



Caratterizzazione di Silicon Photomultipliers in detector a scintillazione

Alessandro Berra

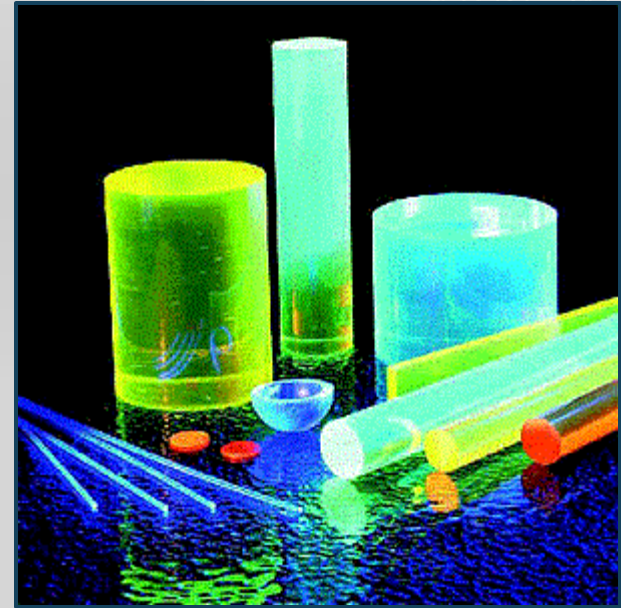
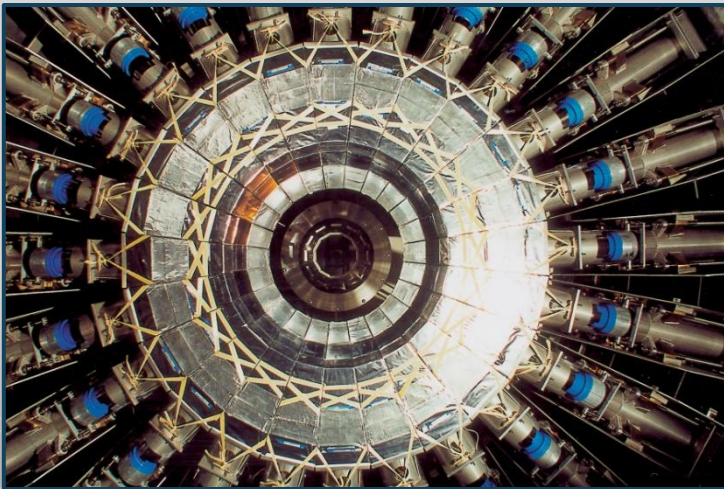
Relazione di fine anno di dottorato
XXIV Ciclo

Outline

- I sistemi di lettura nei detector a scintillazione
 - I detector a semiconduttore come alternative ai fotomoltiplicatori
 - Low cost, compattezza, operatività in intensi campi magnetici
- I Silicon Photomultipliers
 - Funzionamento, vantaggi e problemi
- Performance:
 - Tracker a bacchette scintillanti
 - Calorimetria
- Conclusioni

I Detector a Scintillazione

- Ampiamente usati in fisica delle particelle
 - Calorimetria, tracking, time of flight, trigger, fisica dello spazio



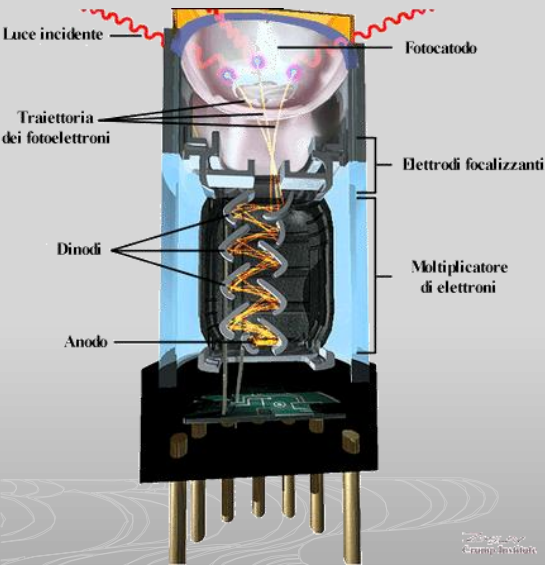
- È necessario un sistema per la lettura della luce prodotta



**Fotomoltiplicatori
(PMT)**

I Fotomoltiplicatori

- I PMT sono fra i device più usati per la raccolta della luce dei detector a scintillazione



■ Problemi

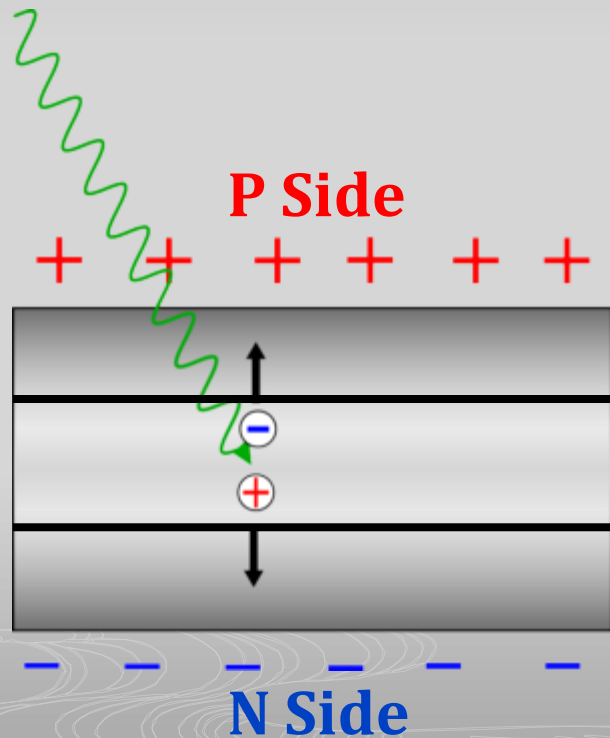
- No campi magnetici
- Necessità di alto voltaggio
- Peso

**Problemi per
esperimenti di
HEP**

**Problemi per
esperimenti
su satellite**

Alternative...

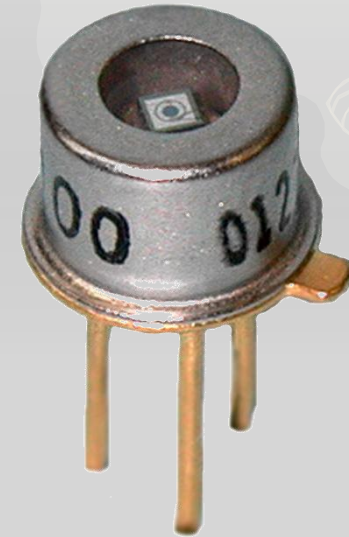
- Ricerca di device alternativi ai fotomoltiplicatori tradizionali
 - Detector a semiconduttore



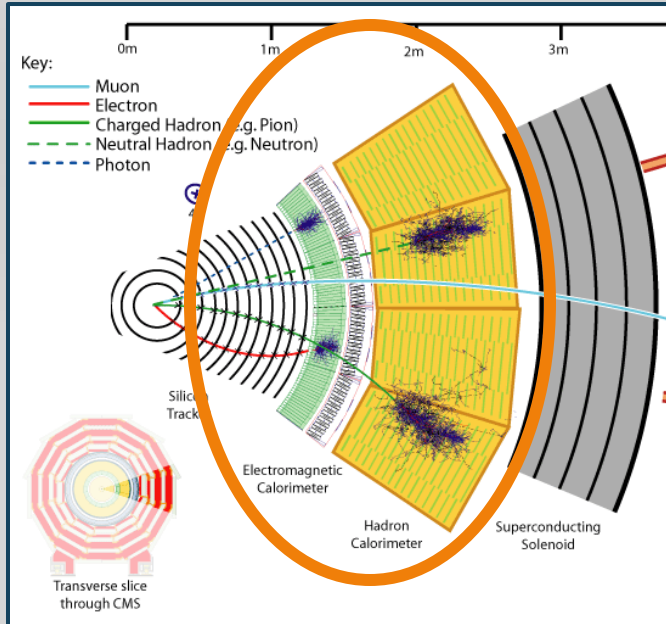
- Prototipo: il fotodiodo
 - Giunzione P-N polarizzata inversamente
 - I fotoni generano una coppia elettrone lacuna nella zona di svuotamento
 - Le cariche vengono raccolte e si forma un segnale elettrico

Un po' di “zoologia”

- No gain
 - PN photodiodes
 - PIN photodiodes
- Low gain (~ 10)
 - Vacuum PhotoTriodes (**VPT**)
- High gain (> 100)
 - Hybrid Photon Detectors (**HPD**): fotoni su fotocatodo, elettroni accelerati tramite un'alta tensione e identificati da un diodo reverse-biased
 - Avalanche PhotoDiodes (**APD**): fotodiodo reverse-biased prima del breakdown, moltiplicazione nella zona svuotata
 - Single Photon Avalanche Diode (**SPAD**): fotodiodo reverse-biased oltre il breakdown (Geiger-discharge), usati per il conteggio di singolo fotone

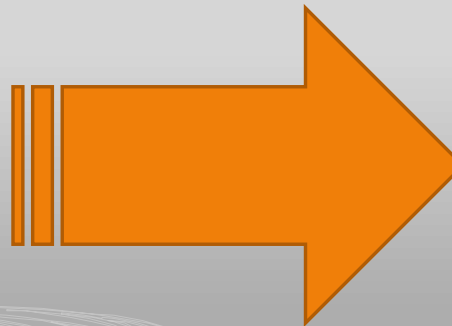


Esempio: i Calorimetri in CMS



- Detector “all-silicon”
 - ECAL omogeneo: tungstenato di piombo
 - HCAL sampling: ferro-scintillatore
- Entrambi all’interno del solenoide superconduttore (4T)

PMT non usabili



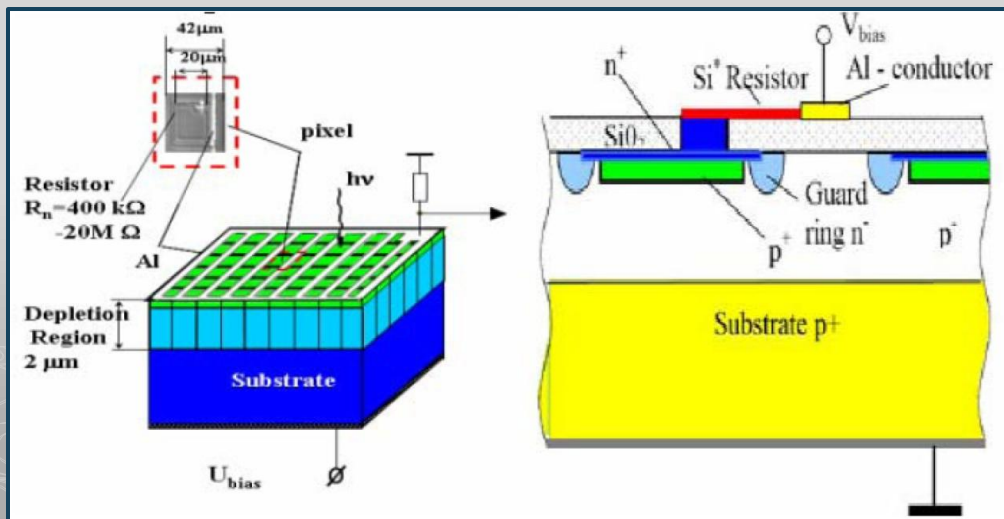
**Avalanche
PhotoDiodes
(APD) in ECAL**

**Hybrid Photon
Detectors (HPD)
in HCAL**



I Silicon Photomultipliers

- Detector al silicio composti da una matrice di pixel connessi ad un output comune
 - Ogni pixel può essere considerato come un diodo alimentato ad una tensione oltre quella di breakdown
- Quando un fotone colpisce un pixel si forma una scarica in maniera simile ad un contatore Geiger
 - Ogni pixel è sostanzialmente un contatore binario (SPAD)



- La risposta analogica all'intensità del segnale è ottenuta (per flussi non troppo intensi) considerando il numero di pixel accesi

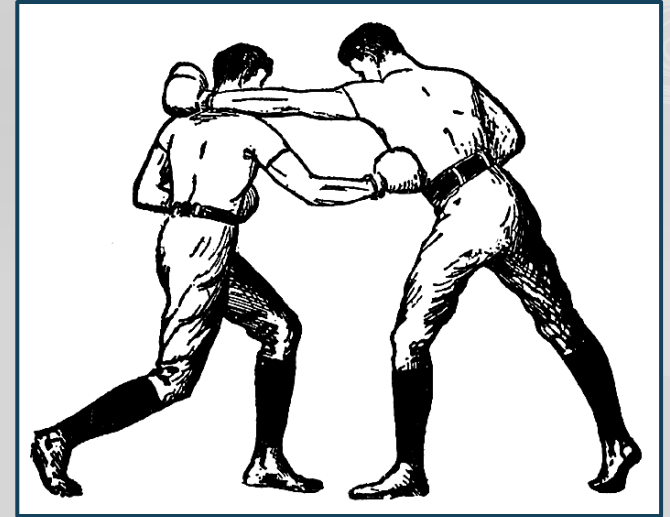
SiPM Contro PMT

□ Vantaggi

- Low bias voltage ($\sim 50V$)
- Compattezza ($\sim mm^2$)
- Operativi in campi magnetici
- Readout semplice

□ Svantaggi

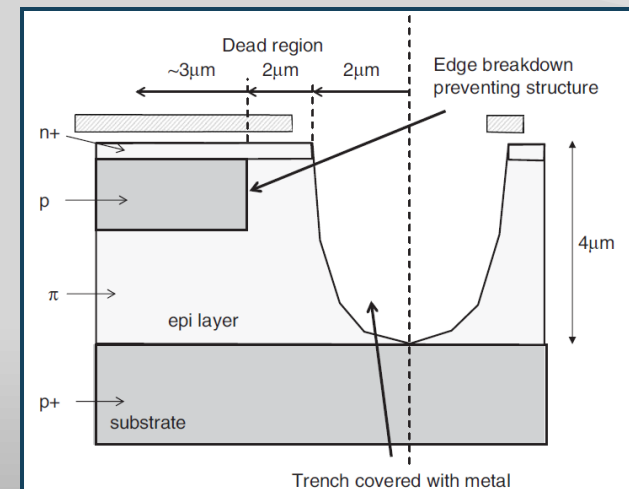
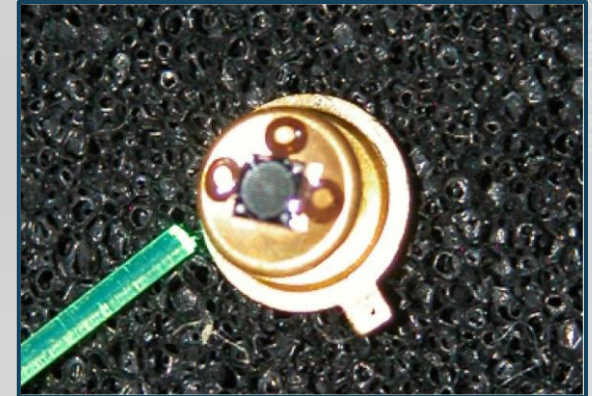
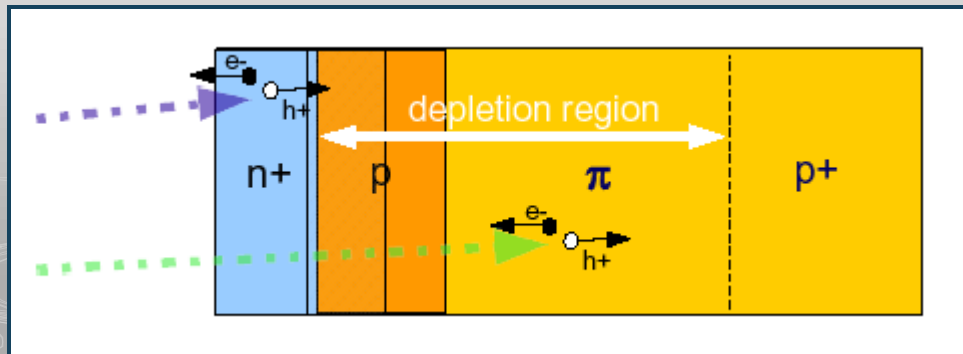
- Altissimo dark-noise ($\sim MHz$, dipendente dalla temperatura)
- Sono da valutare accuratamente i danni da radiazione
- Area sensibile limitata



FBK-IRST - 1mm² SiPM

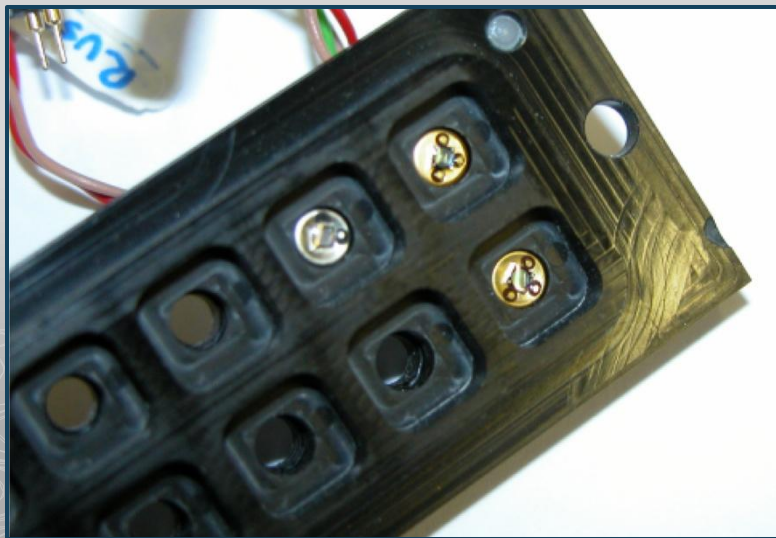
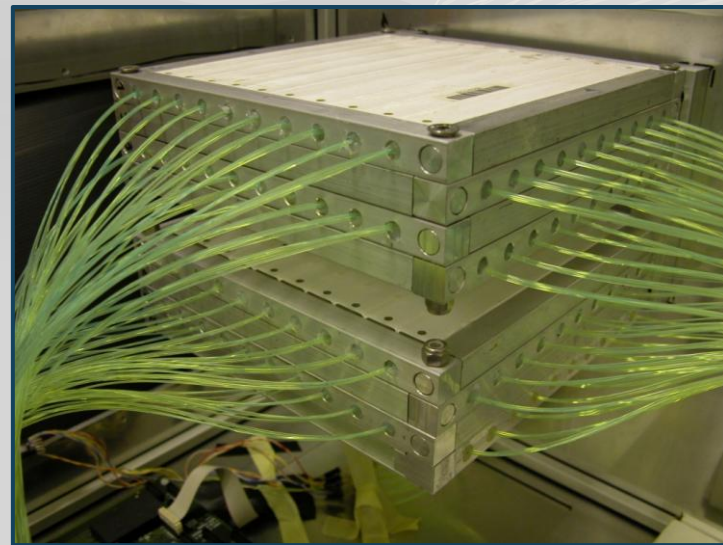
- Breakdown voltage: $\sim 30\text{V}$
- Overvoltage range: $\sim 5\text{V}$
- Numero di pixel: 688
- Pixel area: $40 \times 40 \mu\text{m}^2$
- Gain: $\sim 10^6$
- QE: $> 90\%$ (380-530nm)
- PDE: $\sim 30\text{-}35\%$
 - Ottenute grazie allo spessore molto sottile delle zone n+ e p nei quali si forma la valanga

G.Collazuol *et al.*,
*Nucl. Instr. and Meth. in
Phys. Res. A* 581, 461-
464 (2007)



SiPM Performance (tracker)

- SiPM collegati ad una barra di scintillatore di un tracker a fibre scintillanti (prototipo di EMR, Electron Muon Ranger, per l'esperimento MICE)
 - CERN PS-T9 beamline, 1-15 GeV
 - 8 piani da 10 barre ognuno, lette da 4 fibre WLS da 0.8 mm di diametro



- Il segnale è amplificato e campionato da una QDC a 12 bit
- Testati SiPM prodotti da Hamamatsu eIRST, prima e dopo danni da radiazione

SiPM Performance

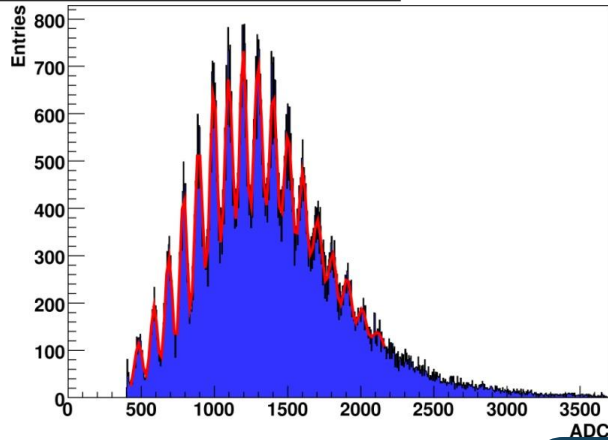
A.Berra *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* 609, 129-135 (2009)

Signal-to-noise
ratio oltre 18

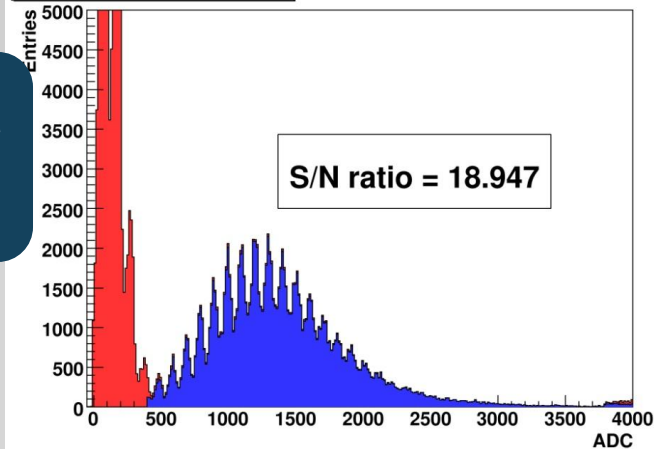
Eccellente
linearità

Detection
efficiency
~90%

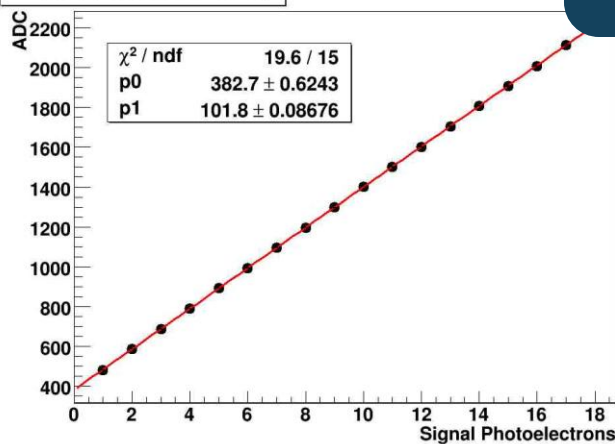
FBK-IRST E5 - Photoelectron Peaks



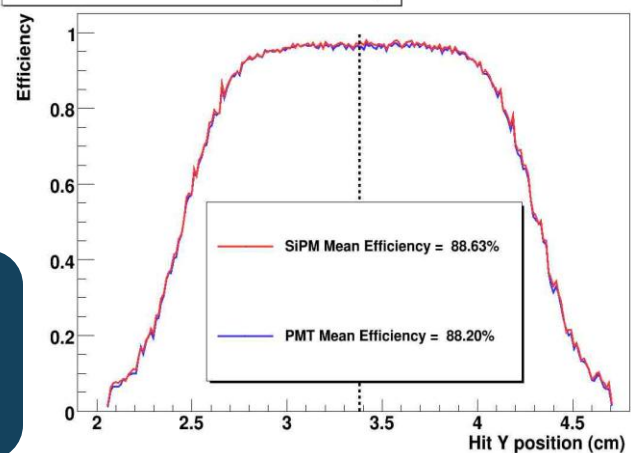
FBK-IRST E5 - S/N Ratio



Photoelectrons Linearity



FBK-IRST E5 - Hit Position Efficiency

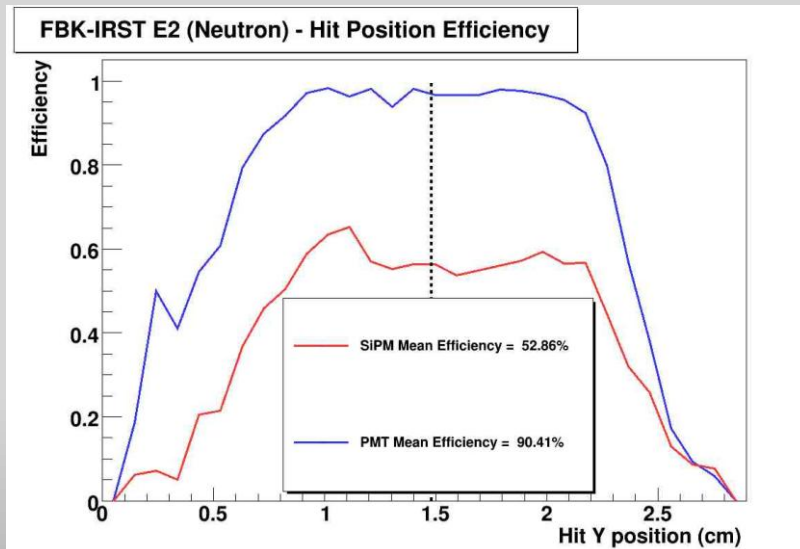


SiPM Performance

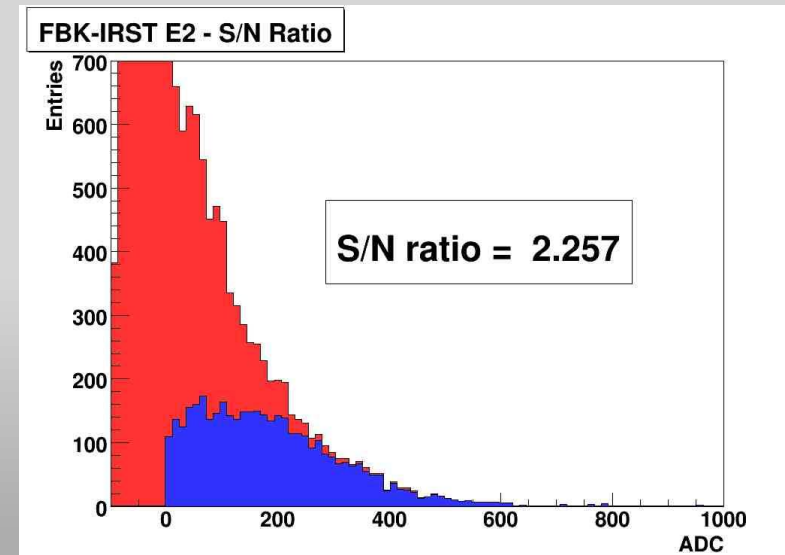
A.Berra *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A* 609, 129-135 (2009)

- Problemi con danno da radiazione
 - Dopo un irraggiamento con un flusso di neutroni ($4.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) le performance sono molto degradate
- Necessari ulteriori studi!

Signal-to-noise
ratio poco
oltre 2



Detection
efficiency
~50%

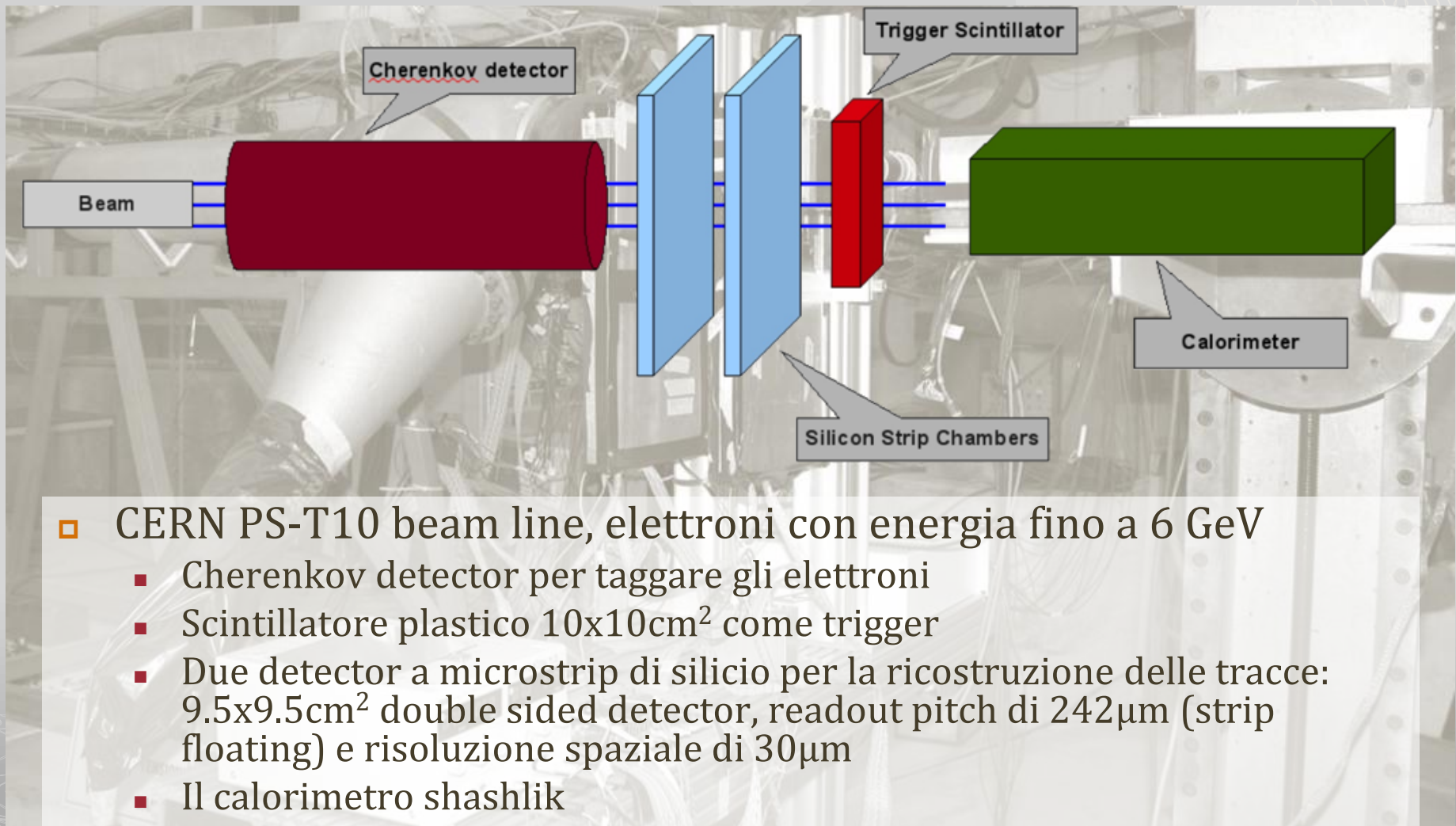


Test Calorimetro



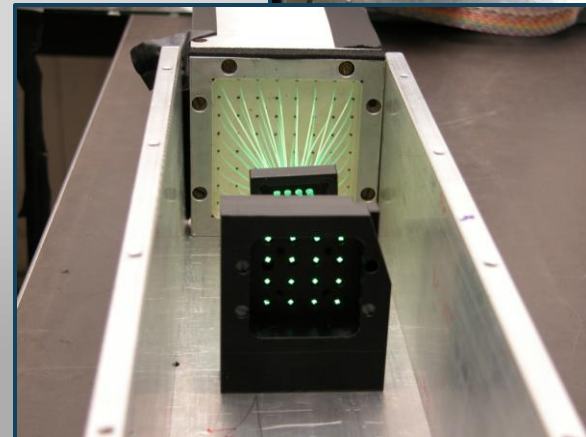
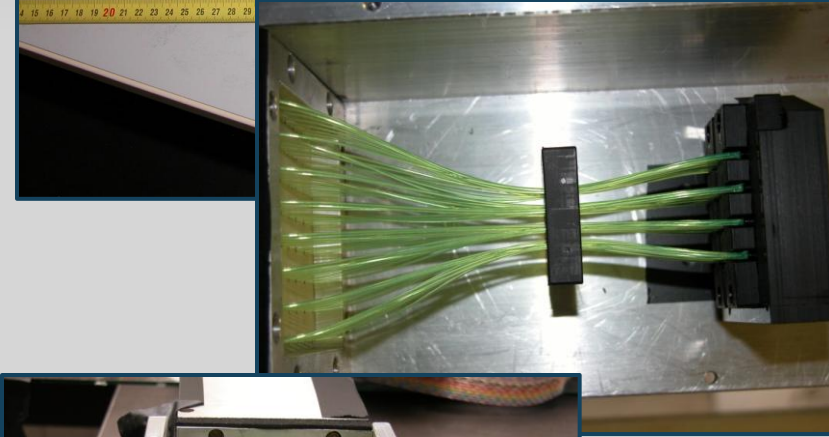
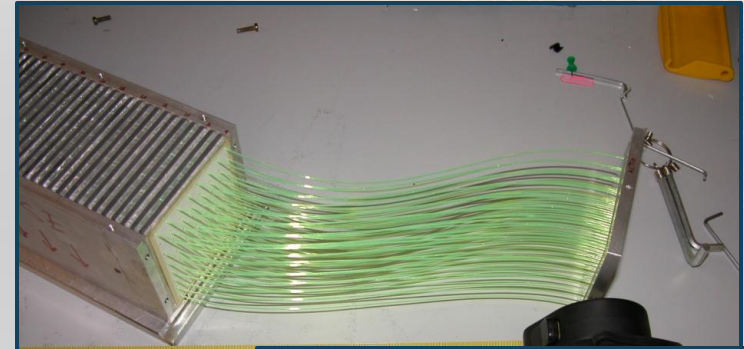
Test condotti in consorzio con la collaborazione FACTOR, un progetto di R&D dell'INFN e della ditta FBK-IRST che ha come scopo lo sviluppo dei SiPMs come detector per rivelatori a scintillazione in fisica delle alte energie e dello spazio

Setup Calorimetro



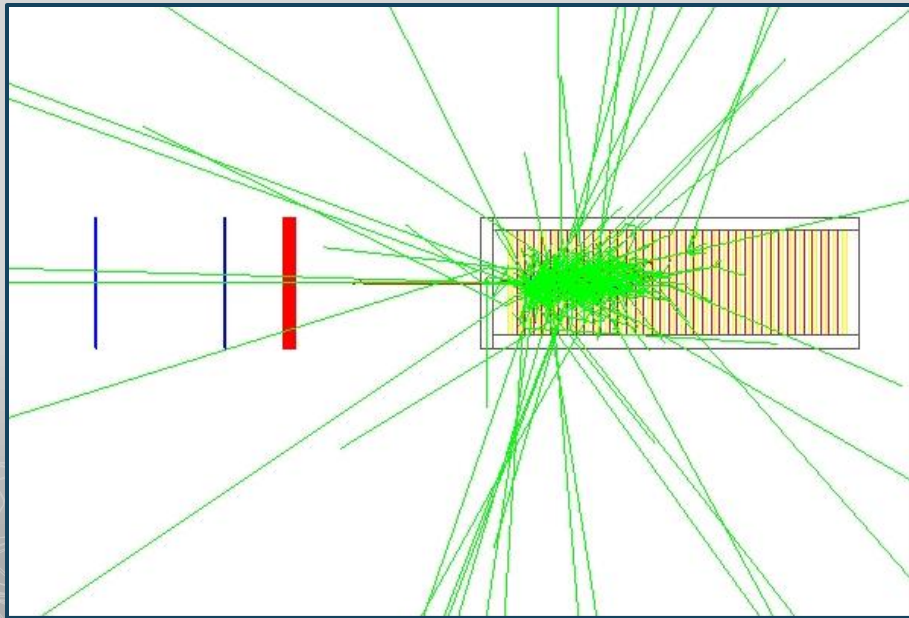
Il Calorimetro Shashlik

- Calorimetro sampling
 - Tile spesse 3mm e con area di $8 \times 8 \text{ cm}^2$
 - 41 tile di scintillatore plastico e 40 tile di piombo per un totale di 24 lunghezze di radiazione (X_0)
- Readout tramite 64 fibre WLS da 0.8mm di diametro, raccolte in gruppi di 4 per un totale di 16 canali
 - La meccanica è costruita in modo da alloggiare sia un array di SiPMs che un fotomoltiplicatore
- **NB: il segnale dei SiPM non è amplificato!**



Simulazione in Geant 4

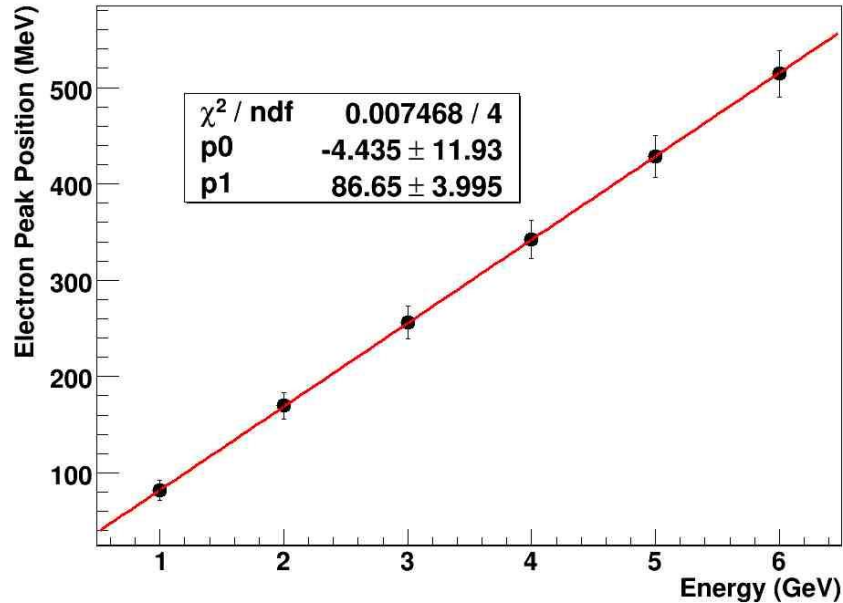
- Simulazione completa della linea di fascio
- Scopo: valutare la linearità e la risoluzione del calorimetro con un fascio di elettroni



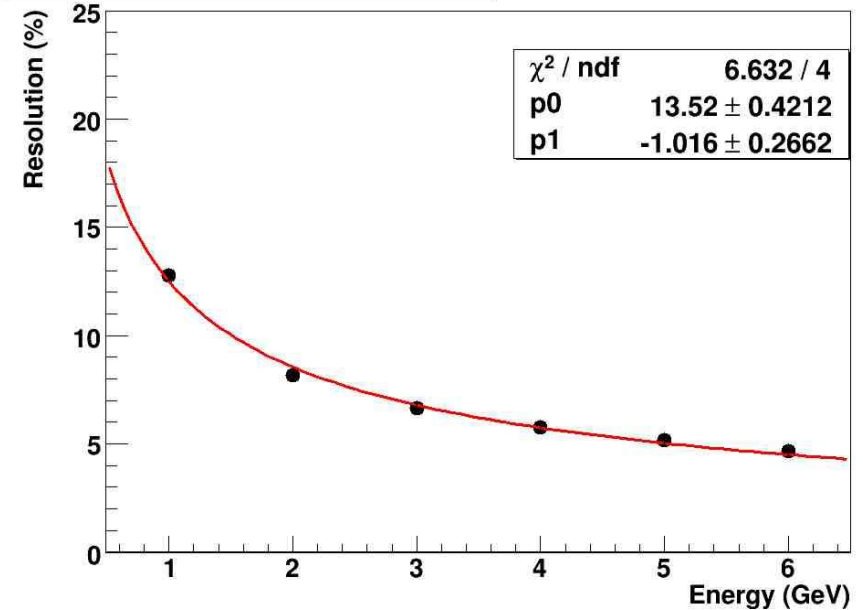
- Attivazione dei processi EM e adronici per discriminare pioni da elettroni
- NB: nessun modello implementato per valutare l'efficienza di raccolta luce!

Simulazione in Geant 4

Energy Response Linearity - Simulation

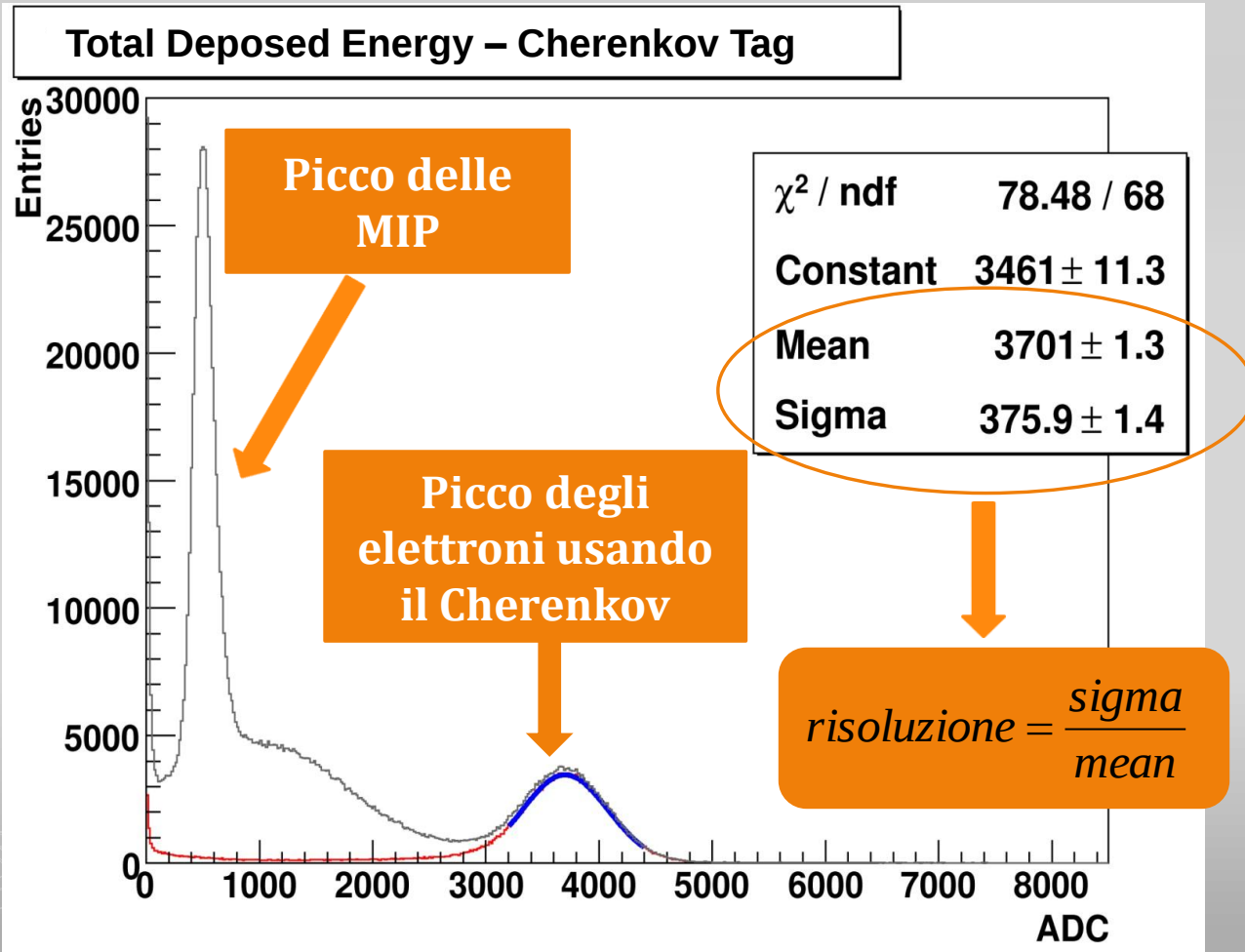


Energy Resolution - Simulation



$$\text{resolution} = \frac{P0}{\sqrt{E}} + P1 \cong \frac{14\%}{\sqrt{E}}$$

Analisi Dati



Eventi singola traccia
identificati usando le
camere al silicio



Calibrazione dei 16
canali usando i segnali
delle MIP

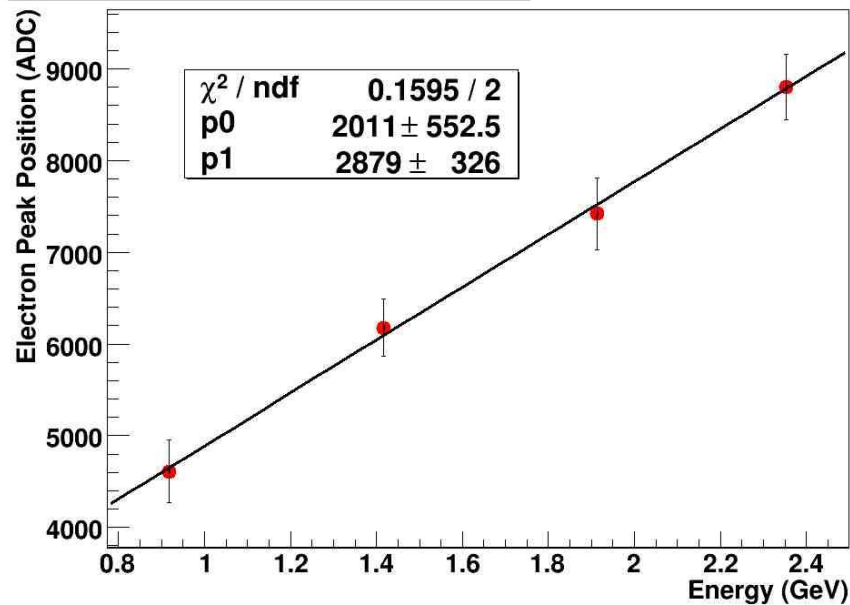


Informazioni del
rivelatore Cherenkov
per selezionare gli
elettroni

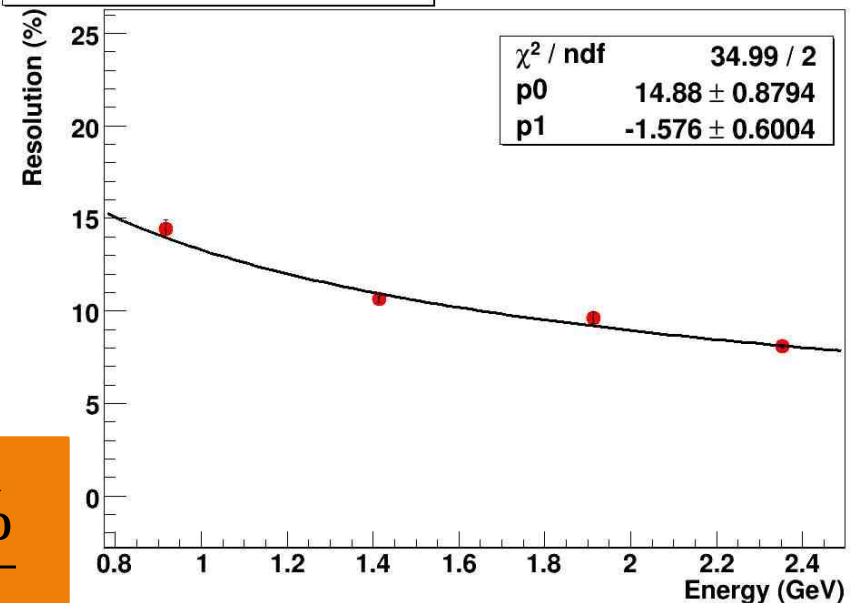
Run Preliminari con PMT

- A scopo comparativo con i SiPM sono stati effettuati dei run preliminari usando come readout un PMT a 16 canali

Energy Response Linearity - PMT

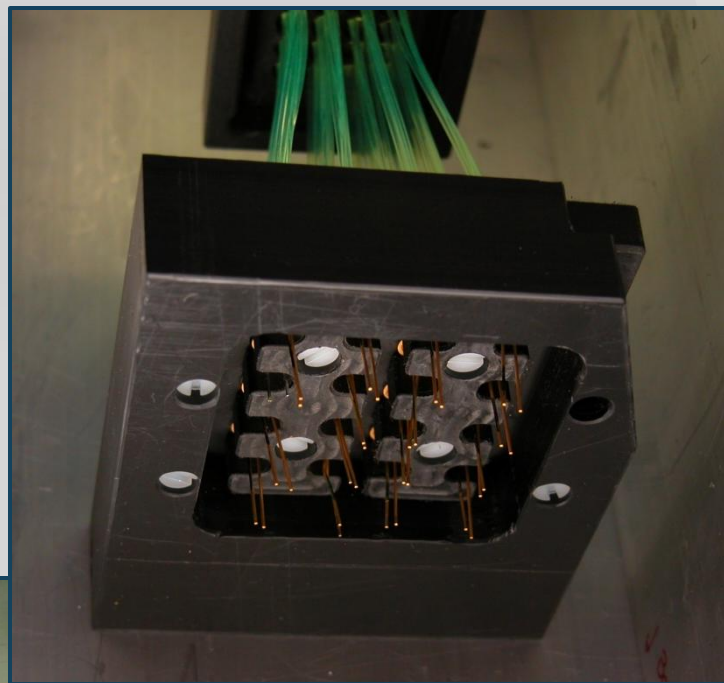


Energy Resolution - PMT



$$\text{resolution} = \frac{P0}{\sqrt{E}} + P1 \cong \frac{15\%}{\sqrt{E}}$$

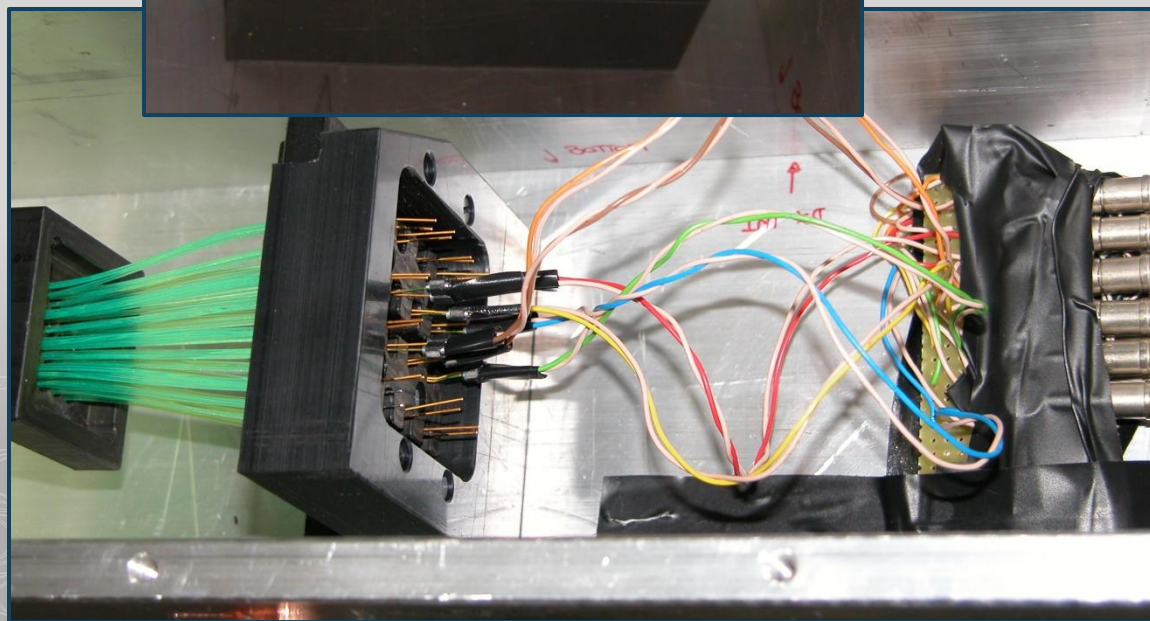
Presatura Dati Con i SiPM



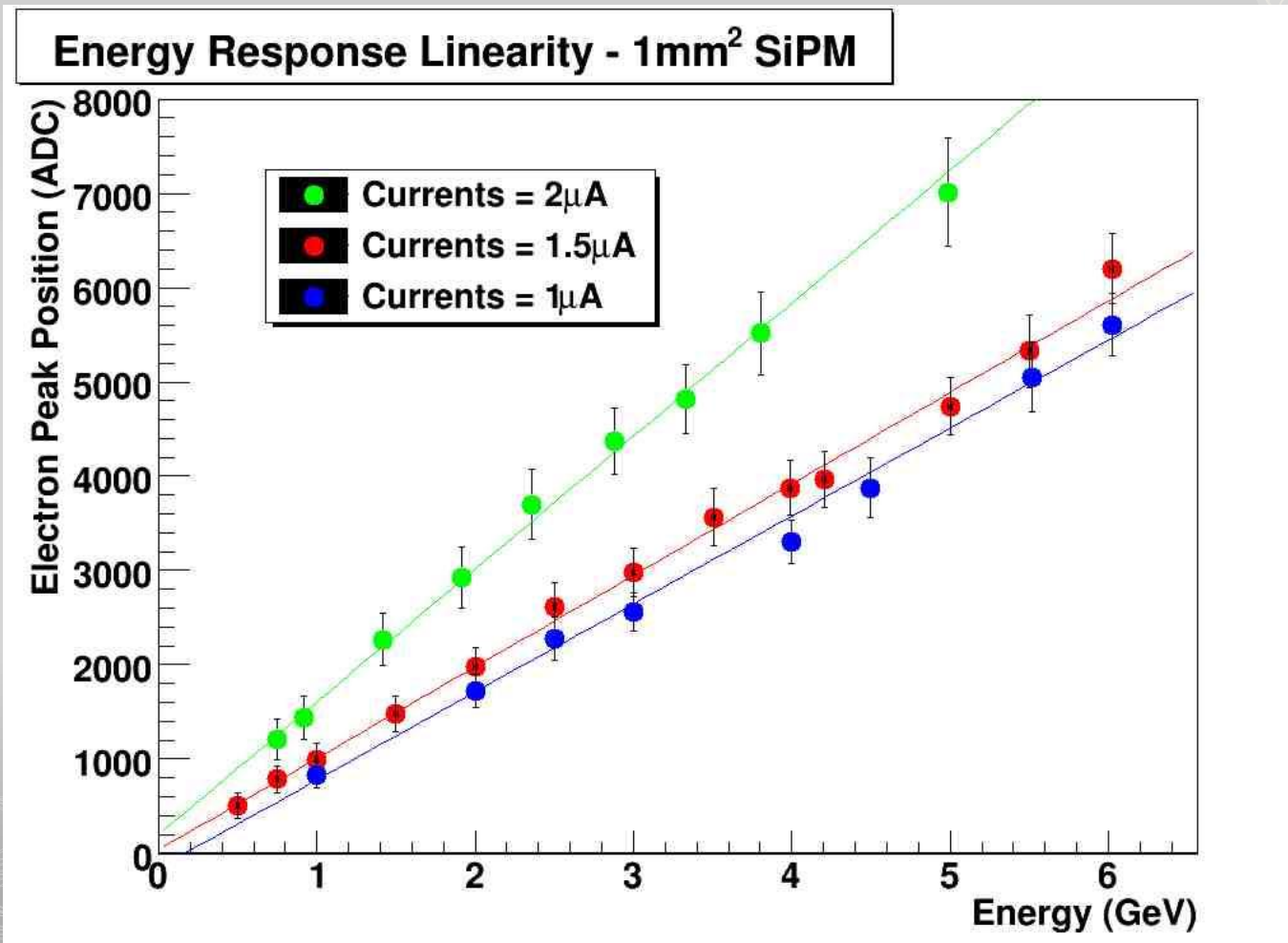
3 scan energetici
con correnti
di $\sim 2\mu\text{A}$, $\sim 1.5\mu\text{A}$ e
 $\sim 1\mu\text{A}$

Alimentazione
con 4 power
supplies

Sfortunatamente
solo 15 canali
funzionanti

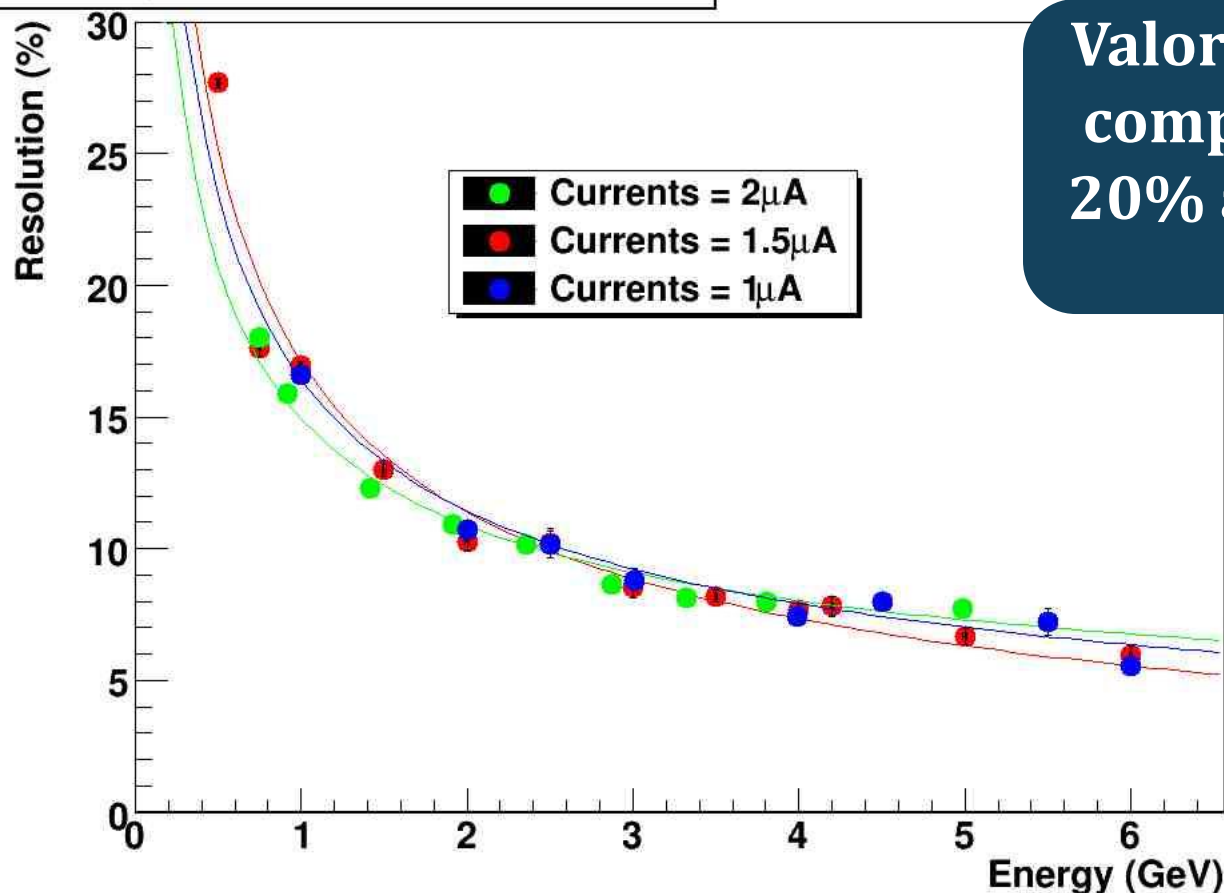


SiPM - Linearità



SiPM – Risoluzione

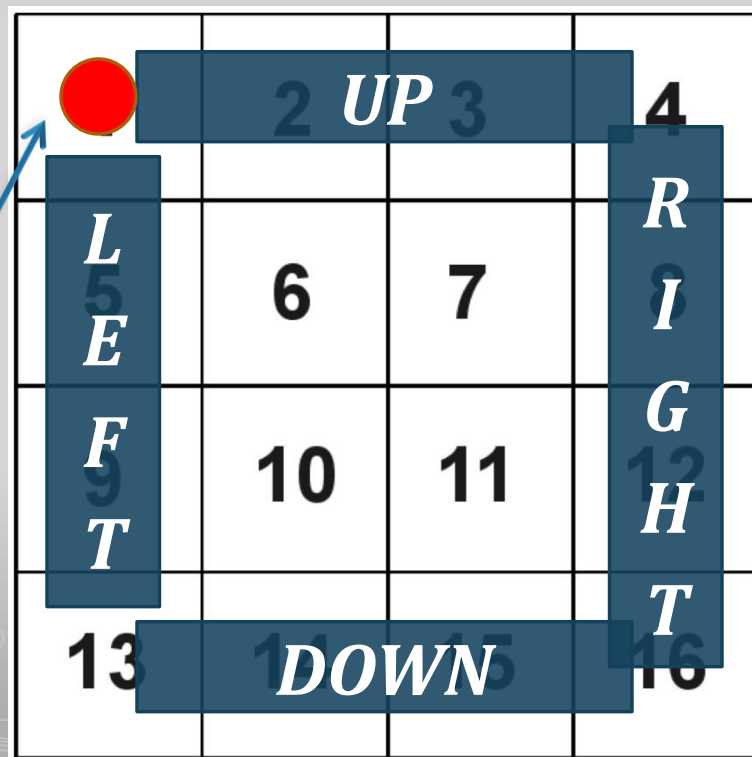
Energy Resolution - 1mm² SiPM



Valori di risoluzione compresi fra 14% e 20% a seconda delle correnti

Risoluzione Spaziale – Parametro Eta

- Plot parametro Eta VS Posizione della traccia
 - Fit lineare per ottenere una relazione Eta-Posizione

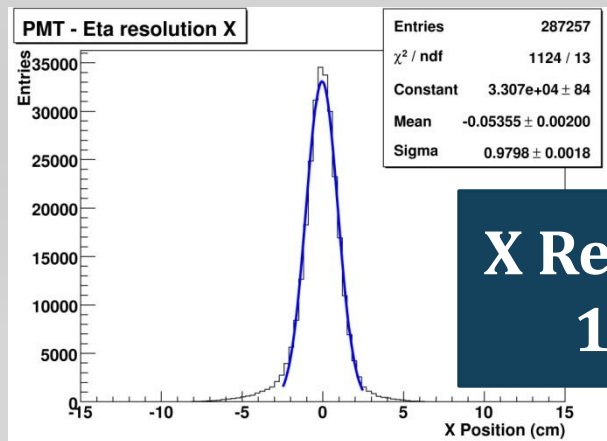


SiPM non
funzionante

$$\eta_x = \frac{Left - Right}{Left + Right}$$

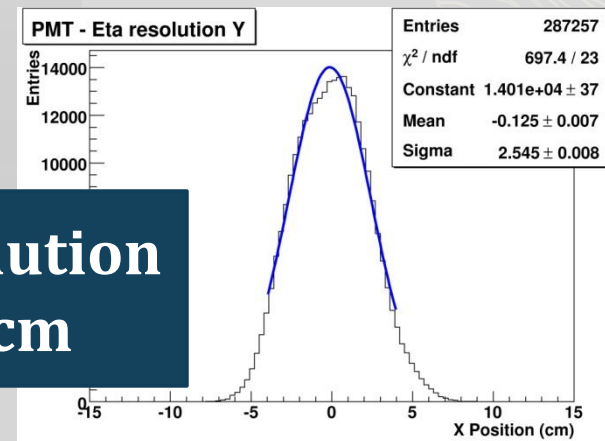
$$\eta_y = \frac{Up - Down}{Up + Down}$$

Risoluzione spaziale

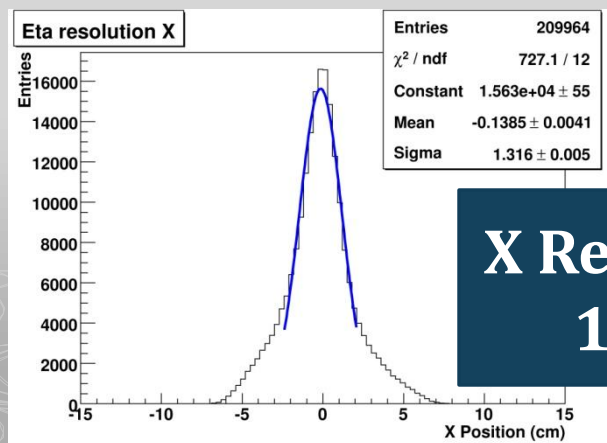


**X Resolution
1.0 cm**

PMT

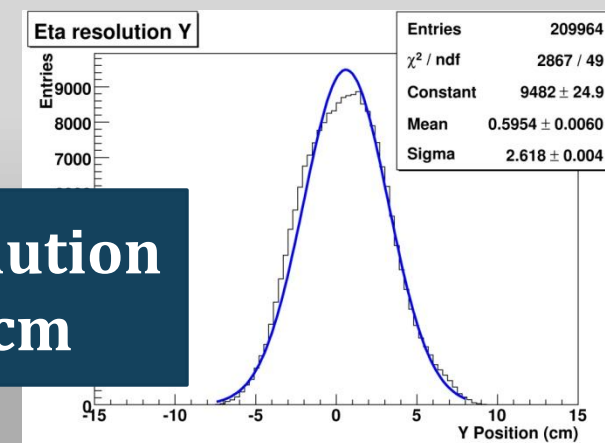


**Y Resolution
2.6 cm**



**X Resolution
1.3 cm**

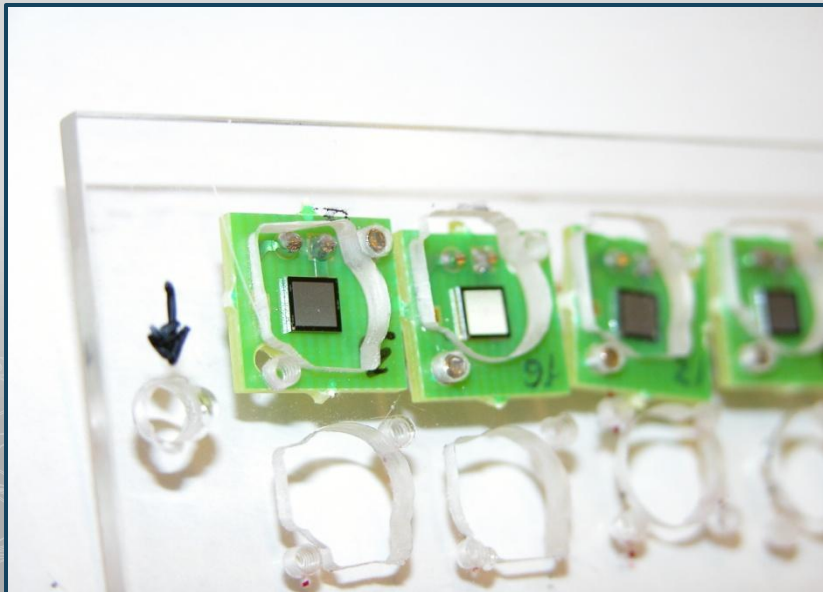
SiPM



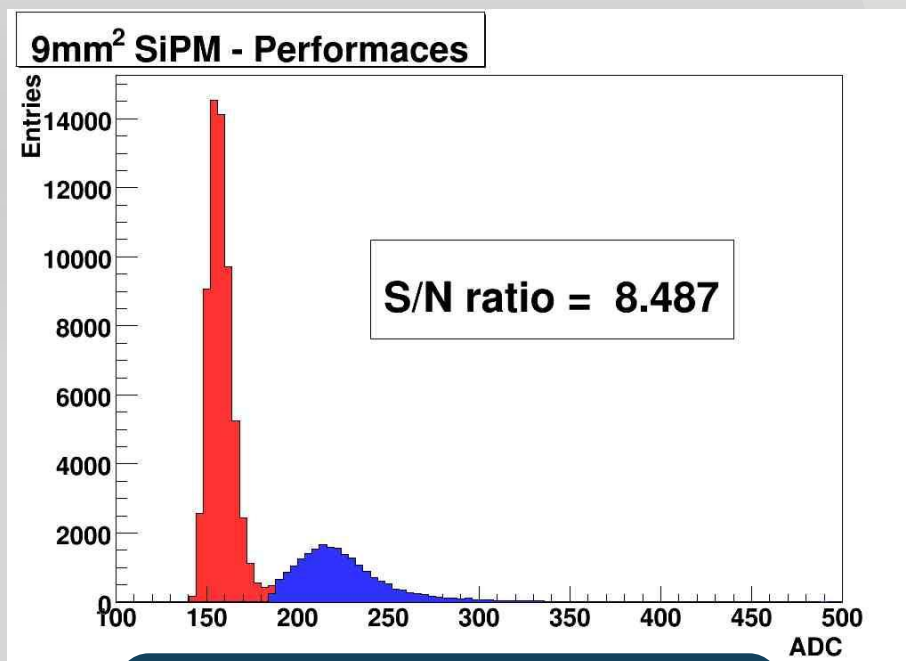
**Y Resolution
2.6 cm**

Test Preliminari – SiPM da 9 mm²

- L'area maggiore (3x3mm²) è ottimizzata per raccogliere più luce proveniente dalle fibre WLS
 - Stesso breakdown voltage del modello da 1mm² (~30V)
 - Stesso range di overvoltage (~5V)
 - **3600 pixel**: più pixel, meno saturazione!
- Modulo di test: barre di scintillatore lette da fibre WLS da 1.2mm



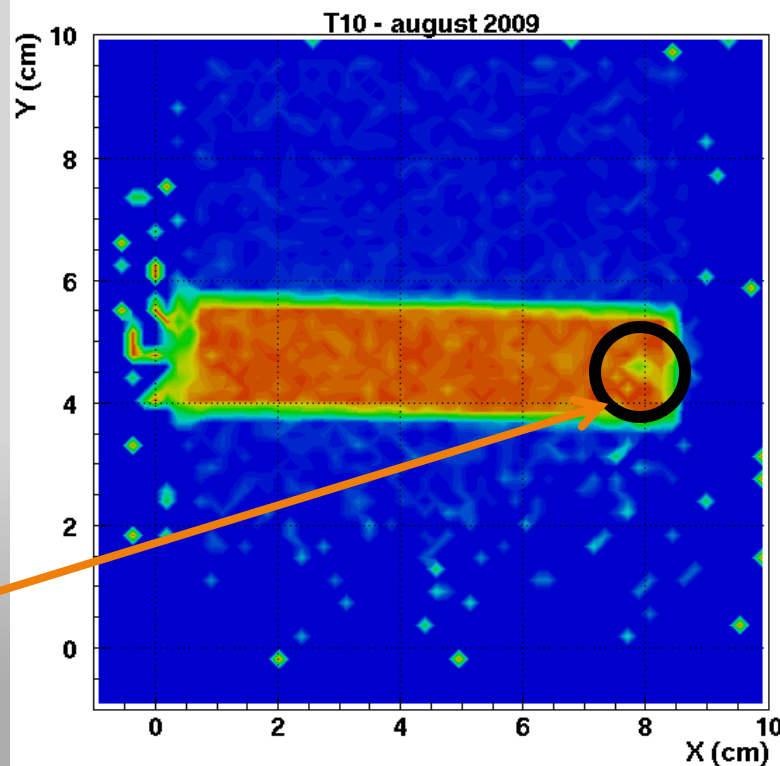
Test Preliminari – SiPM da 9 mm²



Eccellente S/N, anche
se non amplificato!

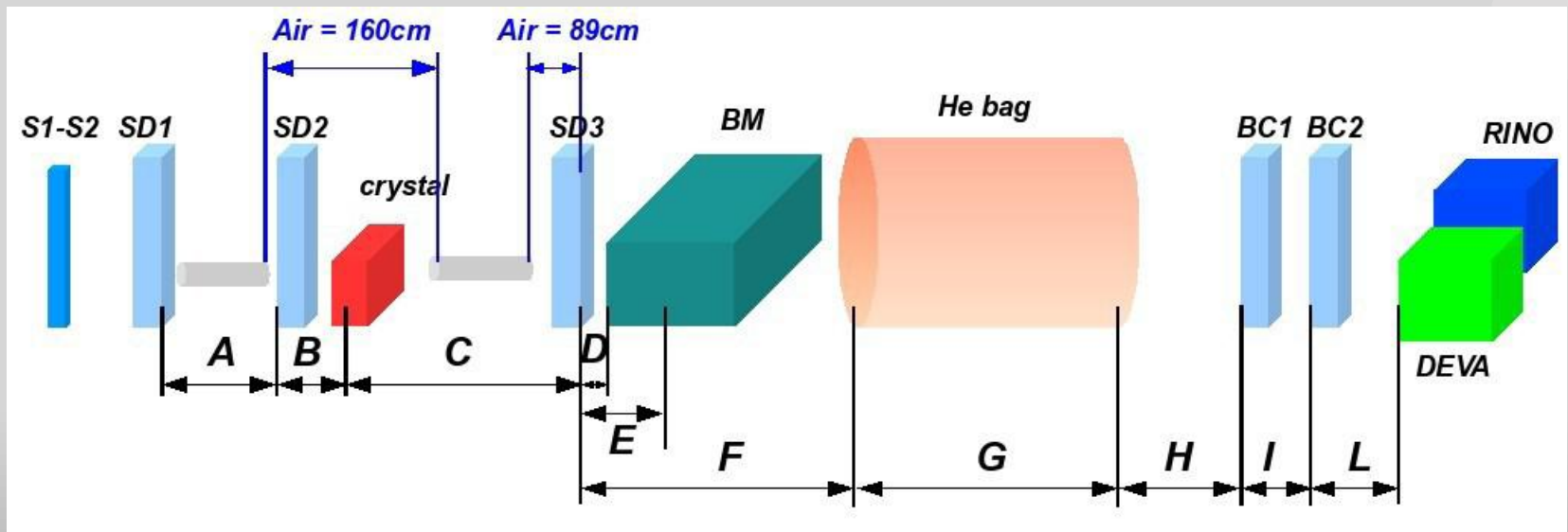
È visibile il buco
della barra usato per
inserire la colla

Efficienza di raccolta
luce vicina al 100%



Test ad Alta Energia

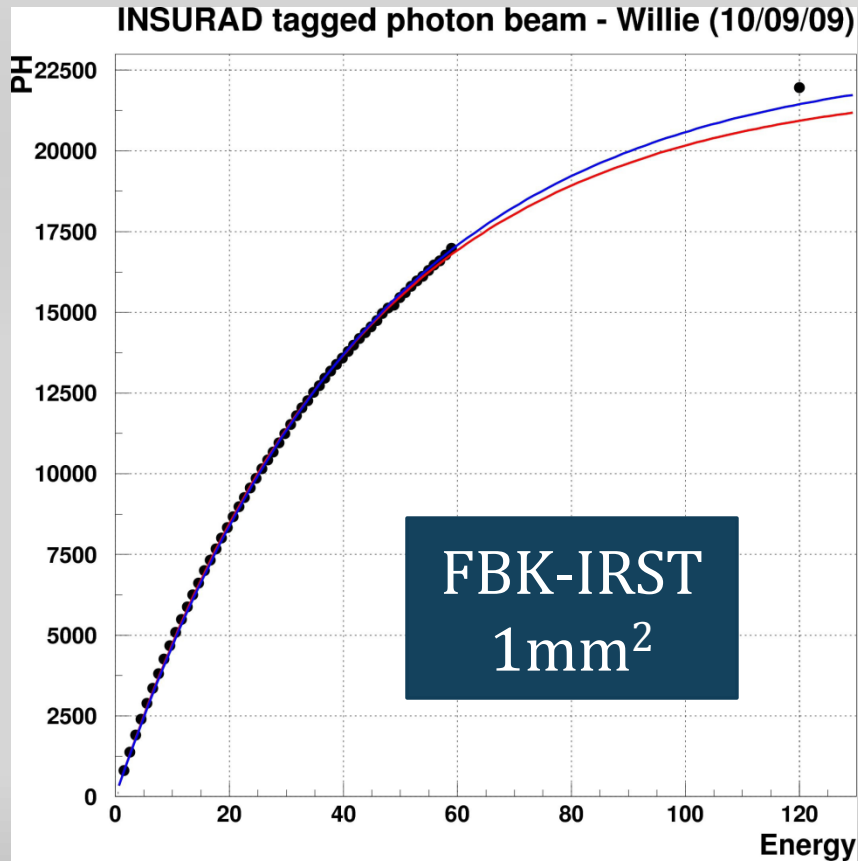
- ❑ Fascio di fotoni taggati @CERN SPS H4 line
- ❑ Fotoni ottenuti tramite channeling di elettroni in cristalli curvati



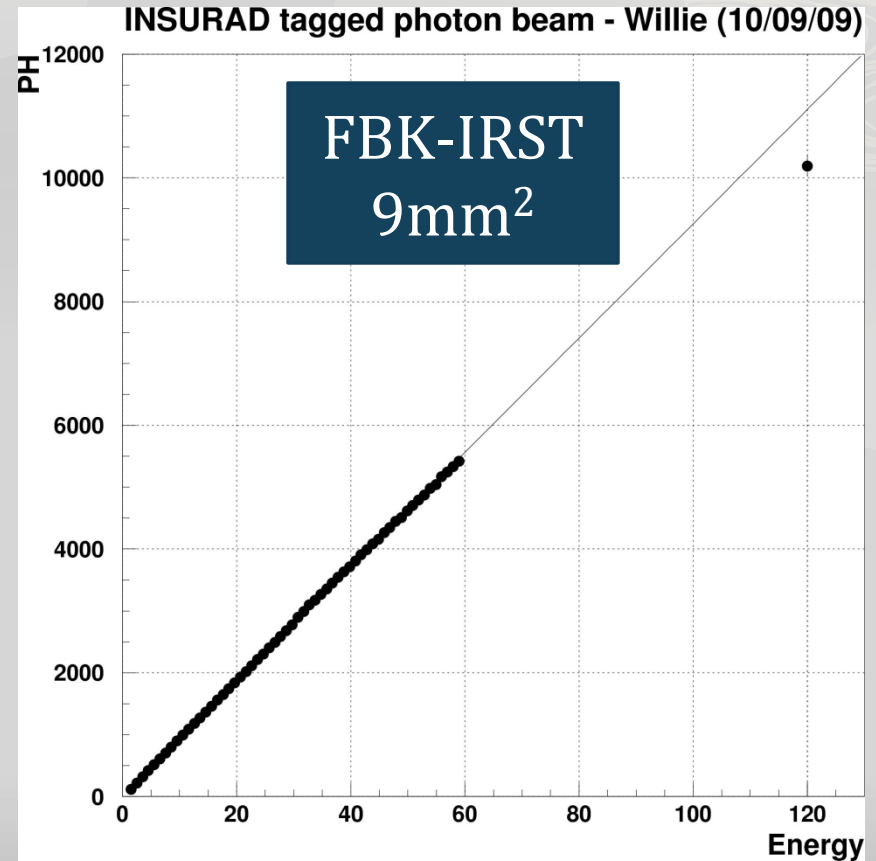
<http://insulab.dfm.uninsubria.it>



Test ad Alta Energia



Buona linearità fino
a 20 GeV per il
modello da 1mm²

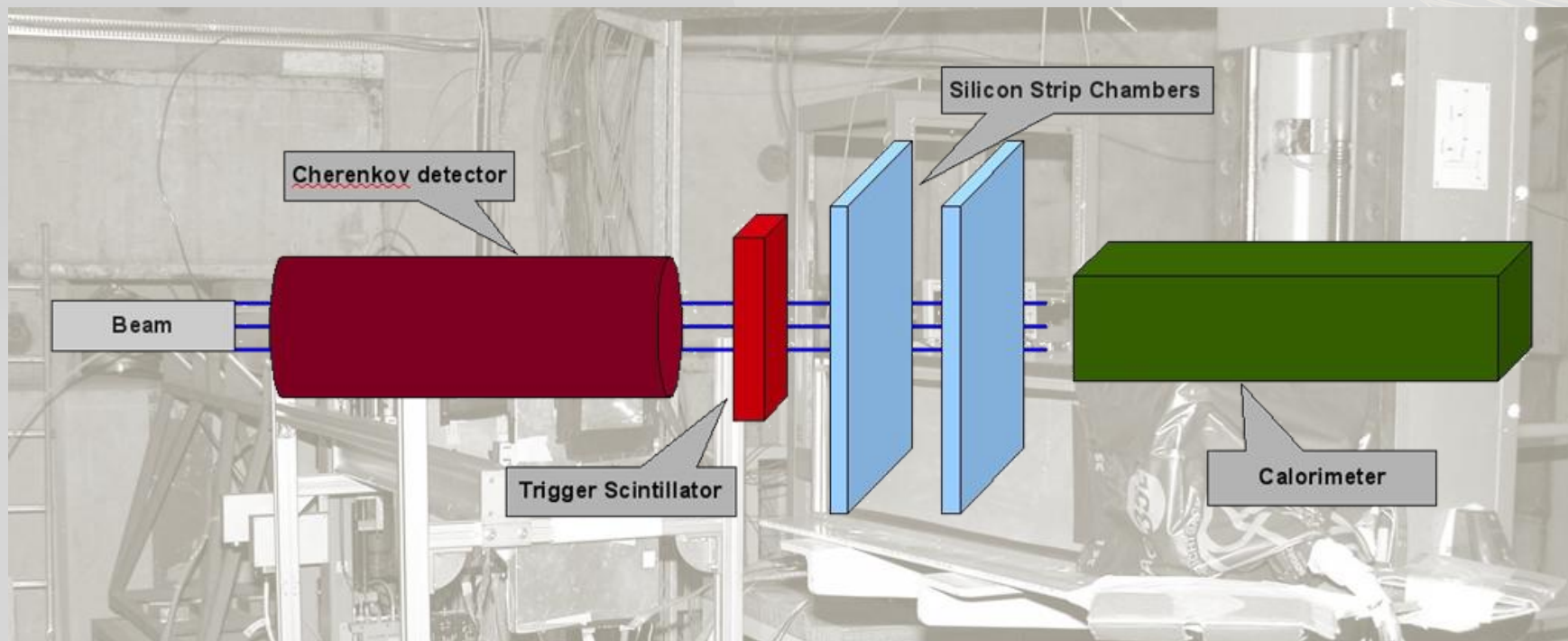


Buona linearità fino a 60
GeV $\Rightarrow$ effetto del maggior
numero di pixel!

Test Calorimetro (2)



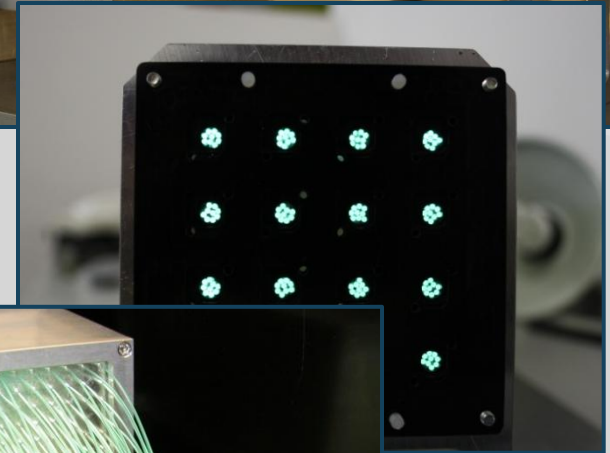
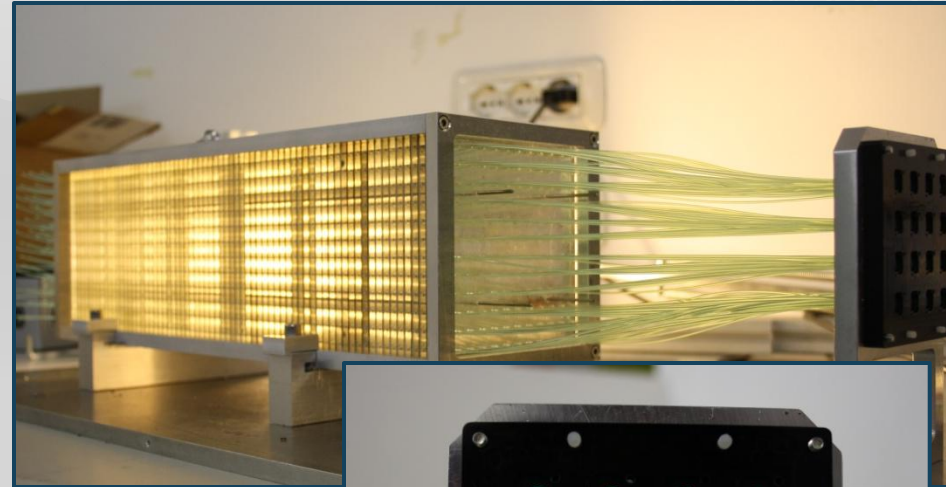
Setup Calorimetro (2)



- CERN PS-T9 beam line, elettroni con energia fino a 7 GeV
 - Cherenkov detector per taggare gli elettroni
 - Scintillatore plastico $10 \times 10 \text{ cm}^2$ come trigger
 - Due detector a microstrip di silicio per la ricostruzione delle tracce: $9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$ double sided detector, readout pitch di $242 \mu\text{m}$ (strip floating) e risoluzione spaziale di $30 \mu\text{m}$
 - Il nuovo calorimetro shashlik

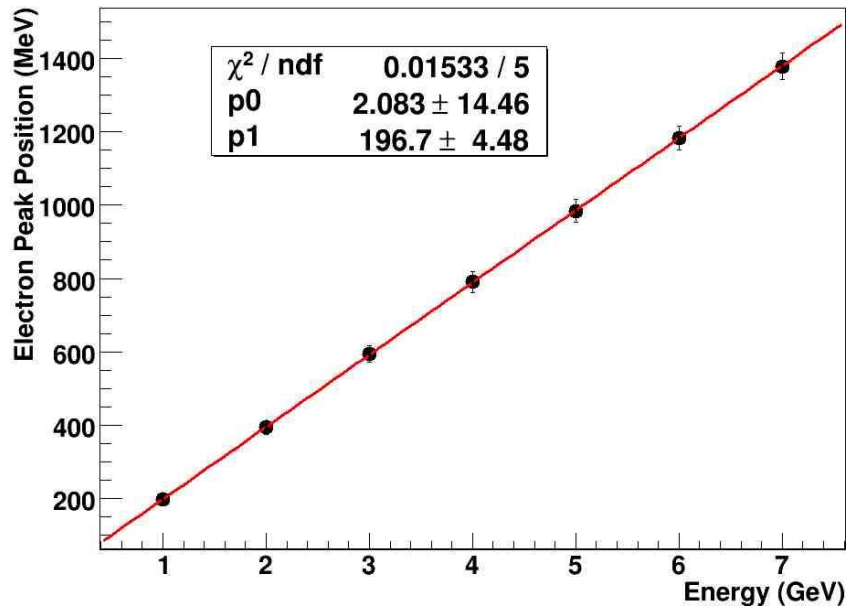
Il Nuovo Calorimetro Shashlik

- Calorimetro sampling
 - 70 tile di scintillatore plastico spesse 4mm e con area di $12 \times 12 \text{ cm}^2$
 - 69 tile di piombo spesse 1.5mm con area di $12 \times 12 \text{ cm}^2$
 - Totale di 19 lunghezze di radiazione (X_0)
- Readout tramite 144 fibre WLS da 1.2mm di diametro, raccolte in gruppi di 9 per un totale di 16 canali
 - Readout tramite un array di SiPM $3 \times 3 \text{ mm}^2$

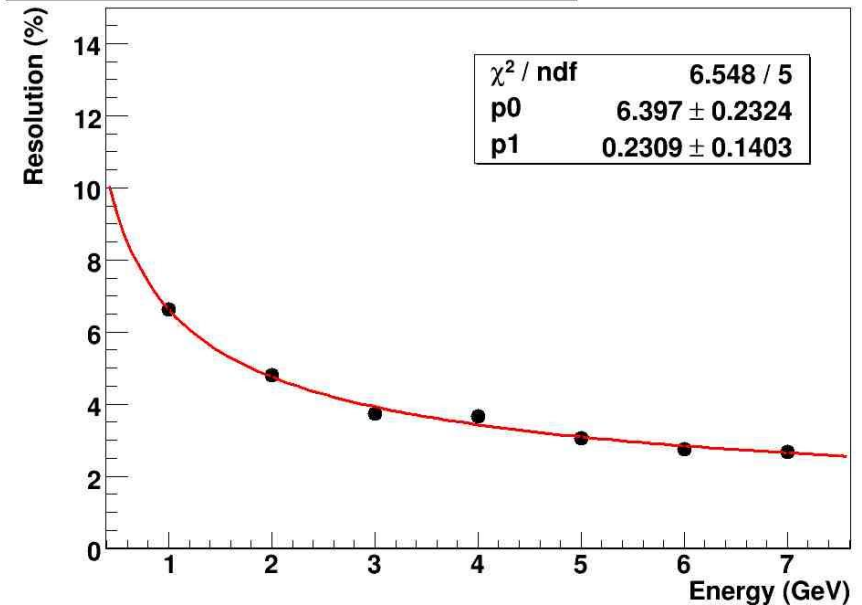


Simulazione in Geant 4

Energy Response Linearity - Simulation Jack

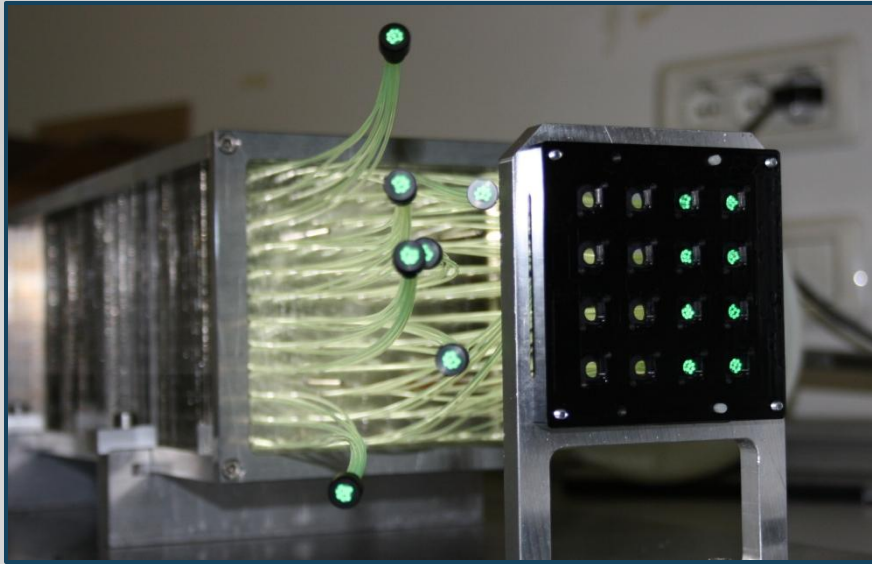


Energy Resolution - Simulation Jack



$$\text{resolution} = \frac{P0}{\sqrt{E}} + P1 \cong \frac{6\%}{\sqrt{E}}$$

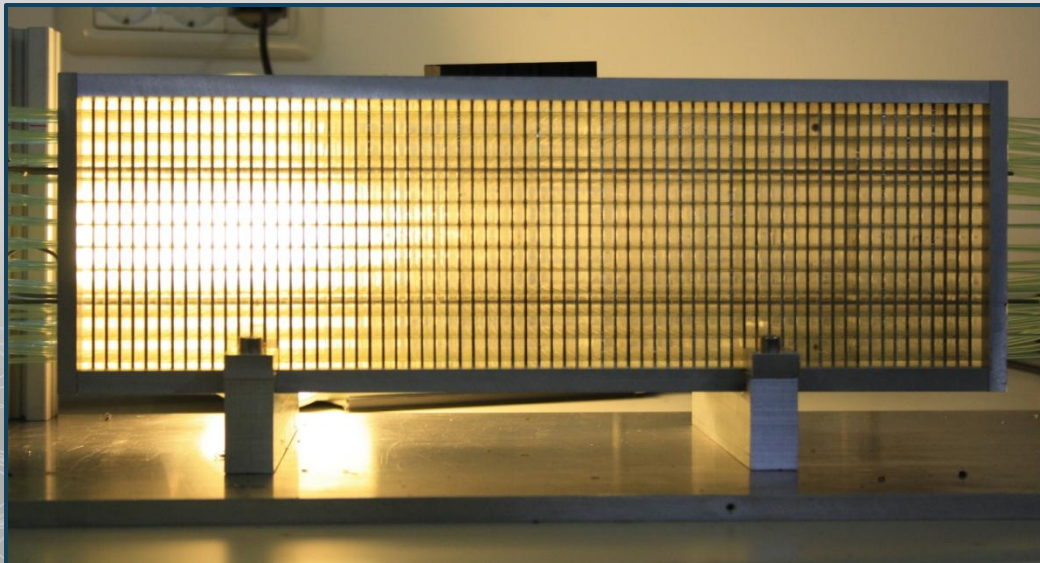
Presa Dati Con i Nuovi SiPM



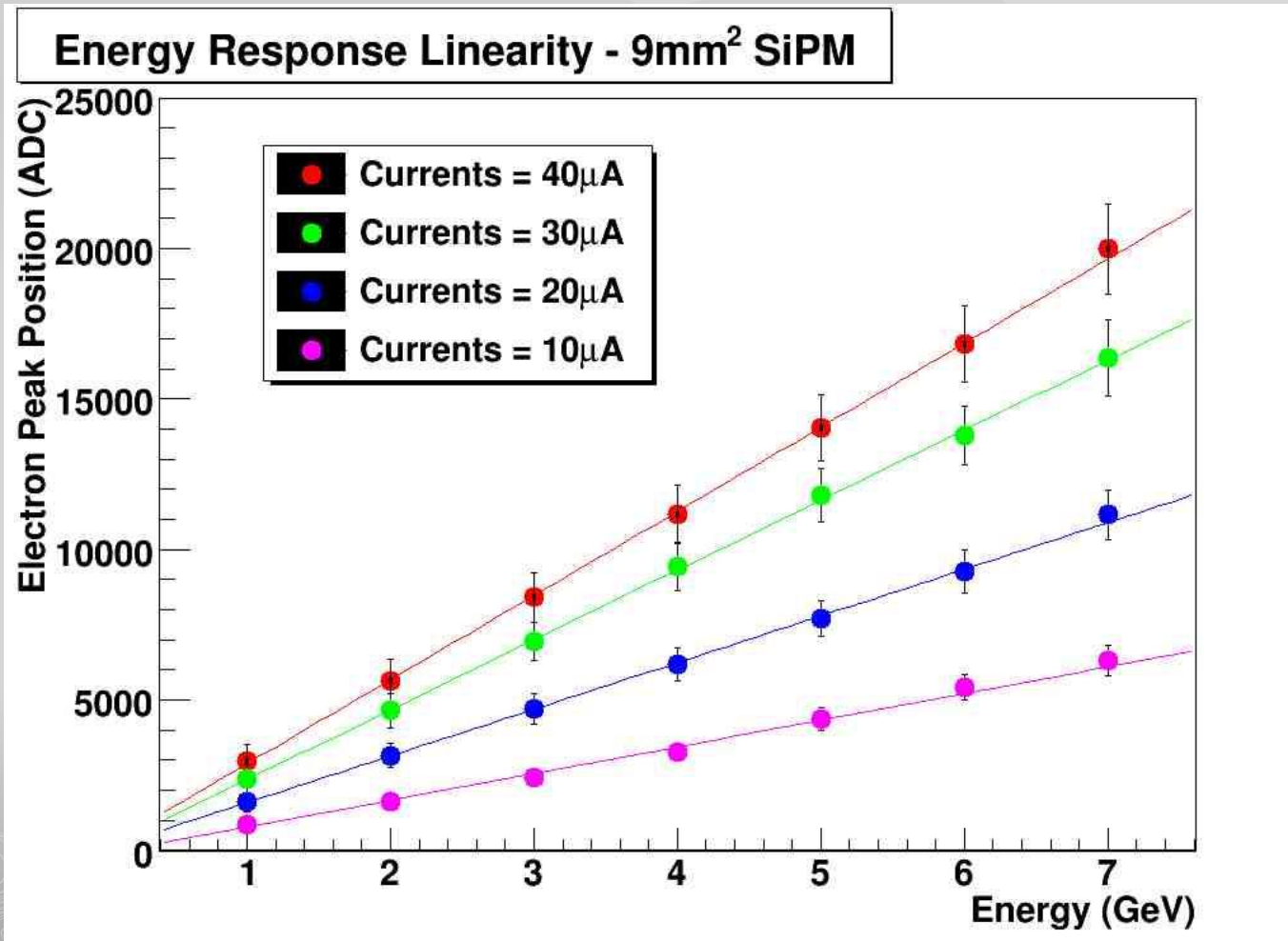
**4 scan energetici
con correnti di
 $\sim 40\mu\text{A}$, $\sim 30\mu\text{A}$,
 $\sim 20\mu\text{A}$ e $\sim 10\mu\text{A}$**

**Nuove basette di
alimentazione**

**Tutti i canali
funzionanti!**

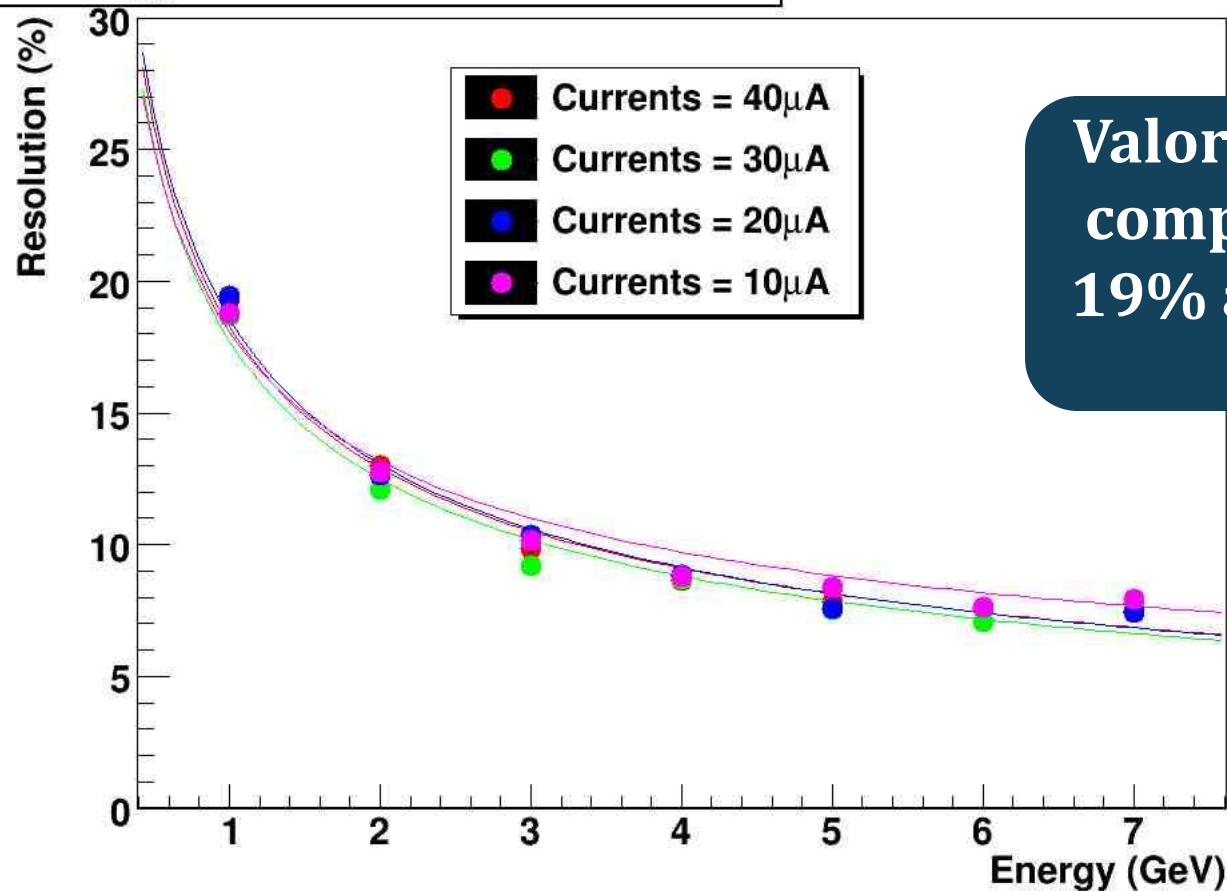


SiPM - Linearità



SiPM – Risoluzione

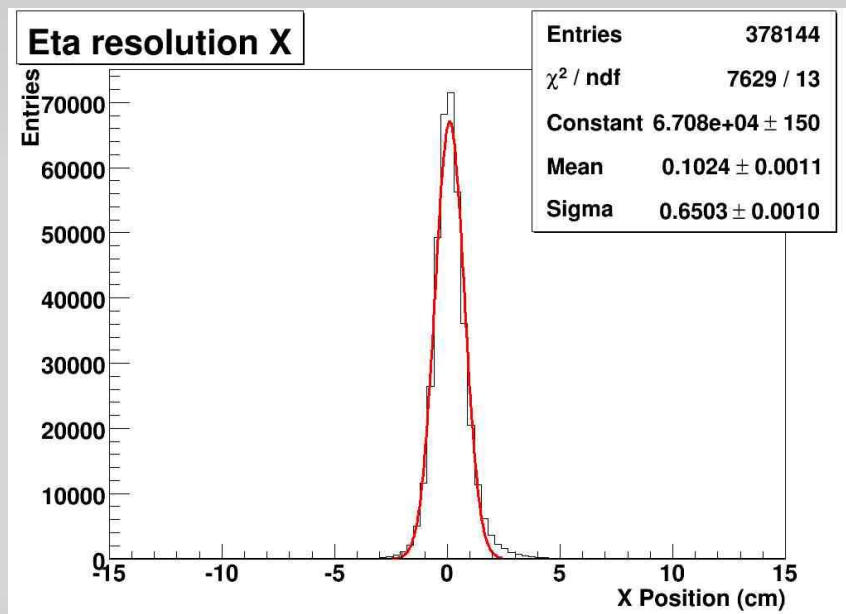
Energy Resolution - 9mm² SiPM



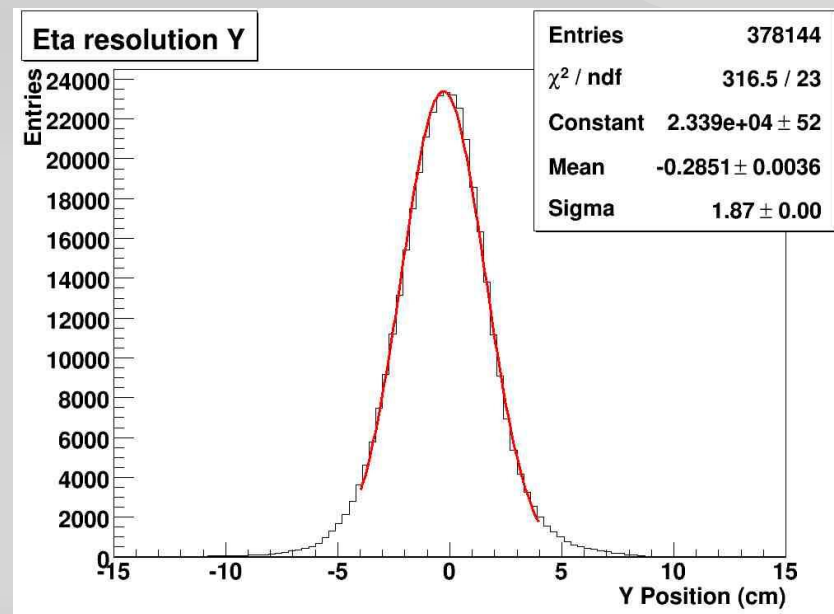
Valori di risoluzione compresi fra 17% e 19% a seconda delle correnti

Risoluzione Spaziale

SiPM 9mm²



X Resolution
0.65 cm



Y Resolution
1.87 cm

Conclusioni

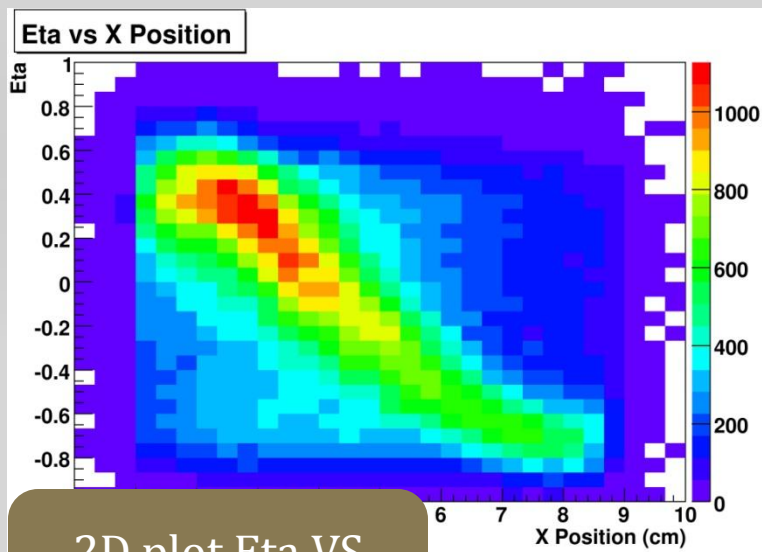
- I SiPM sono stati testati in diversi ambiti applicativi della fisica delle particelle
 - I test effettuati su tracker hanno mostrato ottime performance, anche se sono necessari ulteriori studi sui danni da radiazione
 - I test di calorimetria effettuati con SiPM da 1mm^2 e 9mm^2 non amplificati hanno mostrato buoni risultati (e sono fra i primi risultati in assoluto in questa configurazione). Da indagare il comportamento dei 9mm^2 riguardo la risoluzione
- Per il futuro:
 - Nuova elettronica di lettura per i SiPM
 - Sviluppo di un sistema di test per valutare le performance prima e dopo irraggiamento
 - Nuovi test di calorimetria con segmentazione longitudinale

The background features a light gray gradient with faint, white, wavy lines that resemble ripples on water. In the upper right quadrant, there is a faint, dark gray silhouette of a person's head and shoulders, facing left.

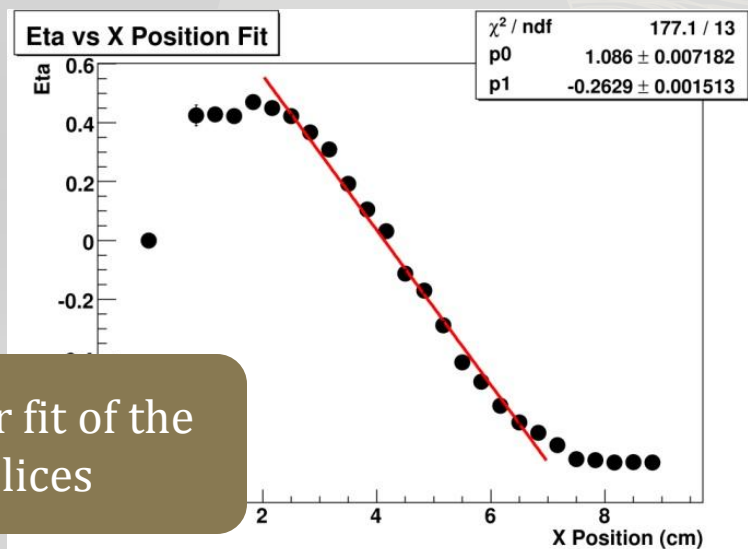
Grazie per l'attenzione!

BACKUP SLIDES

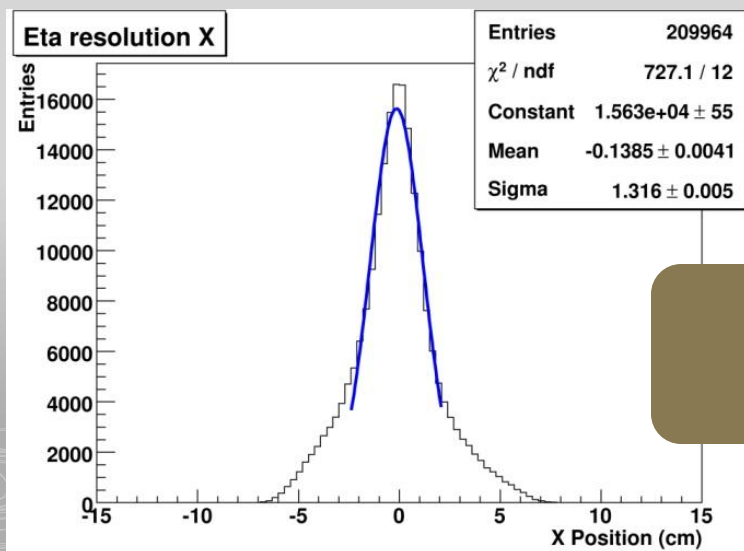
Risoluzione spaziale



2D plot Eta VS
Track position



Linear fit of the
slices



Residuals