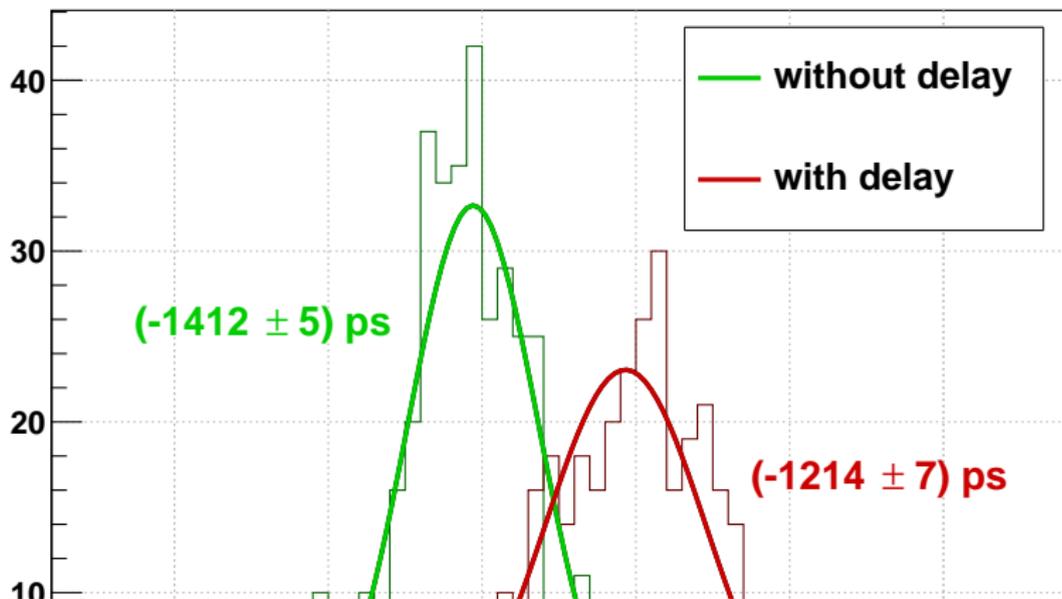
# Test di timing a Firenze



# Test di timing a Firenze

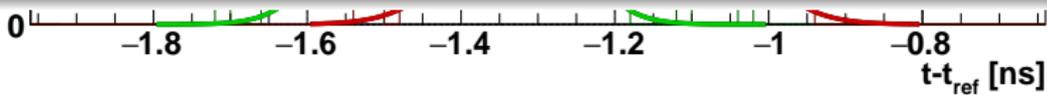


# Test di timing a Firenze

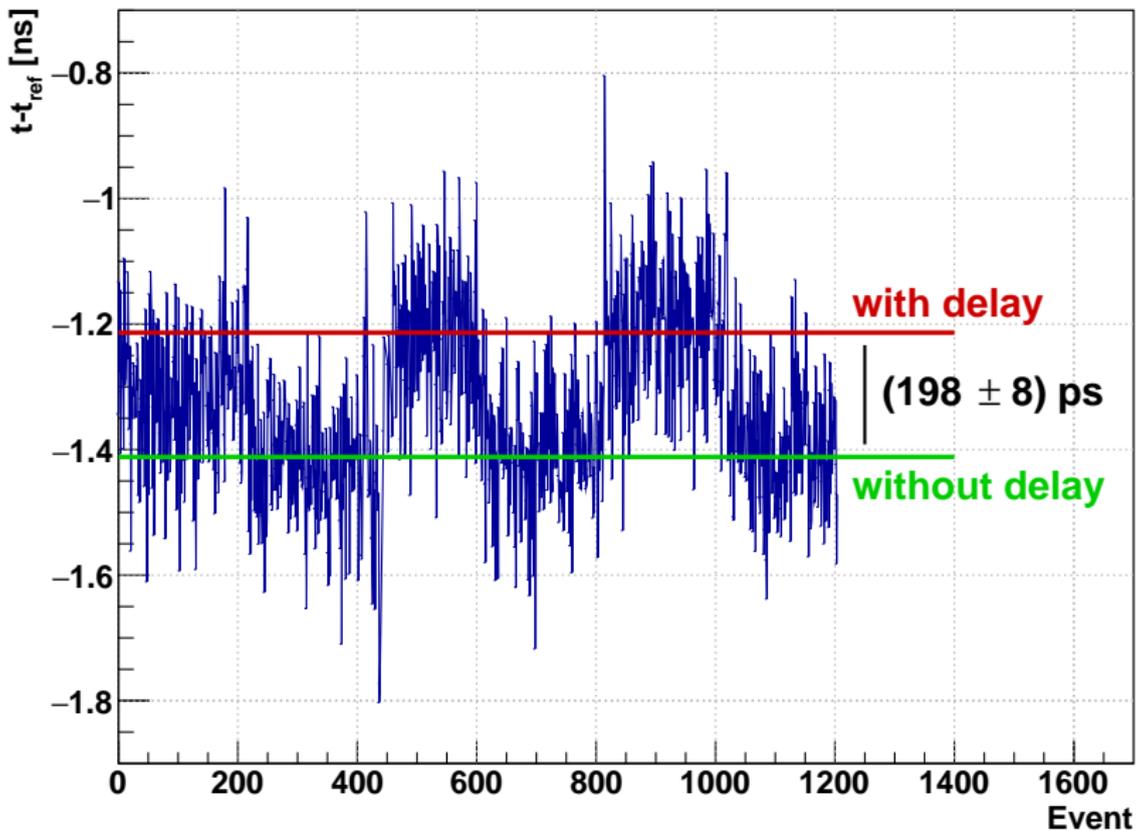


$$(t - t_{ref})_0 = -1412 \text{ ps} \neq 0$$

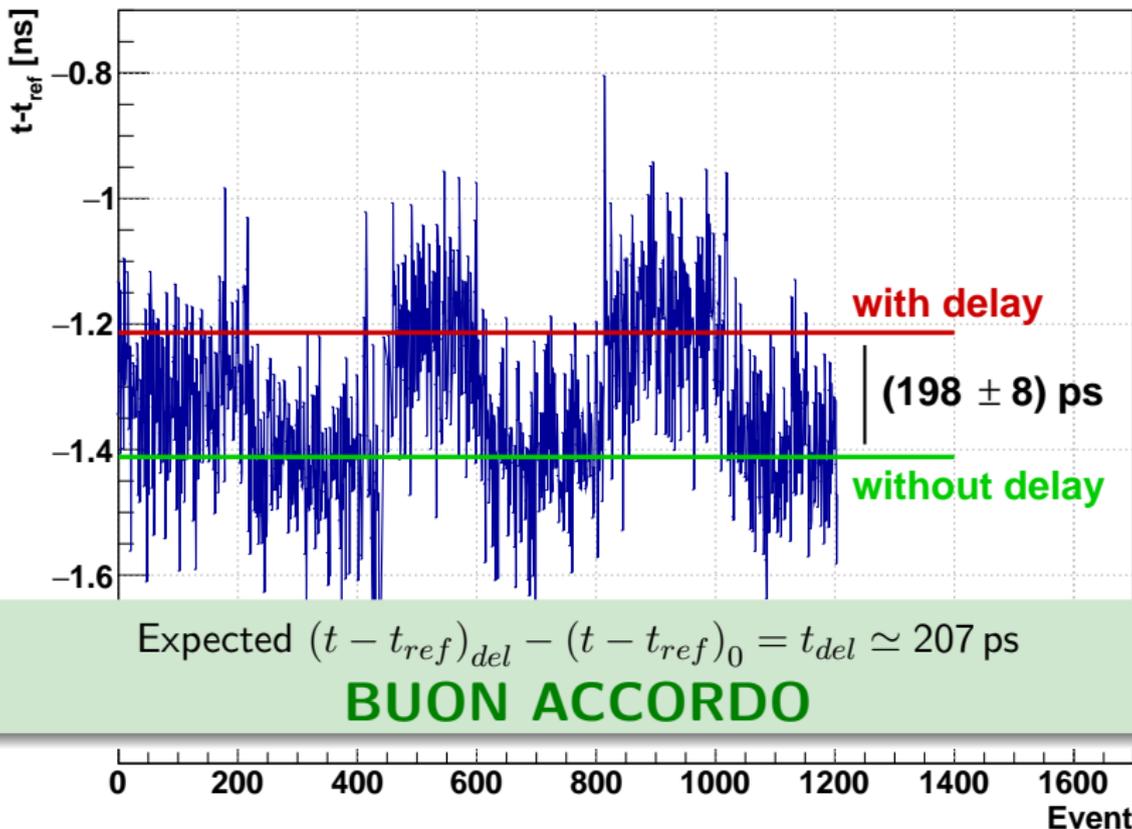
**RITARDO COSTANTE TRA I DUE CANALI**



# Test di timing a Firenze



# Test di timing a Firenze



# Esperimento FAZIAPRE a LNS

$^{40,48}\text{Ca} + ^{12}\text{C} @ 25, 40 \text{ A MeV}$  (6 blocchi FAZIA)

## Test di timing

*Il test di Firenze è stato ripetuto durante il montaggio di FAZIAPRE a LNS, dando un ritardo misurato di  $(203 \pm 13)$  ps (contro un ritardo nominale di 207 ps)*

# Esperimento FAZIAPRE a LNS



## Test di timing

*Il test di Firenze è stato ripetuto durante il montaggio di FAZIAPRE a LNS, dando un ritardo misurato di  $(203 \pm 13)$  ps (contro un ritardo nominale di 207 ps)*

## Permanent infrared LED

*Durante FAZIAPRE, il LED infrarosso è rimasto montato nella camera di scattering ed è stato mantenuto acceso durante tutto il turno (ad un rate di 0.1 Hz) per tracciare i ritardi dei vari canali*

# Esperimento FAZIAPRE a LNS

**Risultati dell'analisi degli eventi LED:**

# Esperimento FAZIAPRE a LNS

## Risultati dell'analisi degli eventi LED:

- ci sono ritardi costanti ( $< 4$  ns) tra canali  
**(INDIPENDENTI DALL'EVENTO):**

$$t^{(\text{ev,det})} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev,det})} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(\text{det})}$$

# Esperimento FAZIAPRE a LNS

## Risultati dell'analisi degli eventi LED:

- ci sono ritardi costanti ( $< 4$  ns) tra canali  
**(INDIPENDENTI DALL'EVENTO):**

$$t^{(ev,det)} = t_{CFD}^{(ev,det)} - t_{val}^{(ev)} + \delta t^{(det)}$$

- i ritardi sono **stabili** (entro 200 ps)  
anche dopo un completo riavvio dell'elettronica

# Esperimento FAZIAPRE a LNS

## Risultati dell'analisi degli eventi LED:

- ci sono ritardi costanti ( $< 4$  ns) tra canali  
**(INDIPENDENTI DALL'EVENTO):**

$$t^{(\text{ev,det})} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev,det})} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(\text{det})}$$

- i ritardi sono **stabili** (entro 200 ps)  
anche dopo un completo riavvio dell'elettronica
- produzione di una **mappa dei ritardi**  
per correggere le marche di tempo:

$$t_{\text{adj}}^{(\text{ev,det})} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev,det})} + \Delta^{(\text{det})}$$

# Esperimento FAZIAPRE a LNS

## Risultati dell'analisi degli eventi LED:

- ci sono ritardi costanti ( $< 4$  ns) tra canali  
**(INDIPENDENTI DALL'EVENTO):**

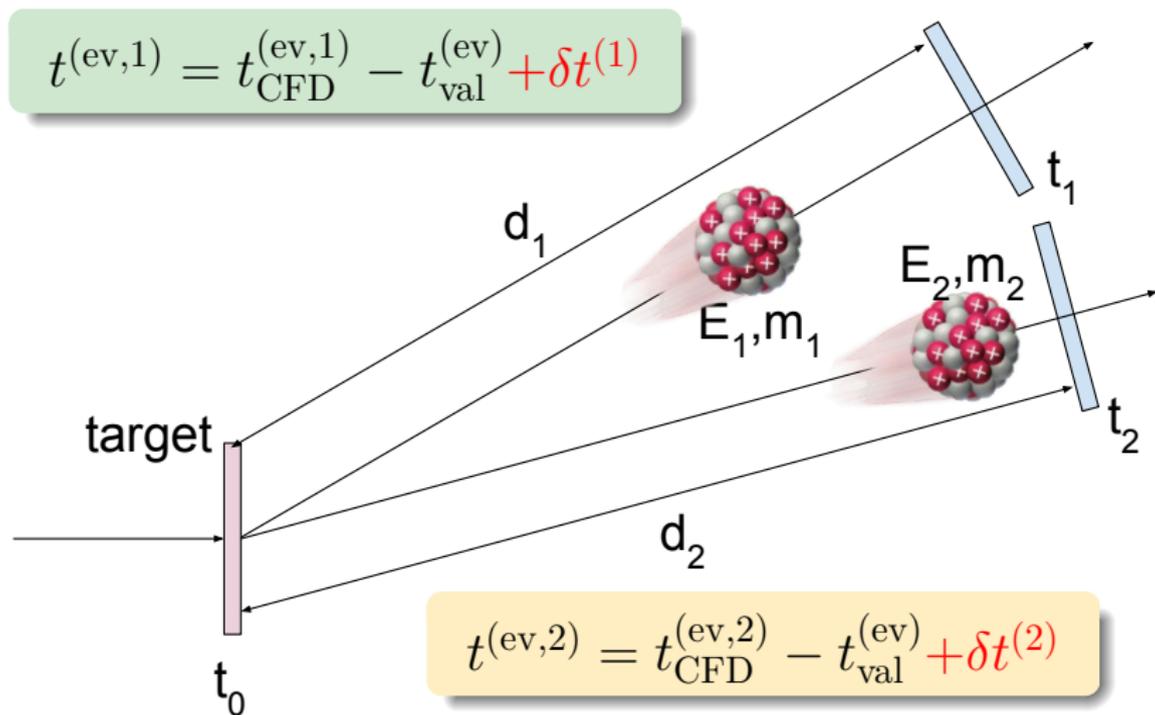
$$t^{(ev,det)} = t_{CFD}^{(ev,det)} - t_{val}^{(ev)} + \delta t^{(det)}$$

- i ritardi sono **stabili** (entro 200 ps)  
anche dopo un completo riavvio dell'elettronica
- produzione di una **mappa dei ritardi**  
per correggere le marche di tempo:

$$t_{adj}^{(ev,det)} = t_{CFD}^{(ev,det)} + \Delta^{(det)}$$

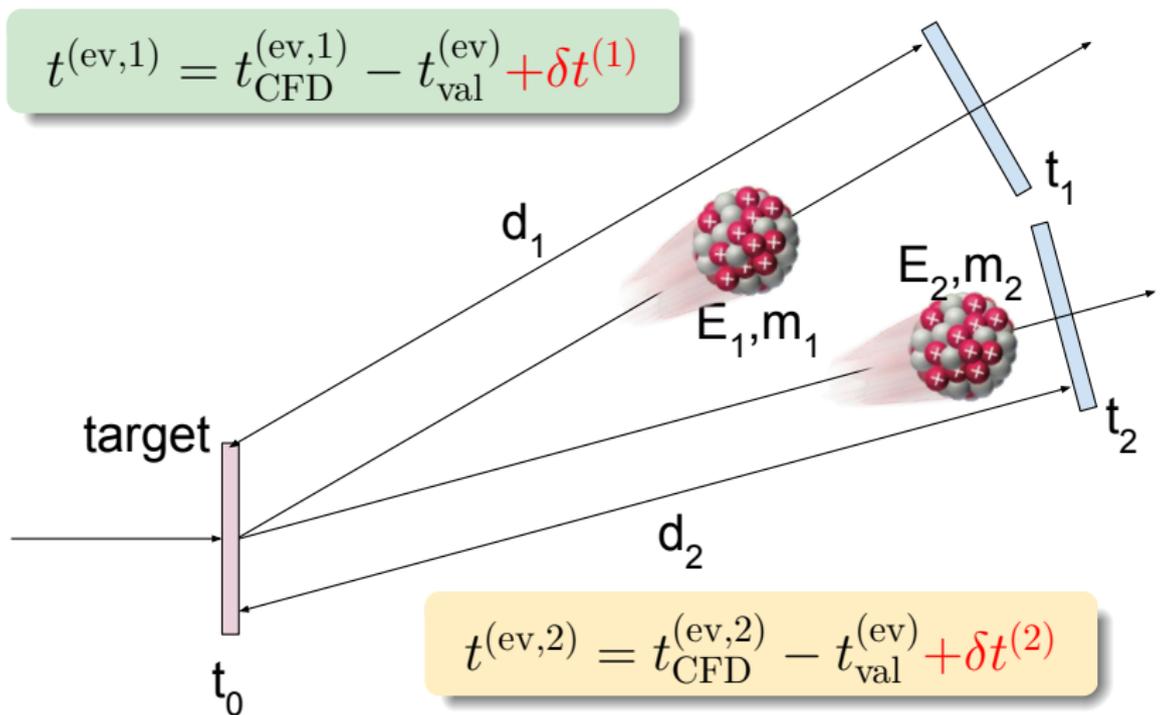
Ho studiato un metodo di sincronizzazione alternativo  
che può essere usato **senza impulsi LED**

# Auto-sincronizzazione



Eventi con (almeno) 2 particelle ben identificate

# Auto-sincronizzazione



$$\Delta^{(1,2)} \equiv \delta t^{(2)} - \delta t^{(1)} = t^{(ev,2)} - t_{CFD}^{(ev,2)} - t^{(ev,1)} + t_{CFD}^{(ev,1)}$$

## Auto-sincronizzazione (o LED)

Ora abbiamo una **mappa dei ritardi**  $\Delta^{(i)} \equiv \delta t^{(i)} - \delta t^{(\text{ref})}$

# Auto-sincronizzazione (o LED)

Ora abbiamo una **mappa dei ritardi**  $\Delta^{(i)} \equiv \delta t^{(i)} - \delta t^{(\text{ref})}$

$$t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(1)}$$

$$t^{(\text{ev},2)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(2)}$$

# Auto-sincronizzazione (o LED)

Ora abbiamo una **mappa dei ritardi**  $\Delta^{(i)} \equiv \delta t^{(i)} - \delta t^{(\text{ref})}$

$$t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(1)}$$

$$t^{(\text{ev},2)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(2)}$$



$$t^{(\text{ev},2)} - t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} + \delta t^{(2)} - t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - \delta t^{(1)}$$

# Auto-sincronizzazione (o LED)

Ora abbiamo una **mappa dei ritardi**  $\Delta^{(i)} \equiv \delta t^{(i)} - \delta t^{(\text{ref})}$

$$t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(1)}$$

$$t^{(\text{ev},2)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(2)}$$

⇓

$$t^{(\text{ev},2)} - t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} + \delta t^{(2)} - t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - \delta t^{(1)}$$

⇓

$$t^{(\text{ev},2)} - t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} + \Delta^{(2)} - t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - \Delta^{(1)}$$

# Auto-sincronizzazione (o LED)

Ora abbiamo una **mappa dei ritardi**  $\Delta^{(i)} \equiv \delta t^{(i)} - \delta t^{(\text{ref})}$

$$t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(1)}$$

$$t^{(\text{ev},2)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} - t_{\text{val}}^{(\text{ev})} + \delta t^{(2)}$$

⇓

$$t^{(\text{ev},2)} - t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} + \delta t^{(2)} - t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - \delta t^{(1)}$$

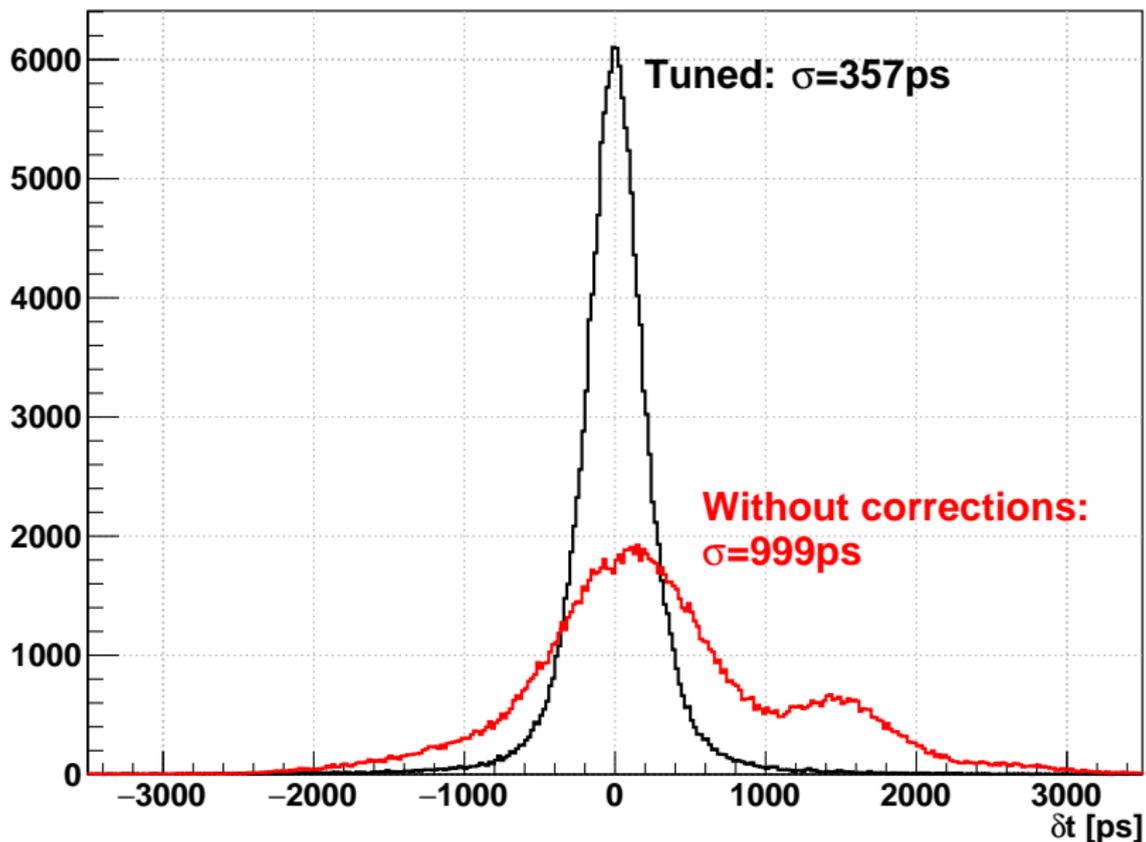
⇓

$$t^{(\text{ev},2)} - t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},2)} + \Delta^{(2)} - t_{\text{CFD}}^{(\text{ev},1)} - \Delta^{(1)}$$

⇓

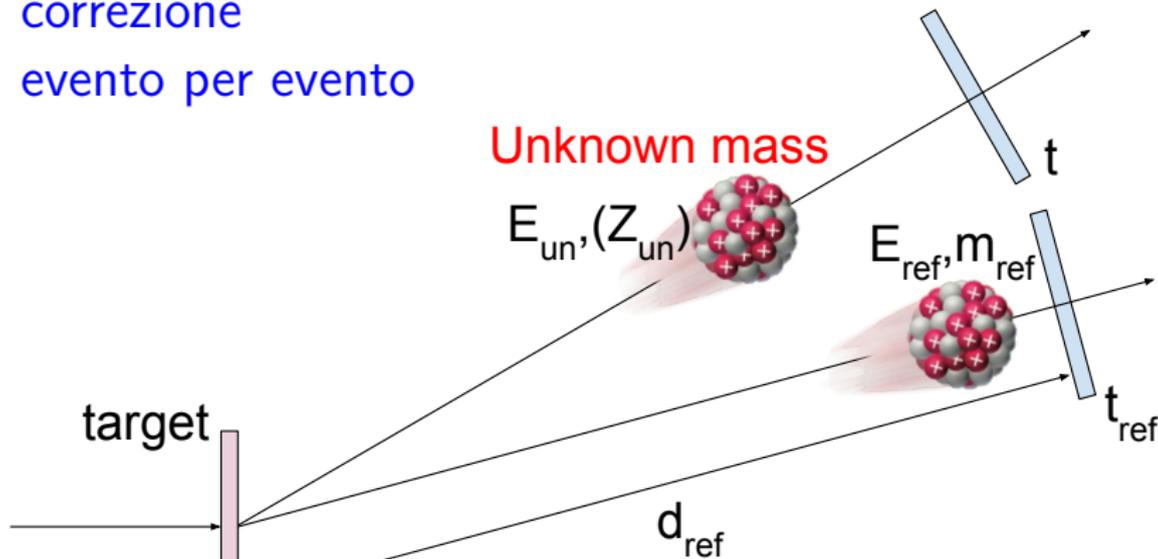
$$t^{(\text{ev},2)} - t^{(\text{ev},1)} = t_{\text{adj}}^{(\text{ev},2)} - t_{\text{adj}}^{(\text{ev},1)}$$

# Auto-sincronizzazione (o LED)



# Identificazione tramite ToF (eventi con $M > 1$ )

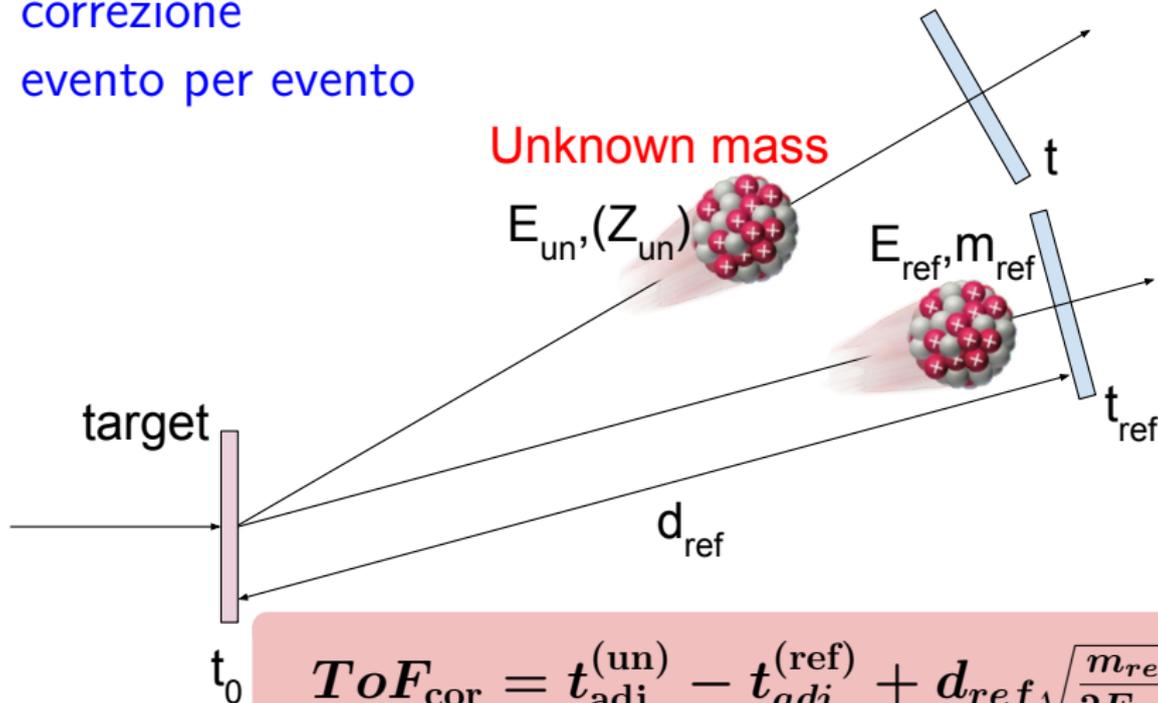
correzione  
evento per evento



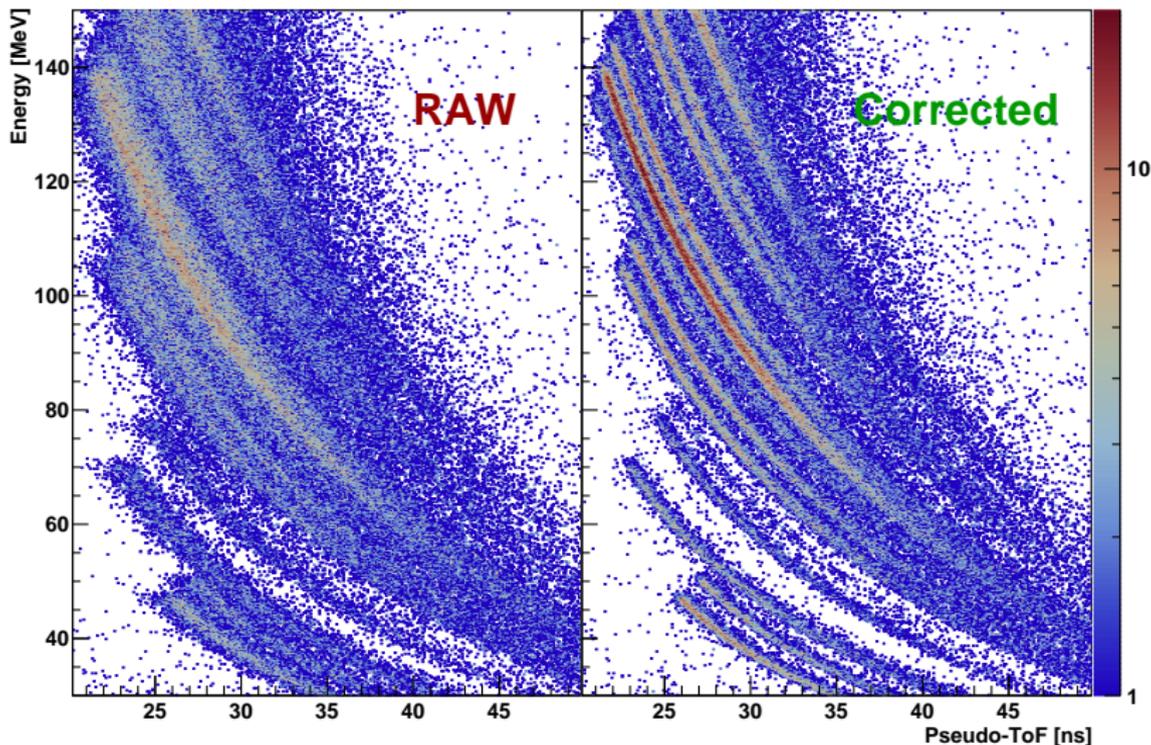
$$t_0 \quad ToF_{RAW} = t_{CFD}^{(un)} - t_{CFD}^{(ref)} + d_{ref} \sqrt{\frac{m_{ref}}{2E_{ref}}}$$

# Identificazione tramite ToF (eventi con $M > 1$ )

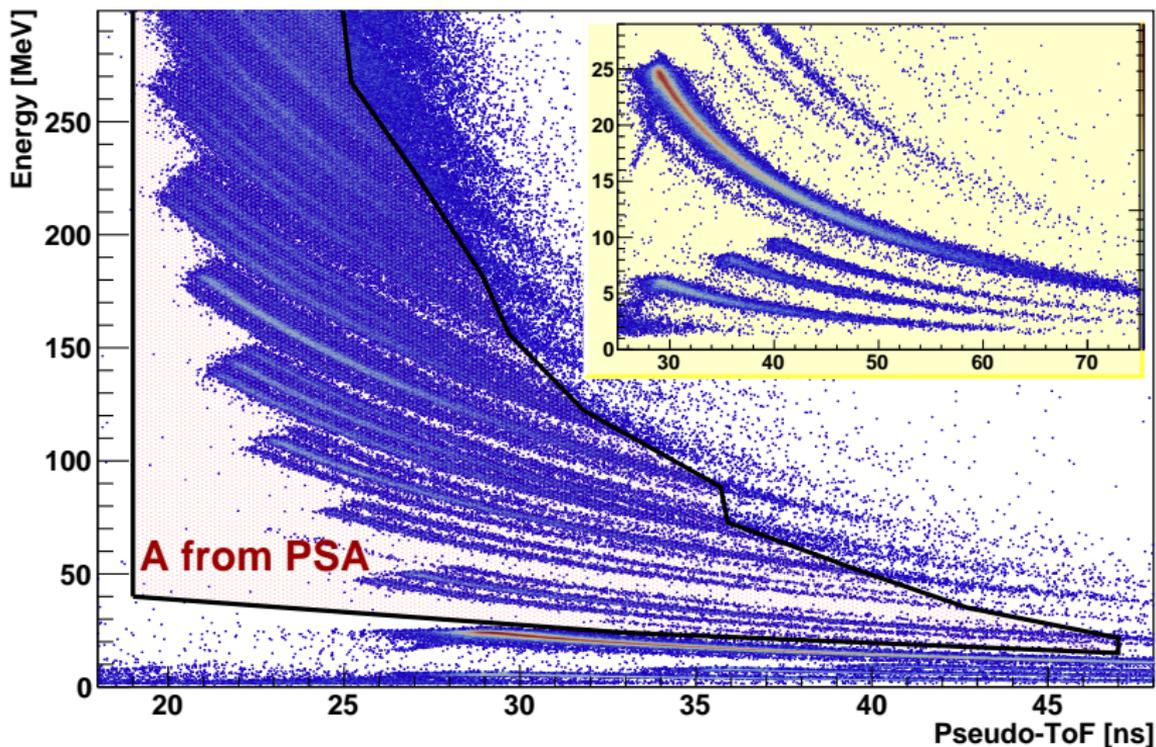
correzione  
evento per evento



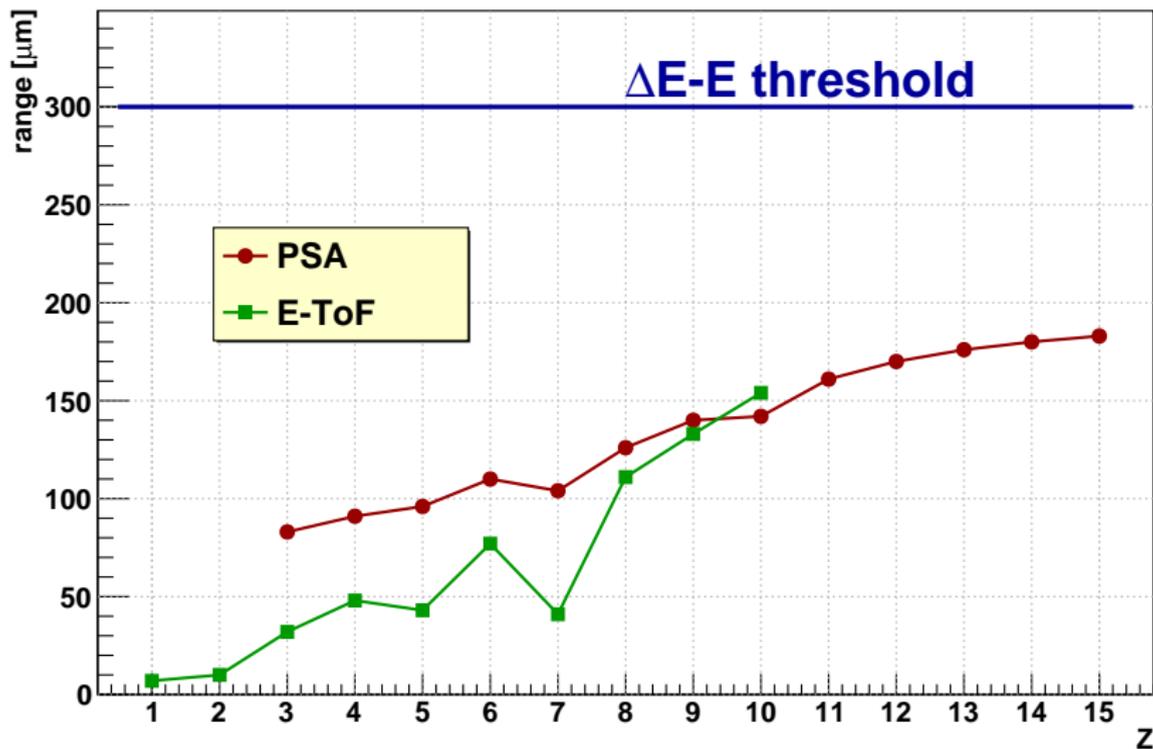
# Correzione dei ritardi (LED o auto-sync)



# Correlazione $E - T_oF$ finale



# Miglioramento della discriminazione isotopica



# Riepilogo e conclusioni

- Possibilità di fare timing con FAZIA:
  - jitter inferiore al ns (dipende dalla particella);
  - con 1 m di base di volo si discrimina  $A$  fino a  $Z \sim 10$ , le soglie vengono ridotte (rispetto alla PSD) per  $Z = 3 - 8$  e si recuperano completamente  $Z = 1, 2$  a tutte le energie.

# Riepilogo e conclusioni

- Possibilità di fare timing con FAZIA:
  - jitter inferiore al ns (dipende dalla particella);
  - con 1 m di base di volo si discrimina  $A$  fino a  $Z \sim 10$ , le soglie vengono ridotte (rispetto alla PSD) per  $Z = 3 - 8$  e si recuperano completamente  $Z = 1, 2$  a tutte le energie.
- La distribuzione comune del clock non è sufficiente:
  - regolazione fine dei ritardi interni ai PLL;
  - ulteriori correzioni dei ritardi residui ( $< 4$  ns).

# Riepilogo e conclusioni

- Possibilità di fare timing con FAZIA:
  - jitter inferiore al ns (dipende dalla particella);
  - con 1 m di base di volo si discrimina  $A$  fino a  $Z \sim 10$ , le soglie vengono ridotte (rispetto alla PSD) per  $Z = 3 - 8$  e si recuperano completamente  $Z = 1, 2$  a tutte le energie.
- La distribuzione comune del clock non è sufficiente:
  - regolazione fine dei ritardi interni ai PLL;
  - ulteriori correzioni dei ritardi residui ( $< 4$  ns).
- Impulsi LED o “auto-sync” per correggere i ritardi:
  - metodi estremamente accurati (errori sulla correzione  $\sim 10$  ps);
  - tracciamento di variazioni dei ritardi ( $< 200$  ps).

# Riepilogo e conclusioni

- Possibilità di fare timing con FAZIA:
  - jitter inferiore al ns (dipende dalla particella);
  - con 1 m di base di volo si discrimina  $A$  fino a  $Z \sim 10$ , le soglie vengono ridotte (rispetto alla PSD) per  $Z = 3 - 8$  e si recuperano completamente  $Z = 1, 2$  a tutte le energie.
- La distribuzione comune del clock non è sufficiente:
  - regolazione fine dei ritardi interni ai PLL;
  - ulteriori correzioni dei ritardi residui ( $< 4$  ns).
- Impulsi LED o “auto-sync” per correggere i ritardi:
  - metodi estremamente accurati (errori sulla correzione  $\sim 10$  ps);
  - tracciamento di variazioni dei ritardi ( $< 200$  ps).
- Applicazioni:
  - studio della fisica del QT (con FAZIA);
  - metodi di correzione trasversali ed applicabili ad altri apparati anche in altri settori!

# Collaborazione FAZIA

