

Corso di Fisica Nucleare e Subnucleare II
Prof. Carlo Dionisi

Spettrometro magnetico per laser-plasma acceleration

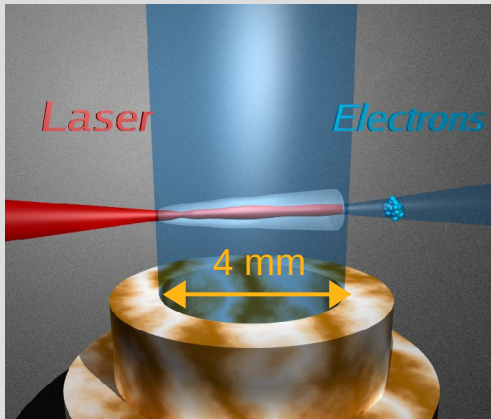
Giulia D'Imperio 14/06/2011

Prof. Riccardo Faccini

PARTE I: esperimento e rivelatore

- Accelerazione di elettroni in plasma
- Caratteristiche di fasci ottenuti
- Caratteristiche del rivelatore: disegno e sue componenti

Accelerazione di elettroni



Accelerazione di elettroni in plasma
campi elettrici acceleranti ~ 100 GV/m
1 GeV in pochi mm

VS

Acceleratori tradizionali

soglia di rottura della cavità a radiofrequenza ~ 10 MV/m
1 GeV in qualche centinaio di m !!

Per esempio: LINAC di SLAC 50 GeV in 3.2 km \rightarrow 16 MV/m

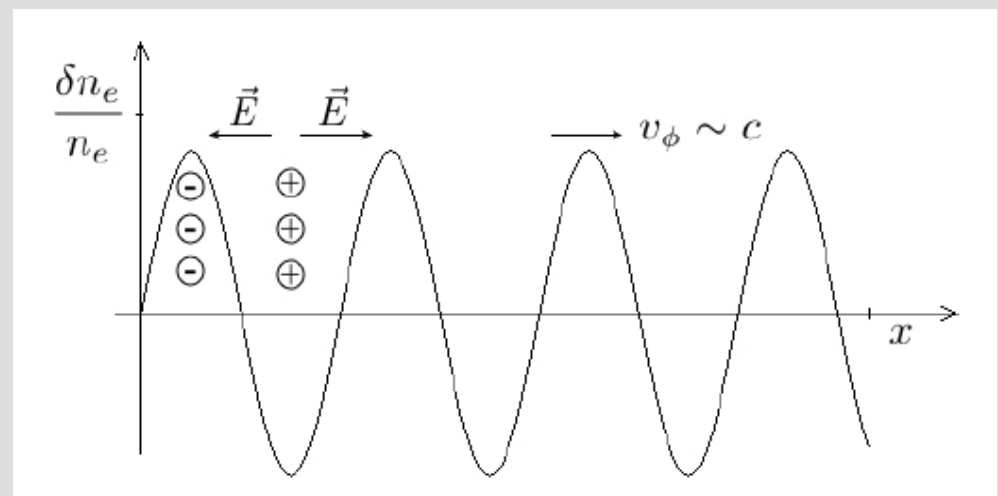
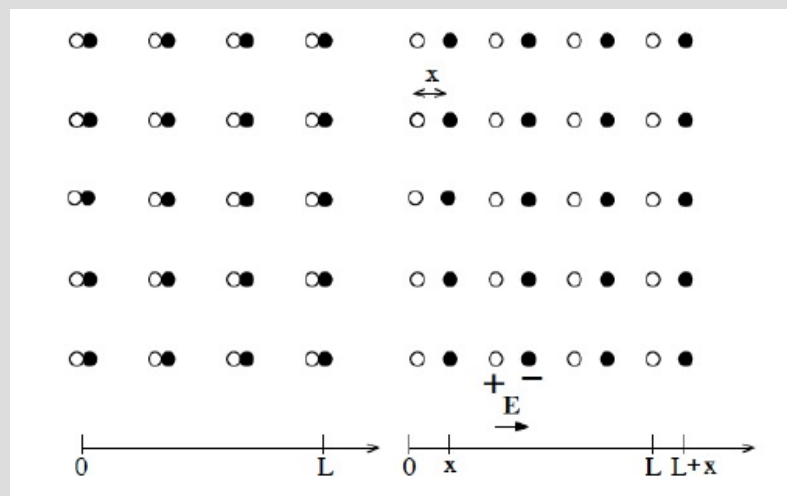


Onde di plasma

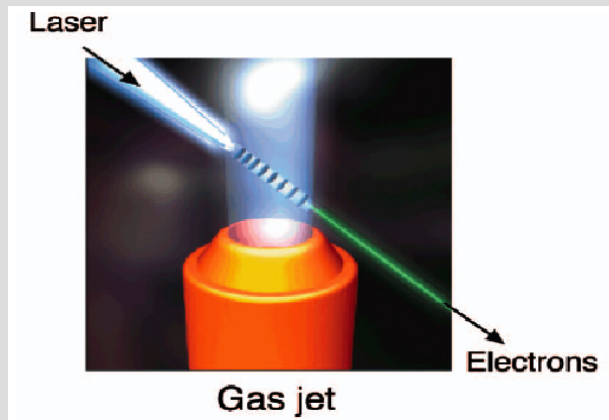
Plasma:

- gas complessivamente neutro ma composto di cariche elettriche
- forze em lungo range → eccitazione mirata, moti collettivi

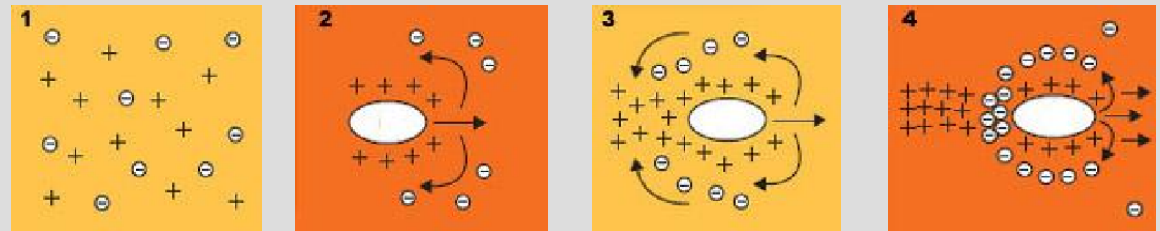
➔ onde di plasma



Eccitazione di onde di plasma tramite laser



Laser wake field acceleration (LWFA)

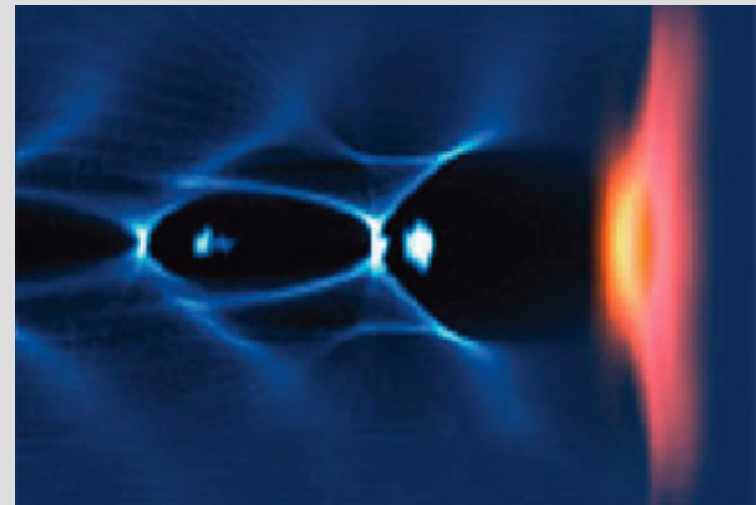


Autoiniezione

(esperimento SITE) → “regime bubble”

Caratteristiche laser FLAME:

- Impulsi brevi $c\tau < \lambda_p / 2$ → $\tau \sim 30$ fs
 - Potenza di picco 166 TW
 - Diametro fascio 8 μm
 - Energia/impulso 5 J
- Lunghezza gas-jet ~ 4 mm



Simulazione 3D della densità elettronica in regime bubble

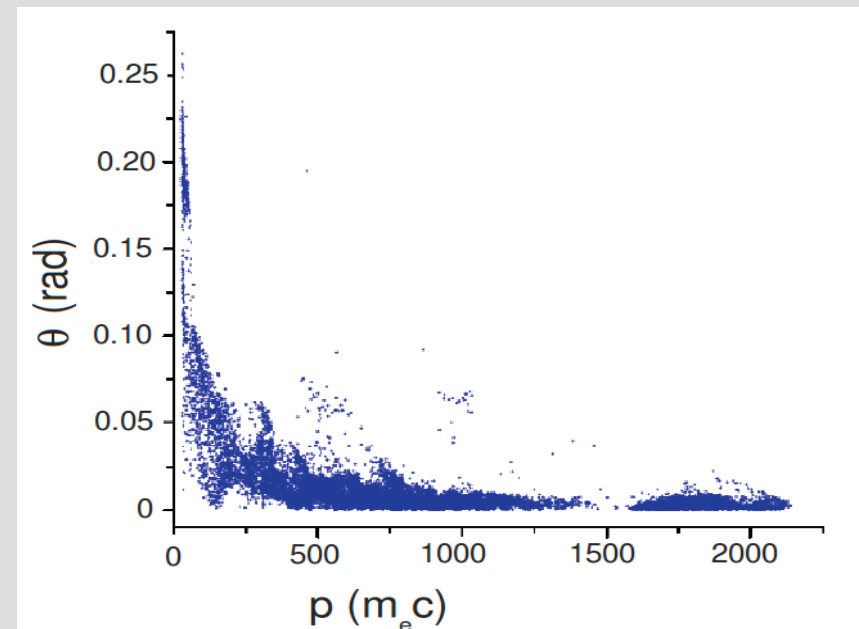
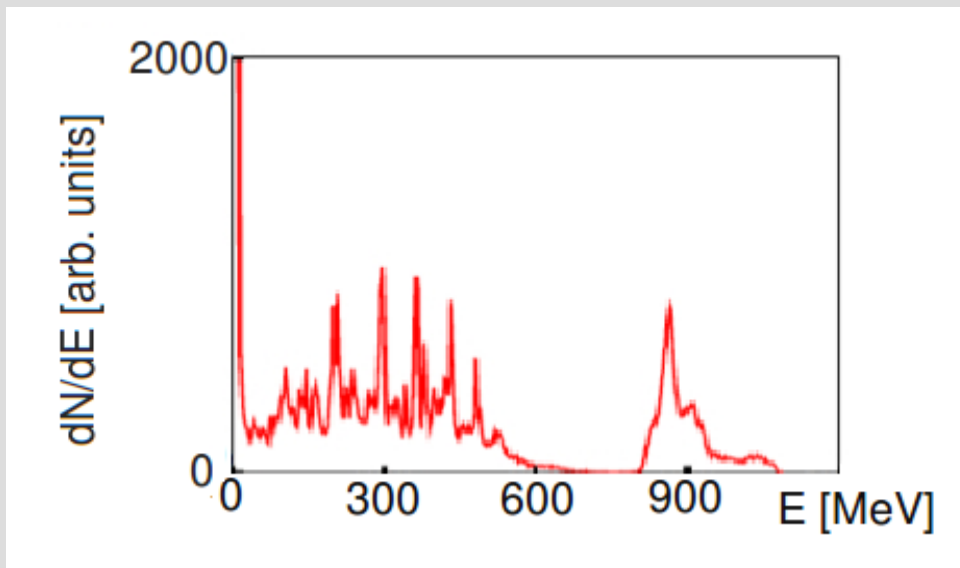
Iniezione esterna (finalizzata ad acceleratori a cascata)

prevista combinando il laser FLAME e l'acceleratore lineare SPARC

Caratteristiche degli elettroni accelerati (SITE)

Usando i parametri della slide precedente, da simulazione si ottengono le caratteristiche del fascio aspettato:

- Fascio prodotto $\sim 10^8$ particelle
- Spettro in energia molto largo, tra **10 MeV – 1 GeV**
- Divergenza angolare dipendente dall'energia e ~ 2 mrad nella regione di spettro analizzata, da qualche decina di MeV a 1 GeV



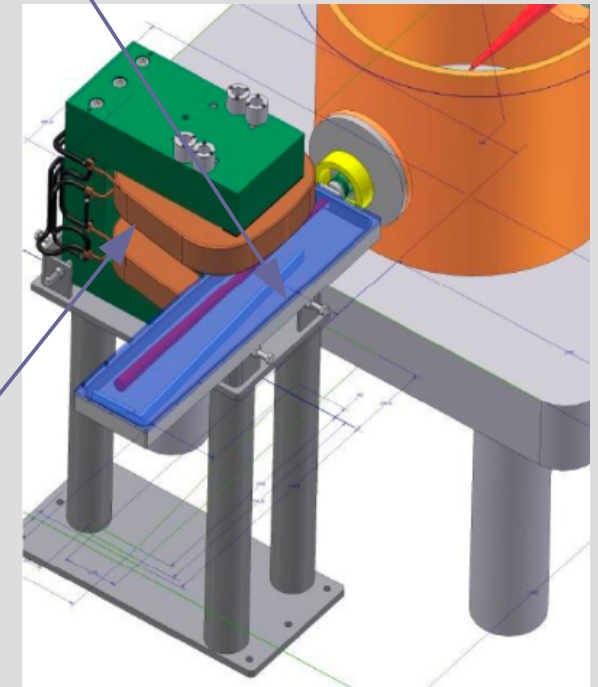
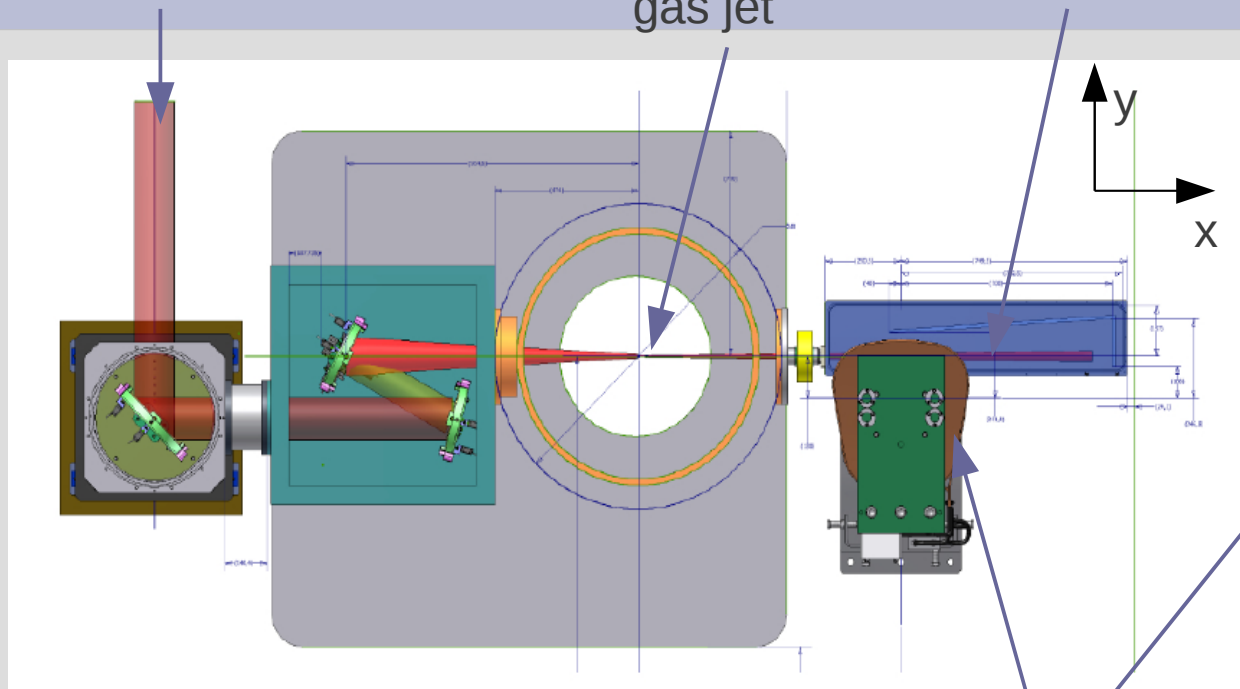
Unità di massa elettronica (0.5 MeV)

Spettrometro magnetico (1)

fascio laser

gas jet

rivelatore a fibre scintillanti



dipolo magnetico

Caratteristiche del magnete:

- gap 6 cm
- B massimo del prototipo 0.5 T
(B massimo previsto per l'esperimento ~1.8 T)

Spettrometro magnetico (2)

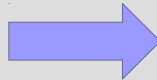
Principio di funzionamento dello spettrometro:

diverso impulso

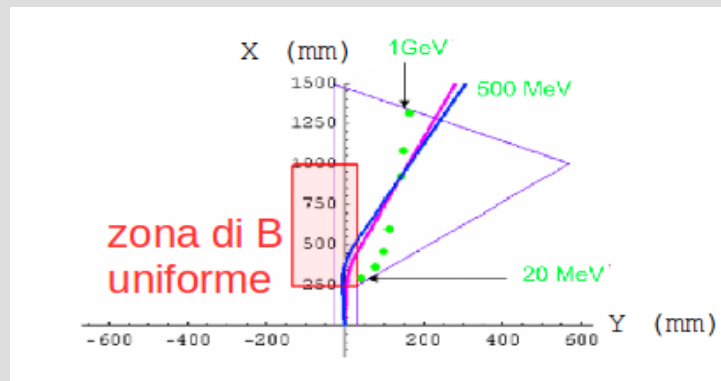


diversa traiettoria in campo magnetico, separazione spaziale dei fasci a diversa energia;

stesso impulso, divergenza angolare



esistenza di fuochi (in verde) nelle traiettorie, dove si posizionano le fibre (per bassi impulsi, fino a ~150 MeV)



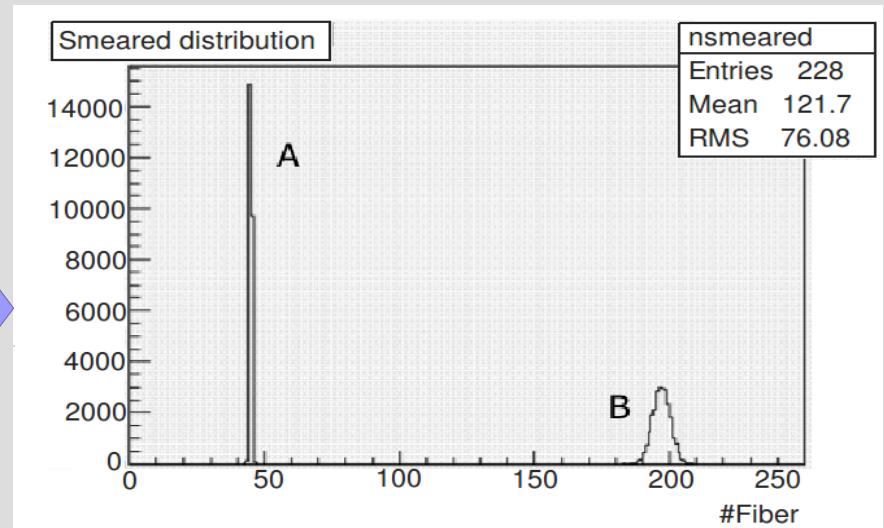
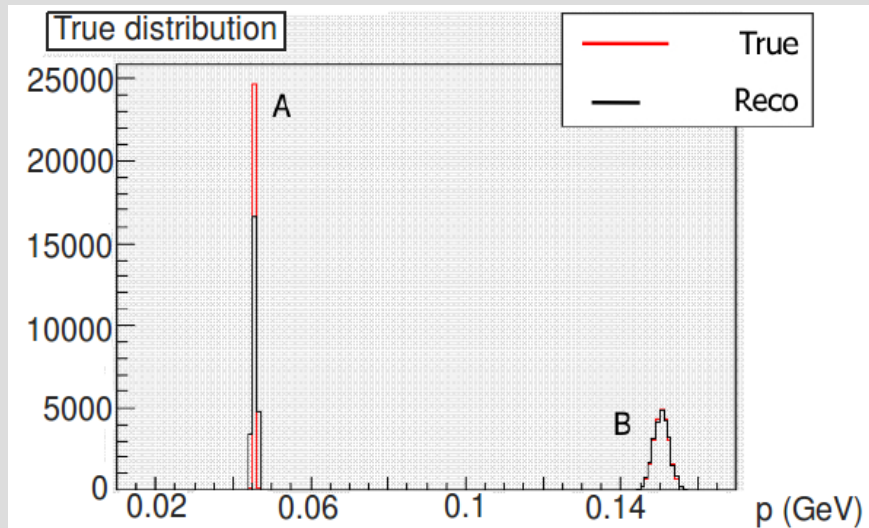
distribuzione sulle fibre

quantità di energia rilasciata in ciascuna fibra



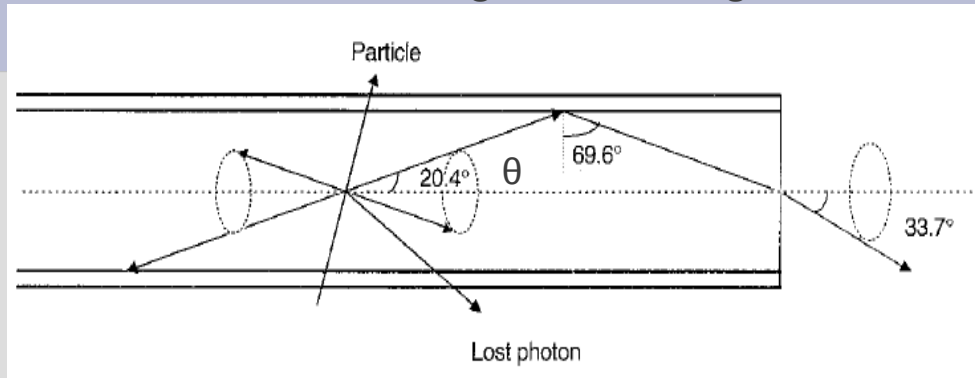
spettro di impulso

con la tecnica di Unfolding Bayesiano



Rivelatore a fibre

Fibre scintillanti a singolo cladding: ~900 fibre per 320 canali di elettronica



Nel disegno finale:

- 128 → high detector
1 fibra/canale
- 768 → low detector
3 fibre/canale

- Diametro 1.00 ± 0.05 mm
- Spessore di cladding 50 ± 5 μm
- $n_{\text{core}} = 1.59$
- $n_{\text{cladding}} = 1.49$ } $\Rightarrow \theta = 90^\circ - \arcsin(n_{\text{cladding}}/n_{\text{core}}) = 20.4^\circ$
- Emissione nel blu con un picco a $\lambda_{\text{emiss}} = 437$ nm
- Lunghezza di attenuazione $\lambda_{\text{atten}} \sim 3$ m
- *efficienza di conversione* $\sim 10 \gamma/\text{KeV} \rightarrow \#\gamma$ prodotti per e incidente $\sim 2000 \gamma$

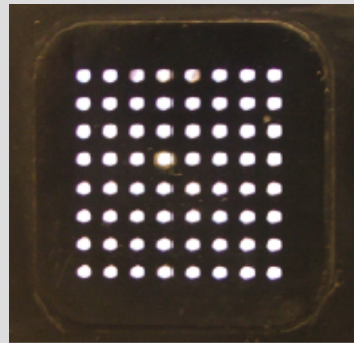
Da queste informazioni si ottiene l'*efficienza di cattura* = $\frac{\text{ang solido } \gamma \text{ catturati}}{4\pi} = 3.1\%$
Ovvero $\sim 60\gamma/e$ incidente

Va considerata l'attenuazione dovuta alle **perdite sull'interfaccia fibra/PMT:**
efficienza stimata $\sim 50\%$ $\Rightarrow \sim 30\gamma/e$ incidente

Fotomoltiplicatore (PMT)



5 fotomoltiplicatori a multianodo
64 canali (8x8)

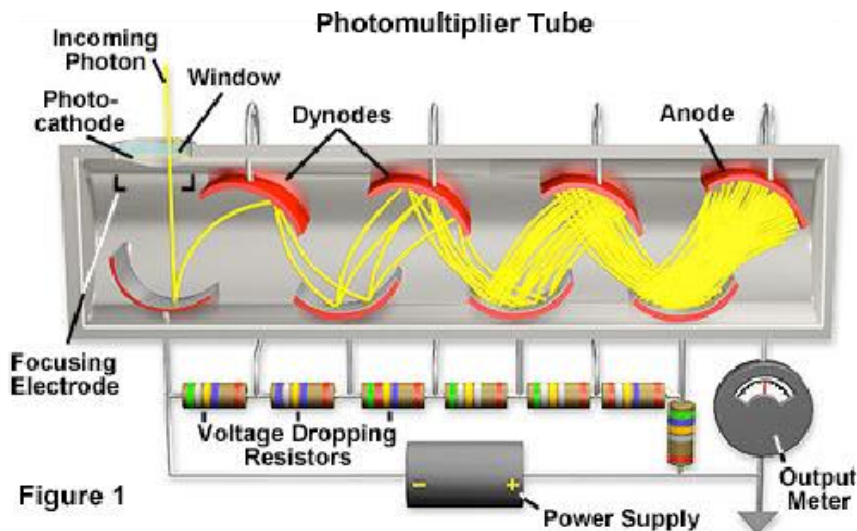


- Tensione nominale di alimentazione -800 V
- Efficienza quantica ~20% per (300< λ <450)nm
- Guadagno (a tensione nominale) $\sim 3 \cdot 10^5$
→ $2 \cdot 10^6$ e raccolti/e fascio → 30 pC

Ordine di grandezza di elettroni che raggiungono ciascuna fibra $\sim 10^6$

Carica raccolta per canale a 800 V
 10^{12} e raccolti/ch → $\sim 10^{-7}$ C = **100 nC**

Nella parte sulla calibrazione vedremo che la tensione di alimentazione del PMT andrà abbassata per evitare effetti di saturazione

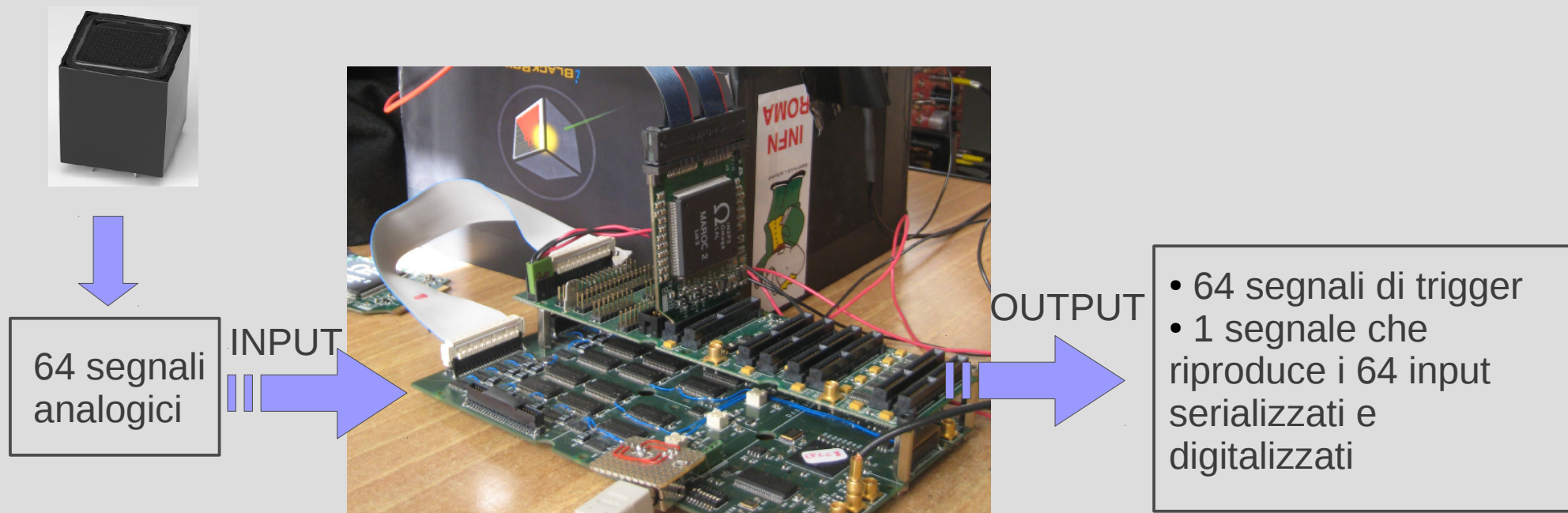


Elettronica di read-out

Obiettivo: misura di carica su ciascun canale del rivelatore

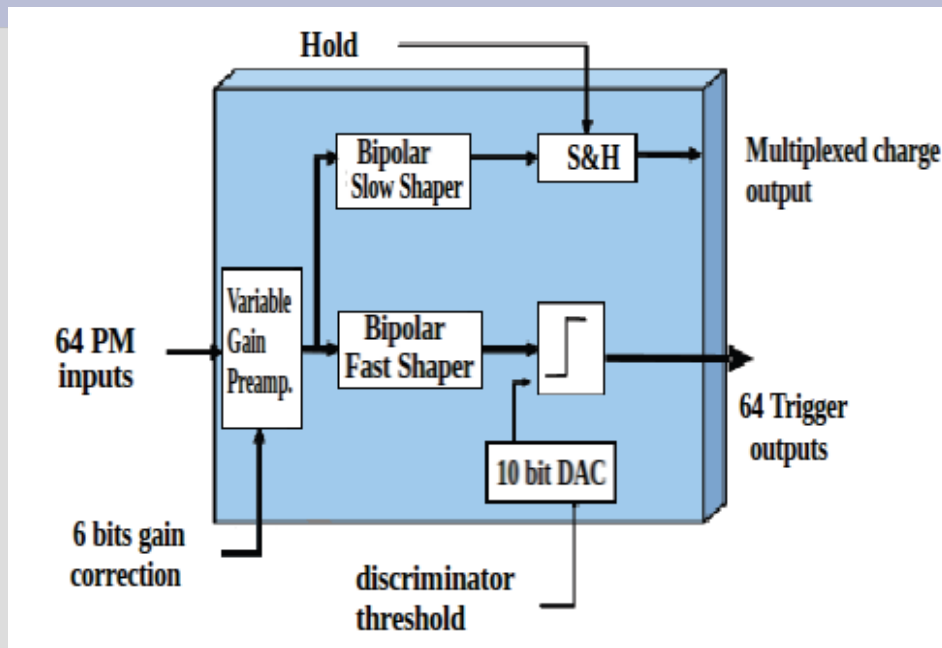
320 canali di elettronica → 320 ADC → molto costoso!

Chip della serie MAROC2 (Multi Anode ReadOut Chip) permettono di leggere simultaneamente 64 canali



Circuito MAROC

Preamplificatore a guadagno variabile



Shapers

Fast
Confronta con una soglia e stabilisce se quello che gli arriva è segnale o rumore

64 trigger

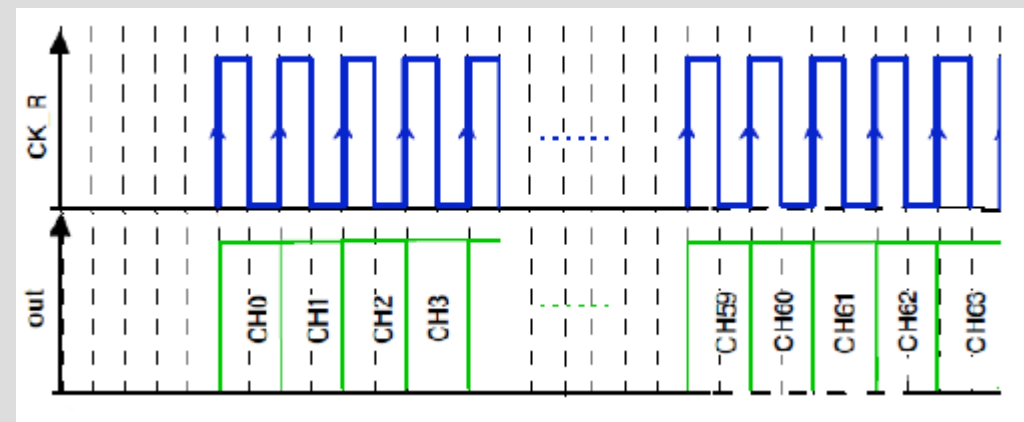
Slow
Elabora il segnale e lo ripulisce dal rumore

64 segnali proporzionali alla carica in ingresso

Sample&Hold → 2 condensatori: uno conserva la carica, l'altro la baseline del segnale

Multiplexaggio → inserimento di un ritardo temporale e serializzazione

ADC → digitalizzazione e lettura del segnale con un clock



PARTE II: alcuni problemi sperimentali e loro soluzione

- Qualità del campo magnetico
- Cross-talk e allineamento
- Problemi di saturazione e calibrazione

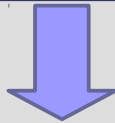
Mappa di campo magnetico (1)

Si aveva a disposizione una mappa di campo magnetico relativa al magnete del prototipo, ma era necessario essere sicuri che fosse giusta.

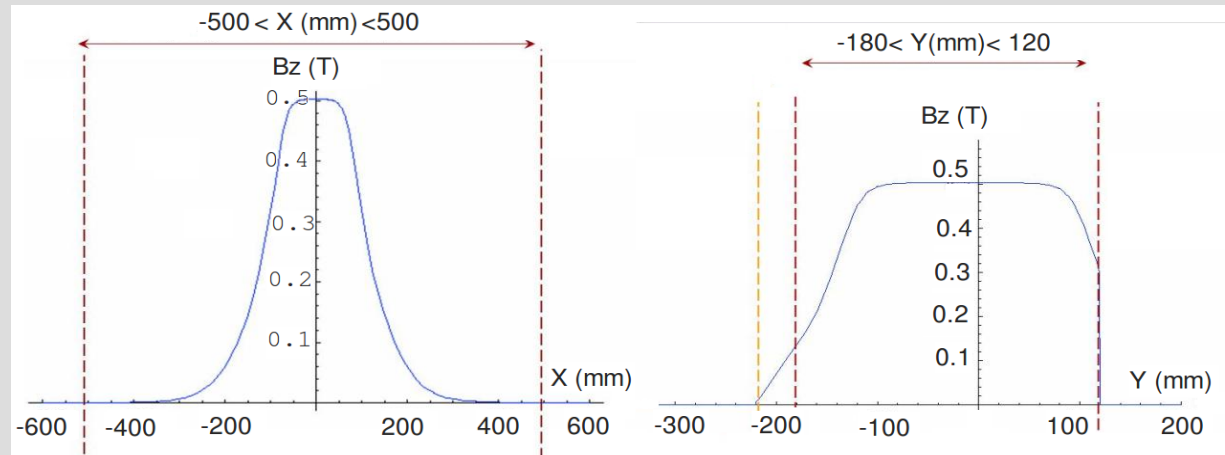
Infatti:

mappa di campo sul piano x-y

- curvatura R
- fuochi
- posizionamento fibre
- risoluzione spaziale



Risoluzione sullo spettro



Per questo motivi si sono fatti dei test usando il fascio della BTF (Beam Test Facility) dei LNF

- Energia 198 MeV
- Magnete su carrello mobile
- Rivelatori a fibre prima e dopo il magnete

Rivelatori a fibre



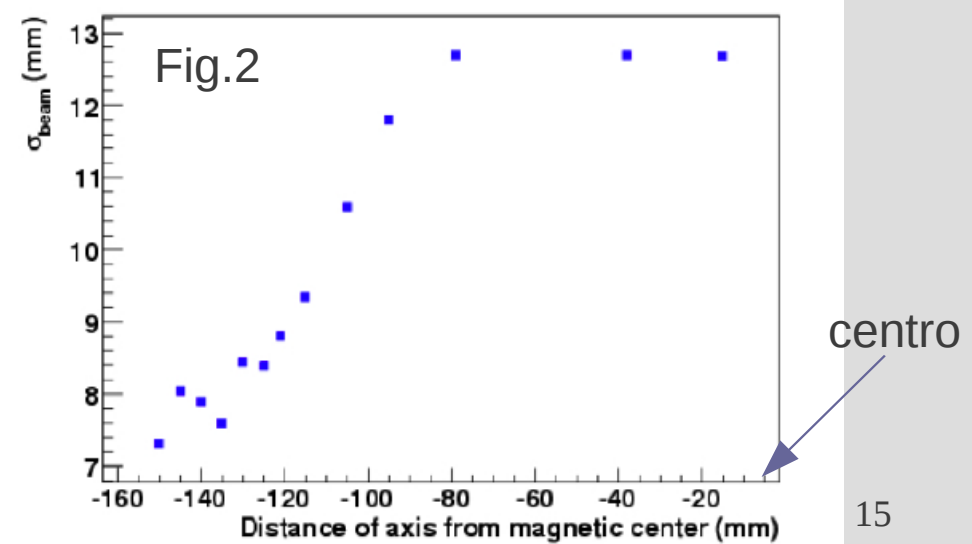
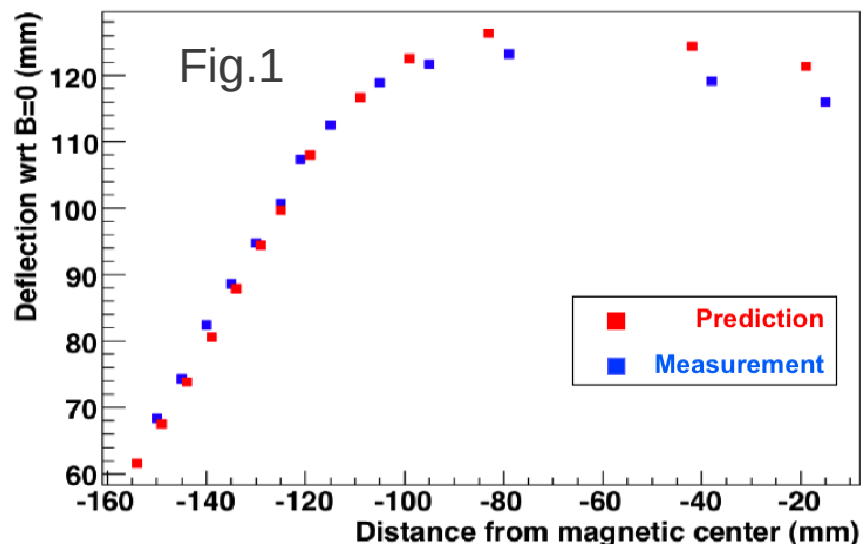
Mappa di campo magnetico (2)

Le mappe sono state ottenute interpolando i punti sperimentali che sono stati presi con un passo di 20 mm dove la pendenza è piccola e con 5 mm dove il campo varia più rapidamente.

Si hanno mappe anche per alcuni valori di z : $z = 0$, $z \pm 5$ mm, $z \pm 10$ mm

Con la mappa di campo:

- integrazione numerica del moto
- confronto tra simulazione e test alla BTF (Fig.1)
- studio della divergenza angolare nei punti in cui sono previsti i fuochi vs distanza dal centro del magnete: **conviene mettersi a bordo campo!** (Fig.2)

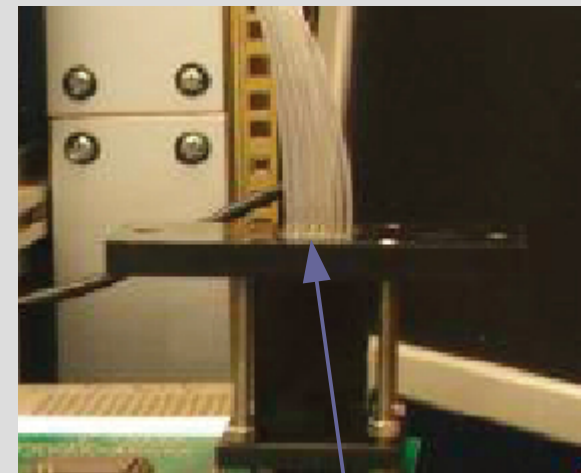
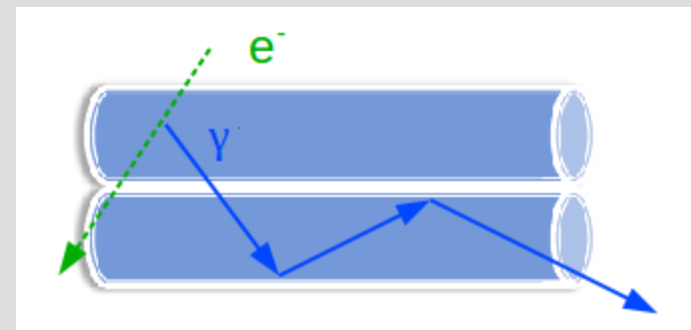


Cross-talk

Il Cross-talk (X-talk) avviene quando una certa quantità di segnale passa da un canale ai vicini.

Può avvenire:

- Direttamente tra le fibre, trascurabile (molto improbabile che l'angolo sia tale che il γ non venga catturato dalla fibra che l'ha prodotto ma dalla sua vicina)
- Tra i canali del PMT (X-talk nominale $\sim 2\%$)
- Sull'interfaccia fibre-PMT: fenomeni di diffrazione nel punto in cui si accoppiano le fibre al canale (dipende molto dall'allineamento, può arrivare anche a $\sim 10\%$)

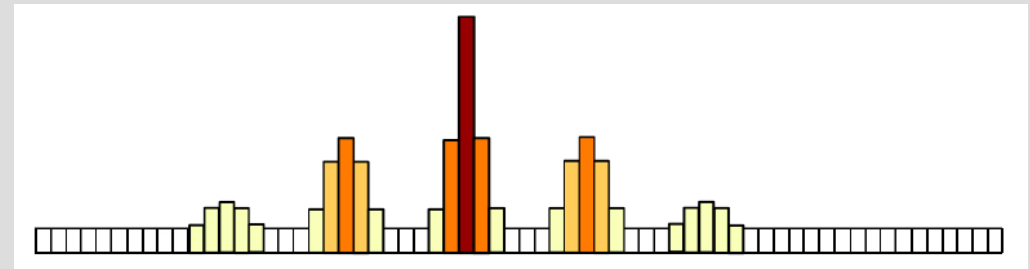
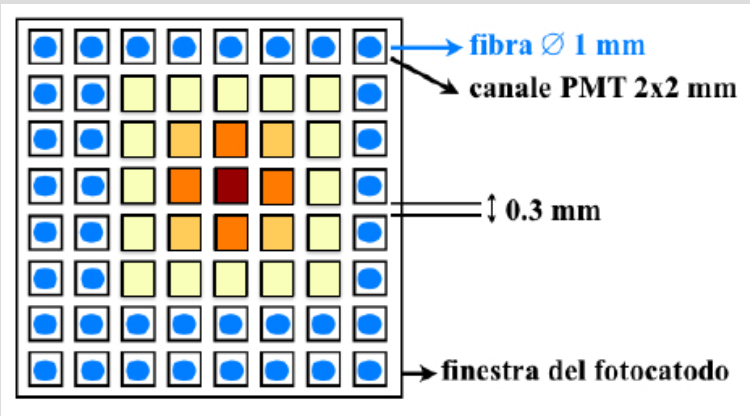


Accoppiamento fibre-PMT

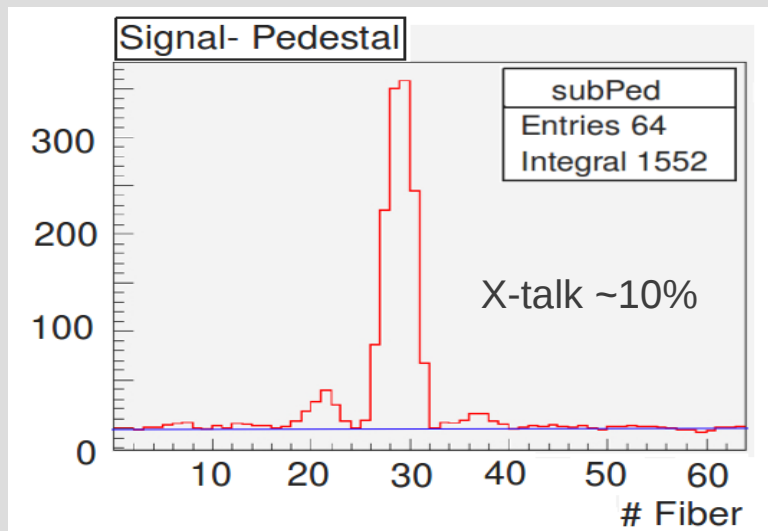
Studio del cross-talk (1)

Si è studiata la risposta del rivelatore puntando un led blu direttamente sulle fibre.

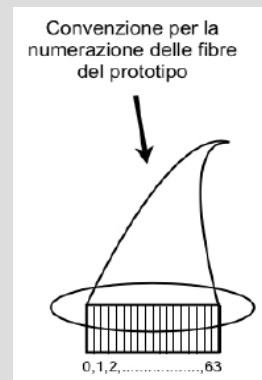
Schema per una sola fibra illuminata:



Run in cui il led illumina 6 fibre



E' visibile come l'effetto del x-talk è dovuto soprattutto al PMT e/o all'interfaccia, infatti i massimi secondari si trovano con una periodicità 8, che è dovuta alla mappatura tra fibre allineate → fibre disposte a matrice 8x8



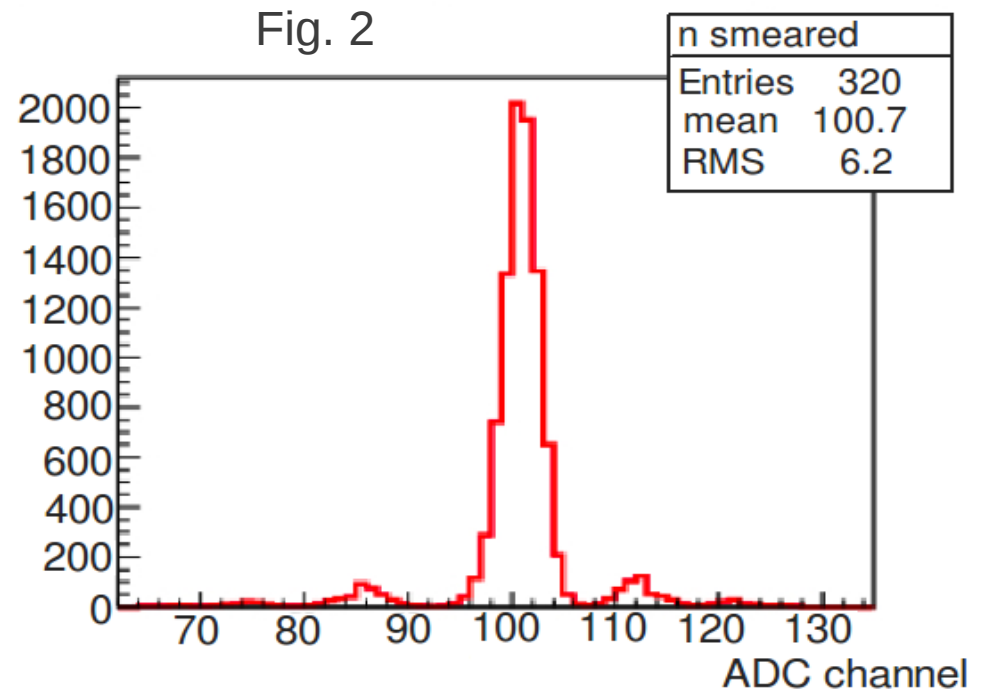
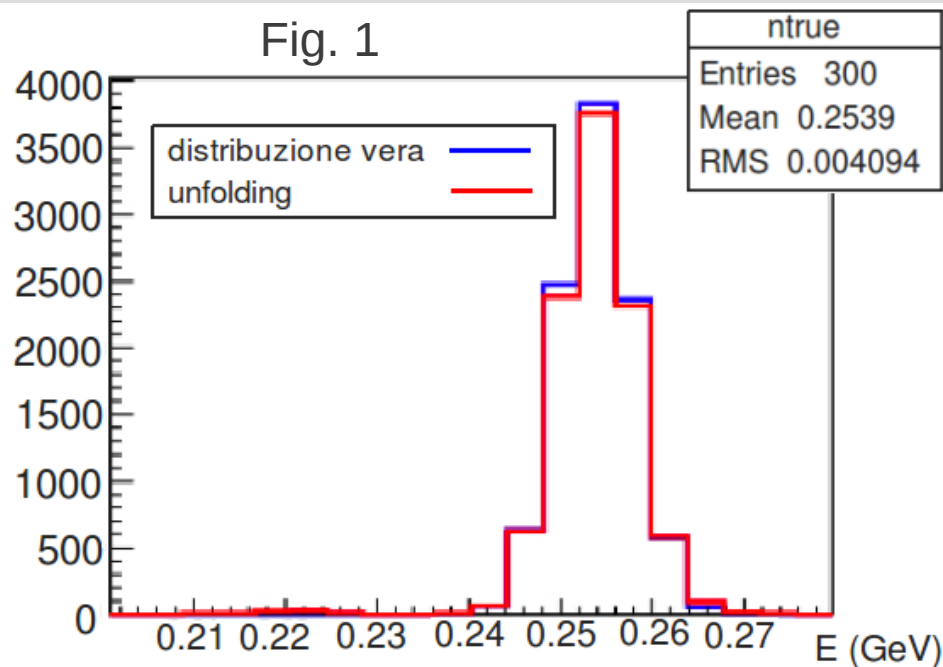
63	55	47	39	31	23	15	7	
62	54	46	38	30	22	14	6	
61	53	45	37	29	21	13	5	
60	52	44	36	28	20	12	4	
59	51	43	35	27	19	11	3	
58	50	42	34	26	18	10	2	
57	49	41	33	25	17	9	1	
56	48	40	32	24	16	8	0	

GND
Come arrivano le fibre sulla mascherina

Studio del cross-talk (2)

Lo studio del X-talk è importante perché bisogna tenerne conto nella ricostruzione dell'impulso.

A partire da una distribuzione di impulsi nota (fig. 1, in blu) simulando un cross-talk del 2% si ottiene una distribuzione sulle fibre (fig. 2). Ricostruendo da questa la distribuzione degli impulsi con il programma di unfolding (fig. 1, in rosso) si vede che il risultato è in ottimo accordo con i “valori veri” .



Quindi un cross-talk del 2% è trattabile con la statistica. Il problema è quello di raggiungere un livello paragonabile al 2%.

Problemi di saturazione

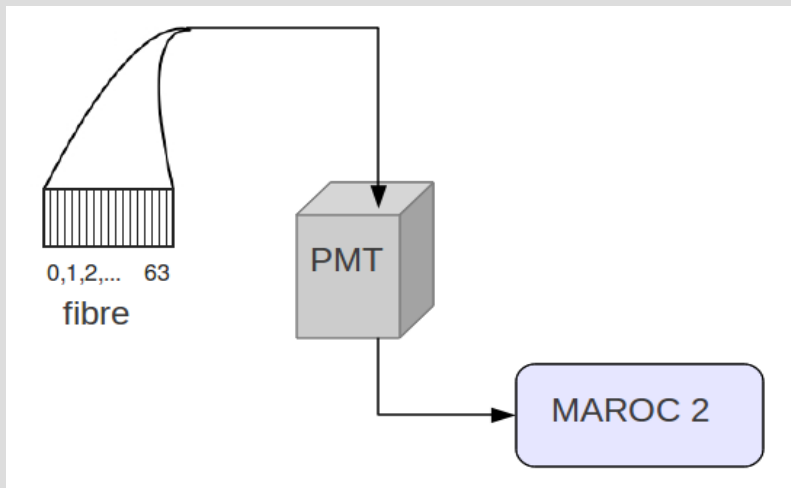
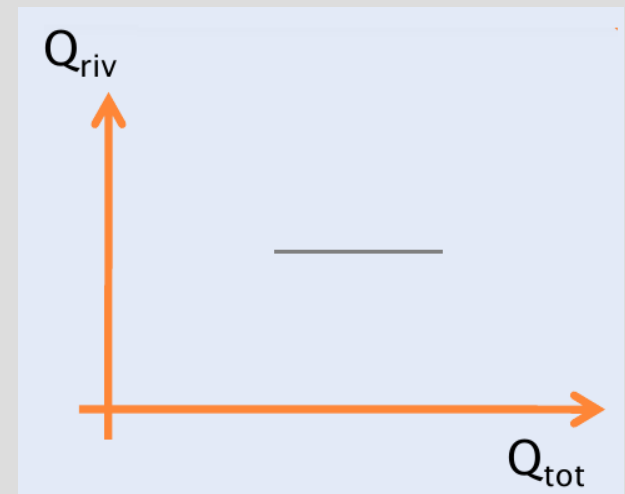
Il numero di particelle che finiscono in ciascun canale del rivelatore ($\sim 10^6$), è enorme rispetto ai numeri della maggior parte degli esperimenti di fisica delle particelle.

Saturazione:

pur aumentando il segnale, la risposta del rivelatore non cambia. Di fatto la misura diventa indipendente dal segnale.

La saturazione può avvenire a vari livelli:

- **Elettronica**
- **PMT**
- **Fibre**



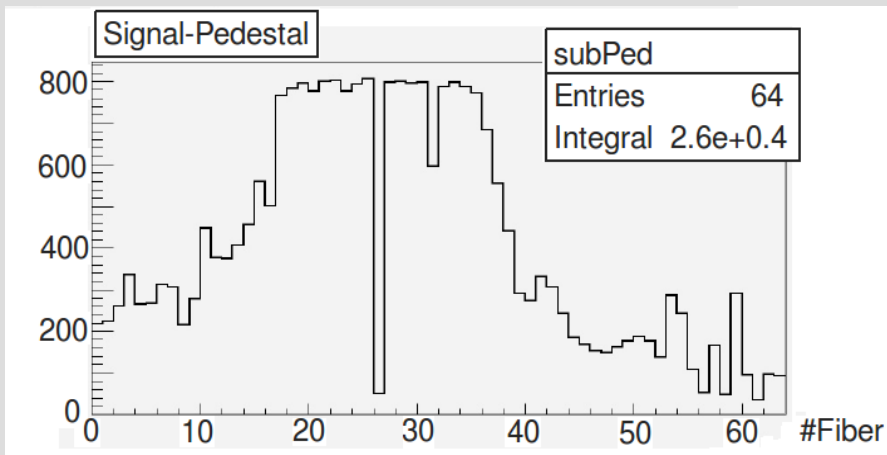
Quindi bisogna studiare a ritroso le possibili cause di saturazione e correggerle finché le misure tornano a dipendere dal segnale vero.

Saturazione dell'elettronica

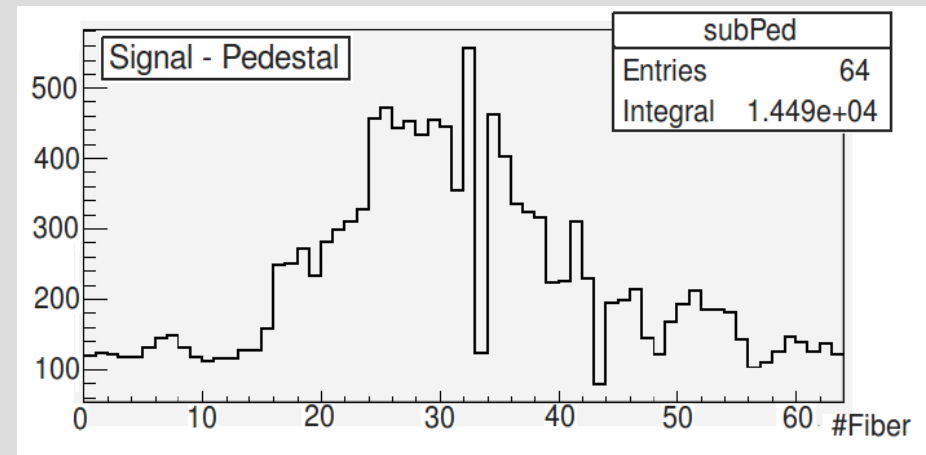
Se il segnale che arriva alla scheda MAROC è troppo grande l'elettronica satura ad un certo valore di ADC, che, sottratto il piedistallo è circa 800.

Illuminando la superficie sensibile del fotocatodo con un LED blu, a diversi valori dell'HV si ottiene:

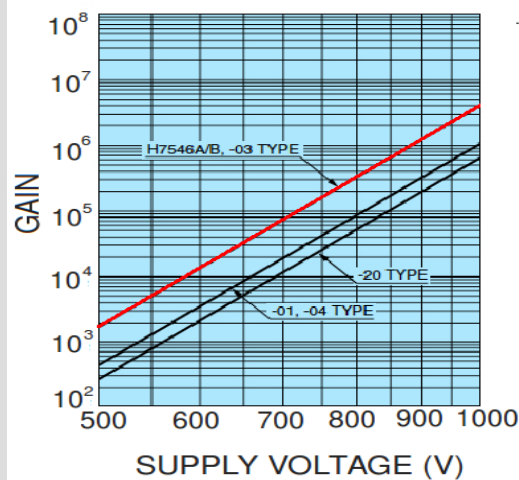
Alimentazione PMT 900 V



Alimentazione PMT 600 V



Guadagno del PMT (dalle specifiche)



$$\Delta G_{\text{PMT}} \propto \exp(P \cdot \Delta V)$$

Il parametro $P = 0.017$ è la pendenza della retta, che si può ottenere anche da misure di ADC vs HV facendo un fit esponenziale nella zona di non saturazione.

Il problema viene risolto abbassando l'alimentazione del PMT ad una tensione di 400-600 V.

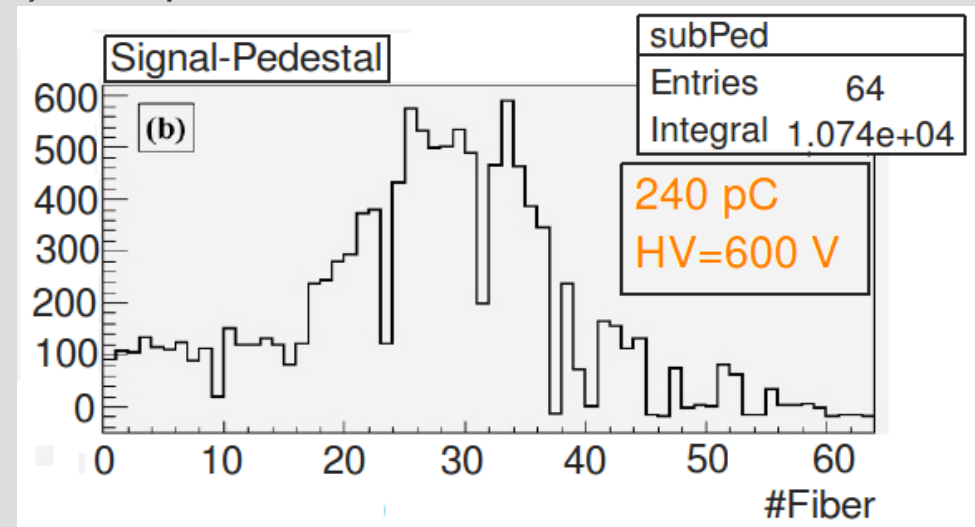
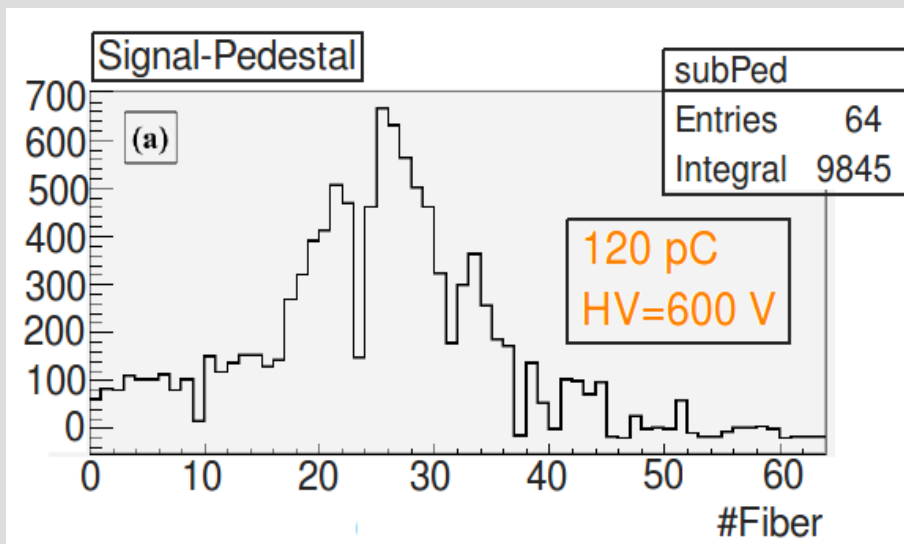
Saturazione del fotomoltiplicatore

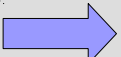
Bisogna prendere misure a tensioni sufficientemente basse da eliminare effetti di saturazione dell'elettronica (400-600 V).

Alla BTF a Frascati sono stati fatti studi della saturazione del PMT mandando fasci di intensità diversa, misurabile con un BCM (Beam Current Monitor), sul rivelatore a fibre.

a) 120 pC \leftrightarrow $7.5 \cdot 10^8$ elettroni

b) 240 pC \leftrightarrow $1.5 \cdot 10^9$ elettroni



- il numero di conteggi resta quasi invariato nonostante la carica raddoppi
 - profilo della distribuzione invariato \rightarrow tutti i canali!
-  corrente globale del PMT

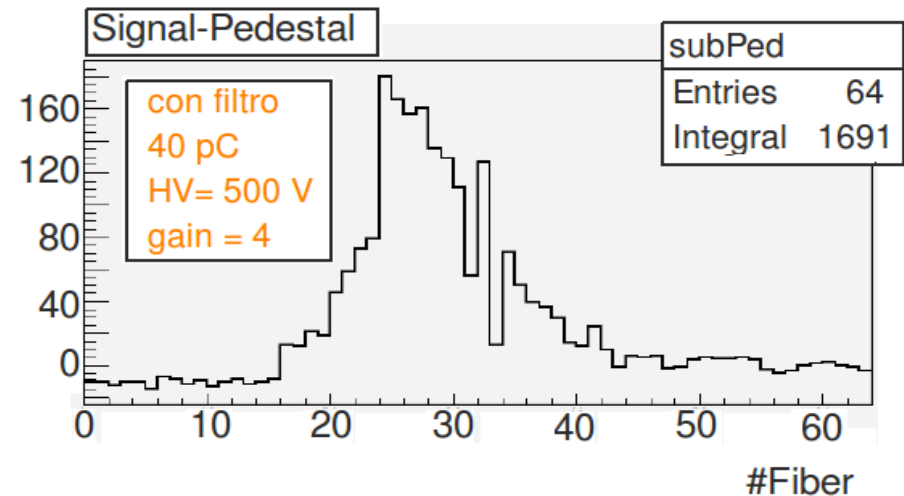
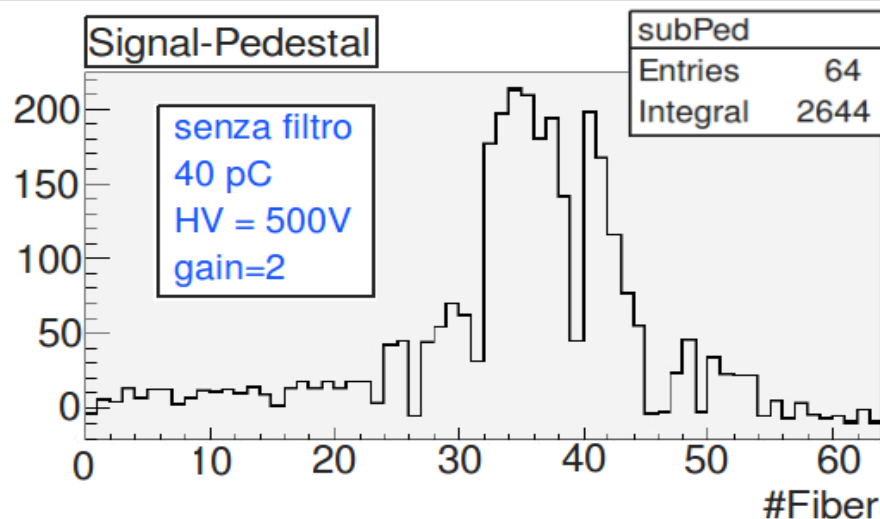
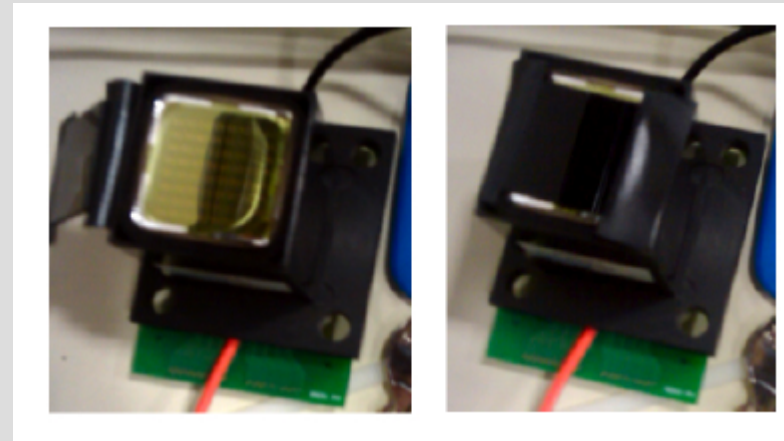
Altre misure alla BTF mostrano che esistono anche effetti di saturazione sui singoli canali.

Inserimento di un filtro ottico

Per risolvere il problema di saturazione del PMT si è deciso di **attenuare la luce proveniente dalle fibre con un filtro ottico che trasmette il 40%**.

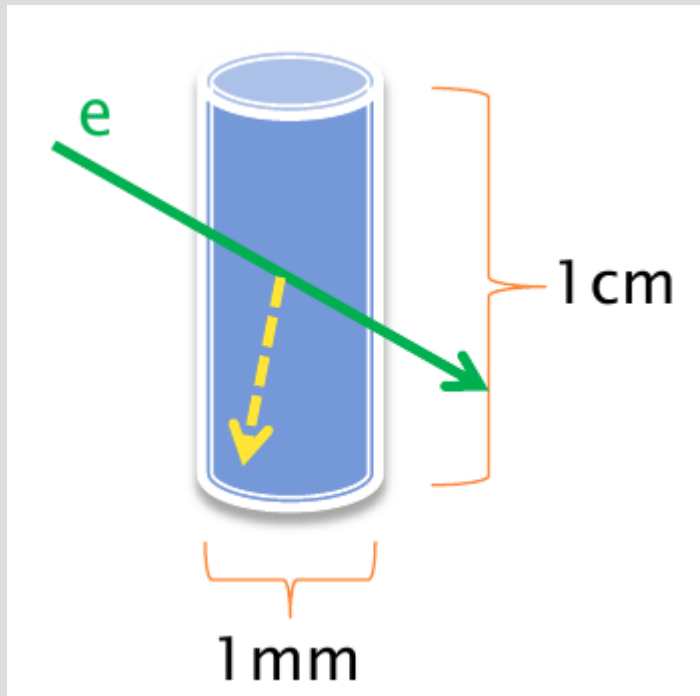
Per utilizzare meglio il range dinamico dell'elettronica si è alzato il gain dell'elettronica da 2 (il minimo) a 4.

Lo spessore del filtro può peggiorare il x-talk
→ allineamento



Saturazione delle fibre

Potevano infine verificarsi effetti di saturazione delle fibre stesse, nel caso in cui i centri scintillanti fossero minori degli elettroni incidenti. Questo non si è verificato, nel caso contrario **si sarebbe dovuto cambiare il tipo di fibre**.



Stima del numero di molecole in un volumetto di materiale scintillante (illustrato in figura)

Il core delle fibre è di polistirene C_8H_8

$$\rho_{pol} = 1.05 \text{ g/cm}^3$$

$$V = \pi r^2 h = 0.0082 \text{ cm}^3$$

$$A = 104 \text{ uma}$$

$$M = \rho_{pol} V = 0.0086 \text{ g}$$

$$N_{pol} = M N_A / A = 5 \cdot 10^{19} \text{ molecole di polistirene/V}$$

Il numero di elettroni che colpiscono la fibra si può stimare tra 10^5 - 10^7 elettroni/fibra per fasci incidenti di 10^7 - 10^9 particelle.

#elettroni \ll #molecole C_8H_8

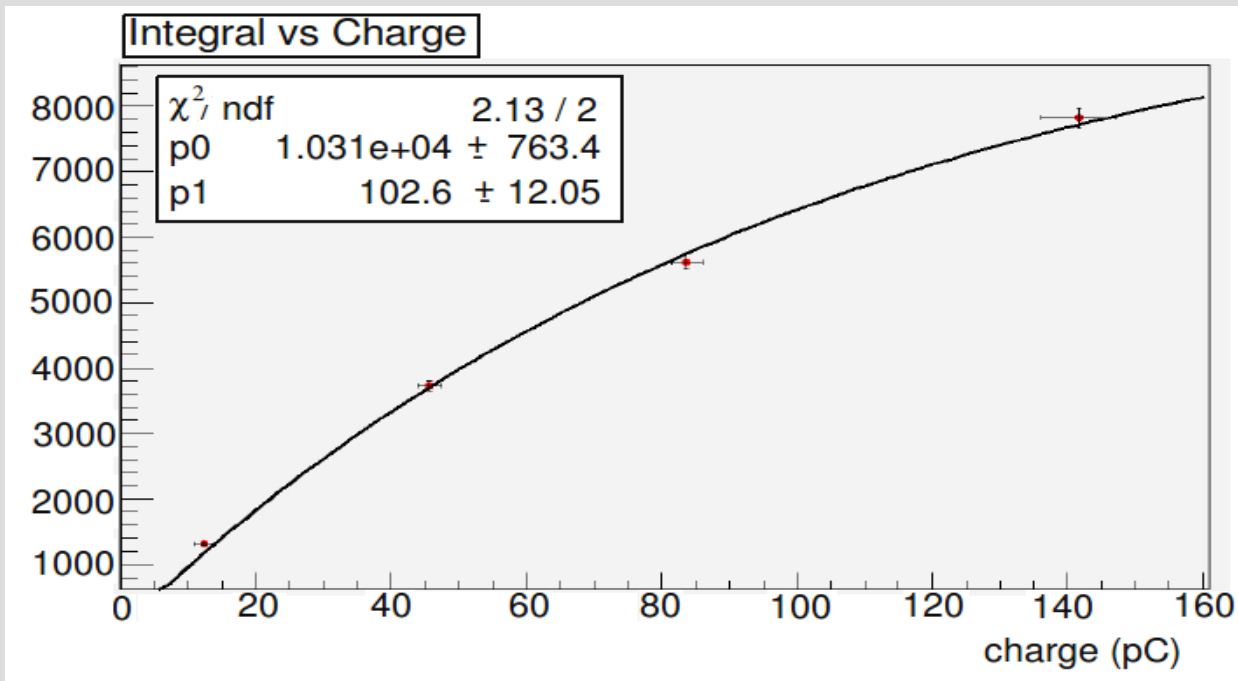
Calibrazione

Una volta sistemati i problemi di saturazione si è costruita la curva di calibrazione. È stato studiato l'andamento dell'integrale dei profili di fascio al variare della carica del pacchetto misurata dal BCM.

- 4 run da ~60 eventi ciascuno, con aumento dell'intensità del fascio tra un run e l'altro
- Alimentazione PMT 500 V
- Guadagno dell'elettronica 4

Mediando su ciascuno dei 4 run e facendo un fit con la funzione

$$f(x) = p_0(1 - e^{-x/p_1})$$

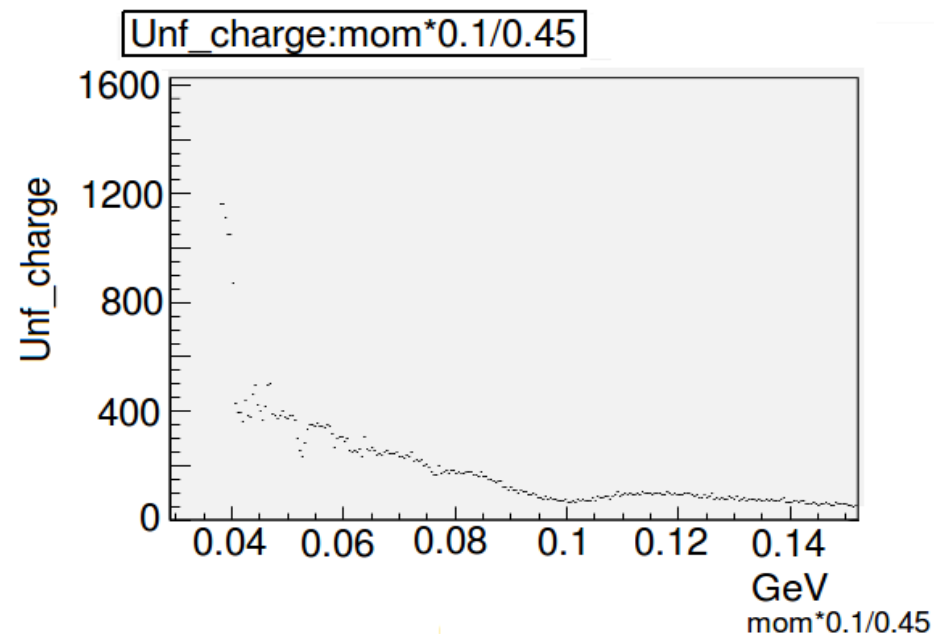
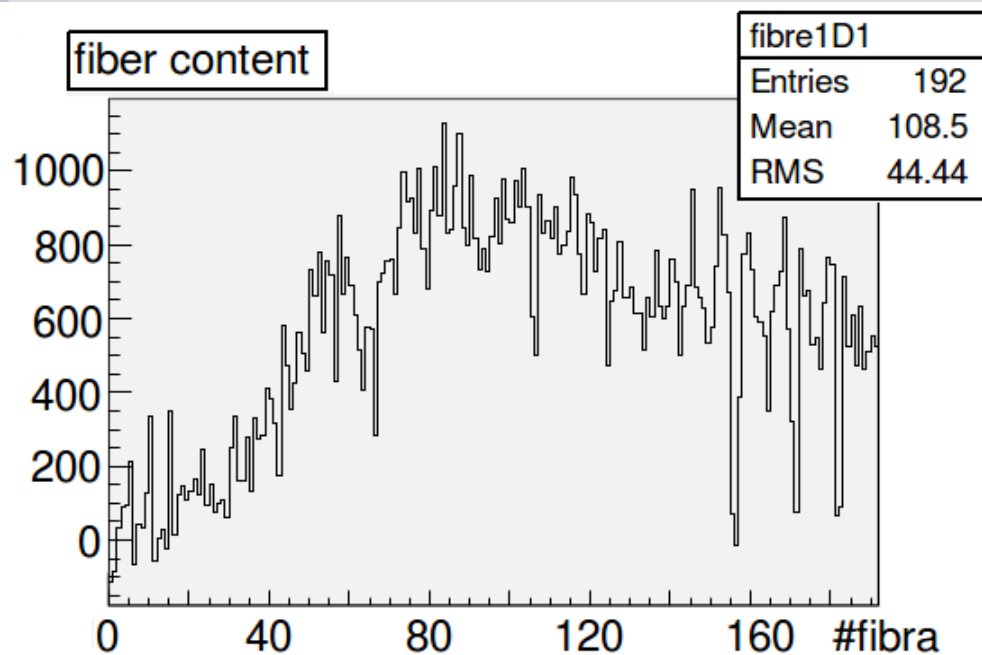


L'andamento non è perfettamente lineare, a causa degli effetti di saturazione che cominciano a essere rilevanti quando x diventa dell'ordine di p_1 cioè per $Q \sim 100$ pC.

Primi spettri ottenuti nell'esperimento SITE

Uno dei primi spettri ottenuti dall'esperimento SITE a Frascati con campo magnetico

$B=0.1$ T



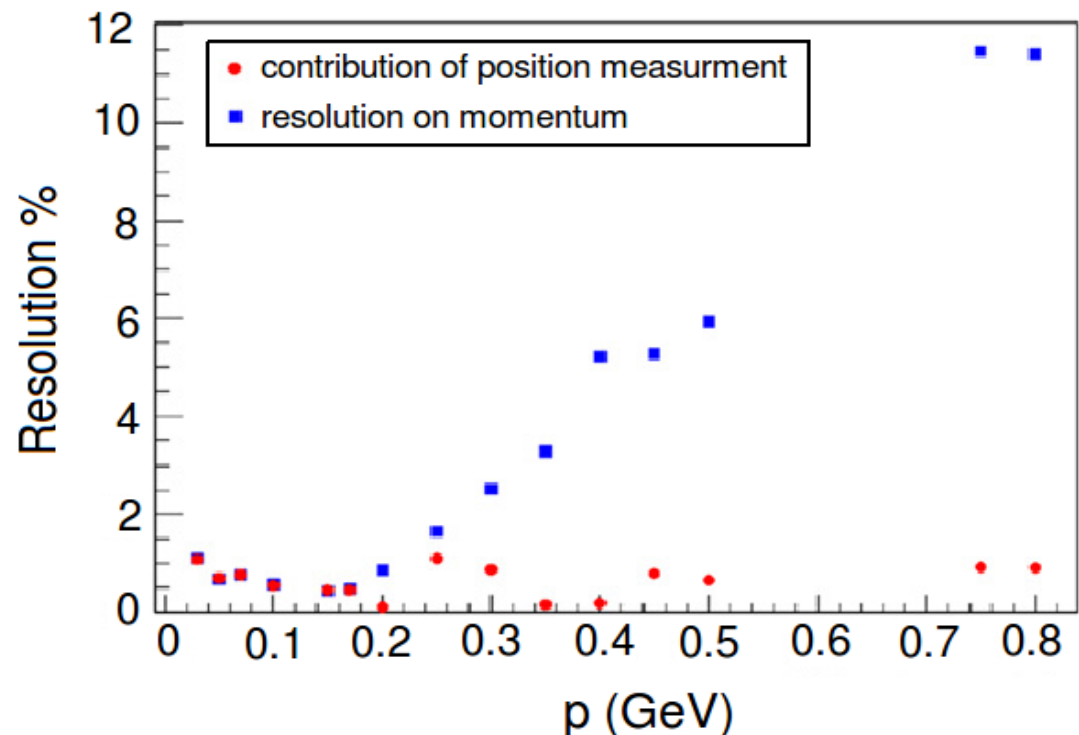
Conclusioni

- La tecnica di accelerazione laser-plasma permette di raggiungere energie molto elevate in lunghezze molto compatte → grande interesse di ricerca.
- D'altra parte i fasci prodotti hanno caratteristiche inedite nella fisica delle particelle, per questo è stato necessario sviluppare un rivelatore apposito e fare tutti i test necessari su un prototipo (con i LED in laboratorio e alla BTF a Frascati) per testare l'adeguatezza delle componenti previste e le loro caratteristiche.

Risultati attesi dall'esperimento PlasmonX in termini di risoluzione di impulso

- $< 200 \text{ MeV}$ $\sigma \sim 1\%$
(domina la risoluzione dovuta alla granularità del rivelatore a fibre)
- $< 500 \text{ MeV}$ $\sigma < 5\%$
- $> 500 \text{ MeV}$ $\sigma \sim 10\%$

Ad alti impulsi domina la divergenza angolare, per migliorare la precisione sarebbe necessario un campo magnetico più intenso.

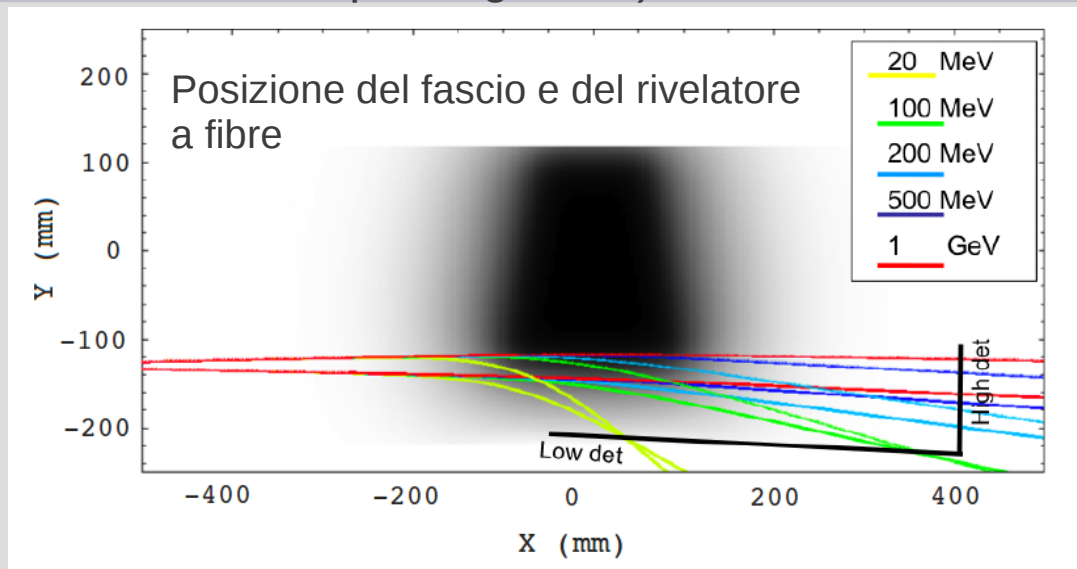
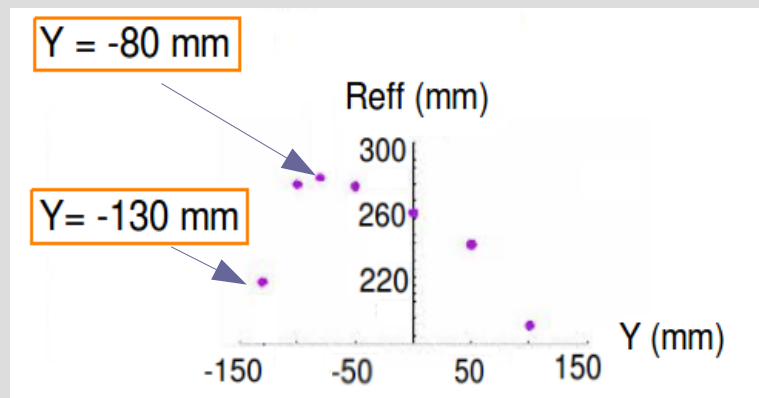


Spettrometro magnetico (3)

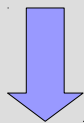
Obiettivo: migliorare la risoluzione spaziale

1) Studio della quantità R_{eff} (percorso effettivo nel campo magnetico)

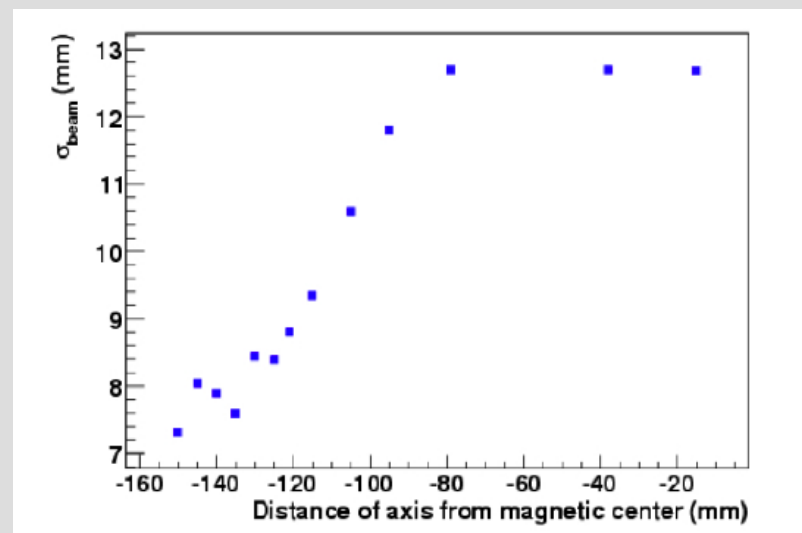
$$R_{eff}(y) = \int dx \frac{B_z(x,y,0)}{B_z(0,0,0)}$$



2) Divergenza del fascio in funzione della distanza dal centro del magnete

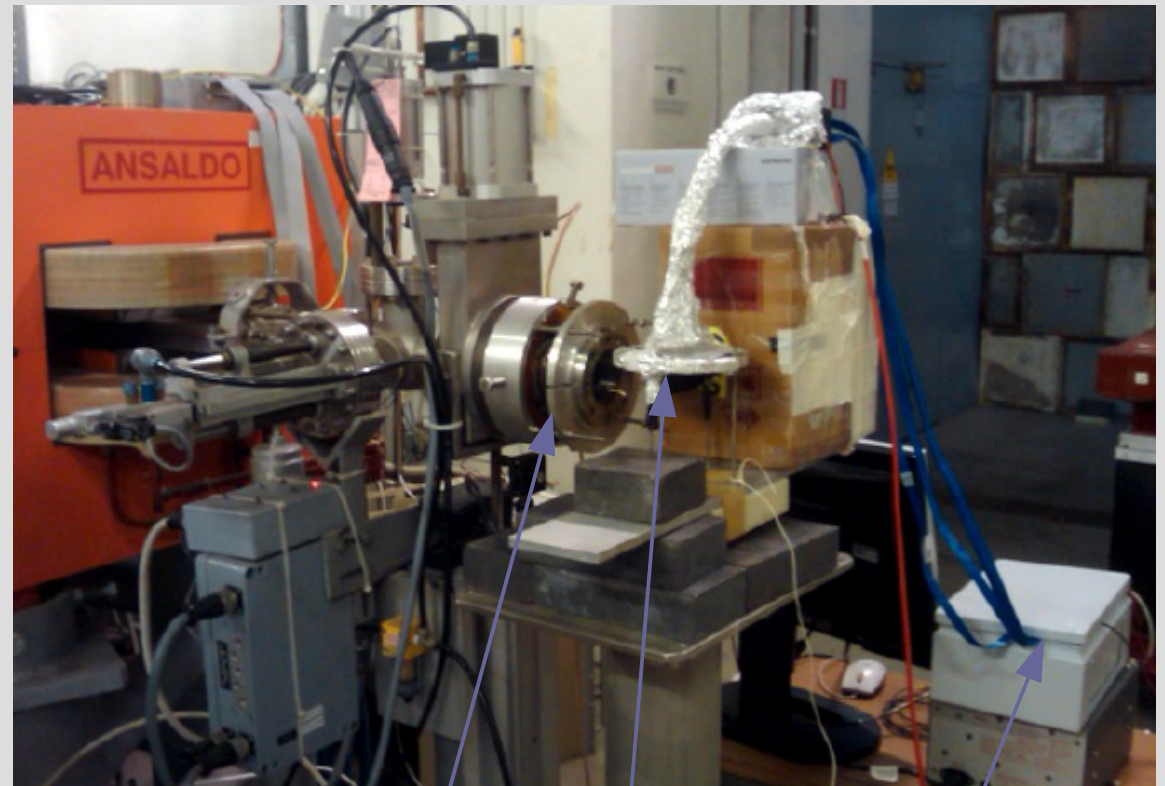


Distanza ottimale dal centro del magnete
~130 mm



Studi della saturazione alla BTF a Frascati

- LINAC 60 m
- Alta intensità: fasci di 10^6 – 10^9 particelle
- Range energia 300 – 500 MeV
- Divergenza del fascio 2-3 mrad + multiplo scattering
- BCM Beam Current Monitor, toroide su cui viene indotta una corrente \propto alla carica del fascio



BCM

fibre

Elettronica schermata
da gabbia di Faraday

Studi di saturazione su singolo canale

Variando di poco il campo magnetico dell'ultimo dipolo si varia la curvatura del fascio spostando il centro del pacchetto sulle fibre che si vogliono colpire.

Scegliendone una, ad es. la #31 si ottiene che quando il fascio la colpisce marginalmente i conteggi ADC del PMT sono proporzionali a quelli del toroide, quando la colpisce direttamente si arriva rapidamente alla completa saturazione.

