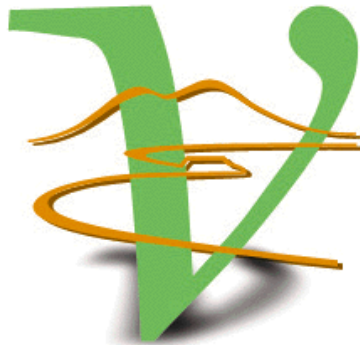


Tecniche di rivelazione dei neutrini applicate alla biofisica

Giovanni De Lellis

Università “Federico II” Napoli



Piano del seminario

- *La tecnica delle emulsioni nucleari*
- *Il suo utilizzo nella fisica delle particelle elementari*
- *Recenti sviluppi tecnologici nel campo*
- *Prestazioni e risoluzioni raggiunte*
- *Applicazioni alla biofisica*
- *Risultati preliminari e prospettive*

Emulsioni Fotografiche Nucleari

- *Emulsioni fotografiche: miriade di cristalli di bromuro di argento ($0.1\div 1\mu\text{m}$) immersi in gelatina bianca*
- *Attraversate da particelle ionizzanti (radiazione) alcuni grani si modificano in modo che, immersi in un bagno riducente, chiamato sviluppo, sono trasformati in grani di argento che appaiono neri nella gelatina*
- *Le modifiche ai grani indotte dalla radiazione prendono il nome di immagine latente*
- *Eccitazione termica crea grani di fondo (fog)*
- *Fowler, Perkins and Powell, The study of elementary particles by the photographic method, Pergamon Press, 1959*

Emulsioni Fotografiche Nucleari

Rispetto alle normali emulsioni fotografiche:

- *Sensibilità → rivelazione di tracce di singole particelle*
Il rapporto di sali di argento rispetto alla gelatina è circa 8 volte superiore
- *Spessore → ricostruzione tridimensionale delle tracce*
10÷100 volte più spesso
- *Grani di argento più piccoli e più uniformi (migliore risoluzione)*

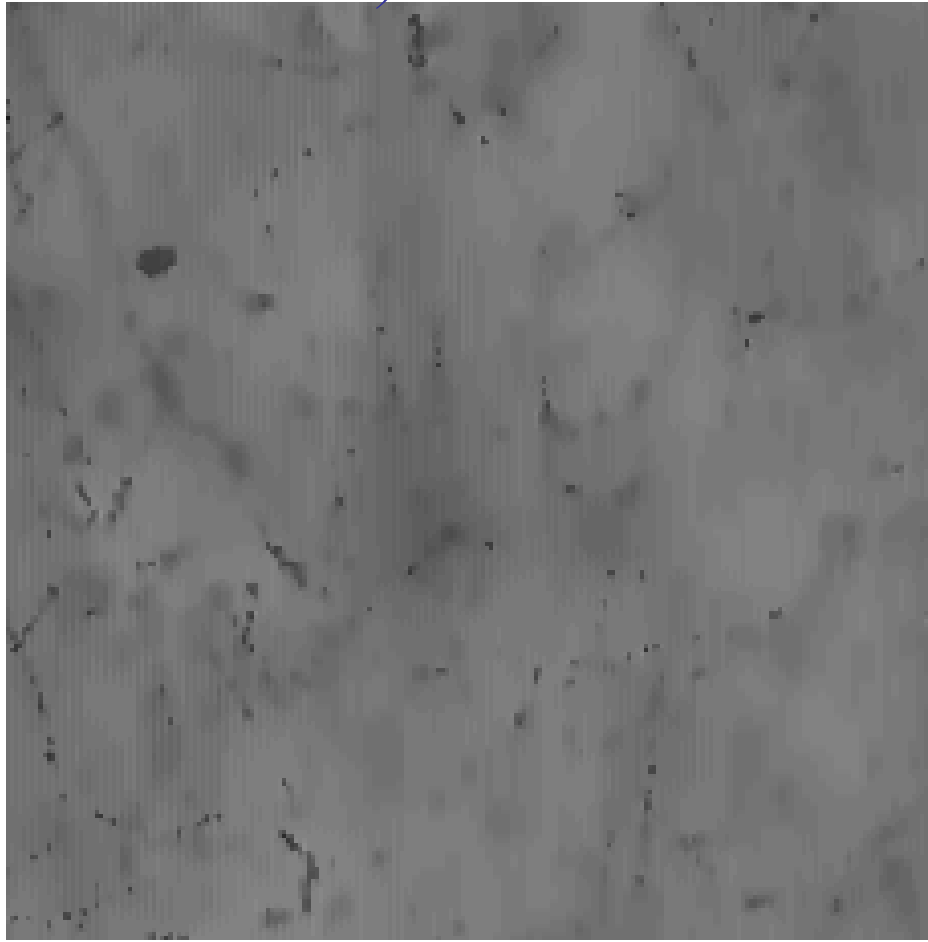
• *Risposta non in tempo reale*

• *Lettura visiva al microscopio fino allo sviluppo di microscopi completamente automatici*

Le emulsioni viste al microscopio

Variando il piano focale attraverso tutto lo spessore delle lastre si ha una visione tridimensionale delle traiettorie (tracce) delle particelle

Colore più intenso indica maggiore ionizzazione (particelle non al minimo o ioni di carica > 1)

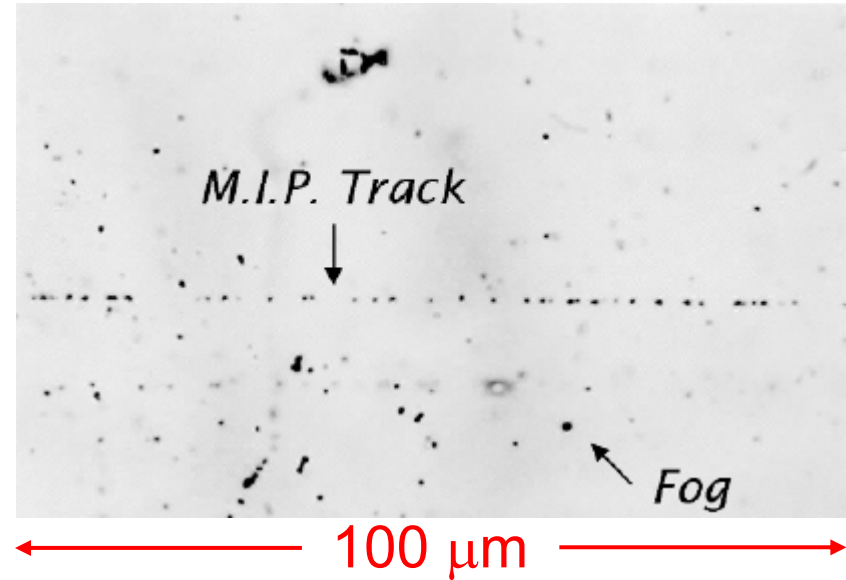


Caratteristiche delle emulsioni

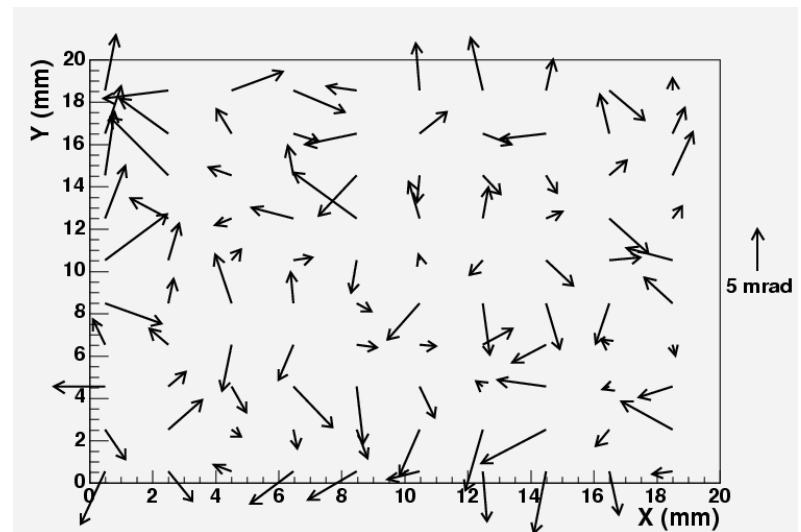
Risoluzione intrinseca: $0.06 \mu\text{m}$

Sensibilità: 33 grani / $100 \mu\text{m}$ (m.i.p.)

Grani accidentali: 3.5 grani / $1000 \mu\text{m}^3$



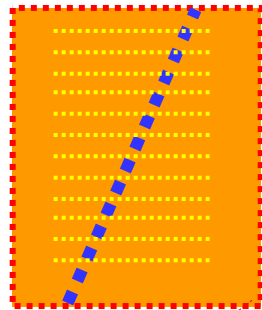
La produzione industriale delle emulsioni permette di minimizzare effetti di distorsione (entro i 10 mrad) a differenza del metodo di colate tradizionale (fino a fine anni 90)



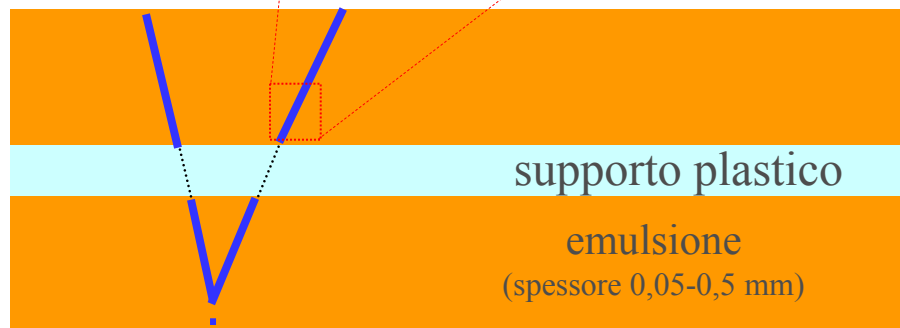
LE EMULSIONI IN UN ESPERIMENTO

“foglio” di emulsioni

“bersaglio attivo”
(costituito da fogli di emulsioni)

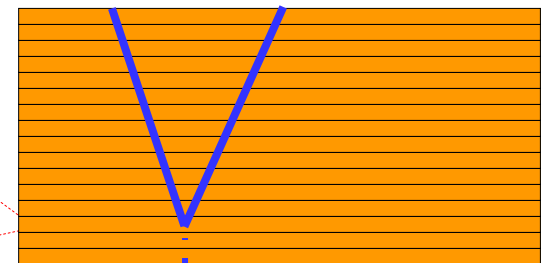


traccia
ricostruita
a partire da immagini
acquisite
su diversi livelli



supporto plastico

emulsione
(spessore 0,05-0,5 mm)



particella entrante
(invisibile se è un neutrino)

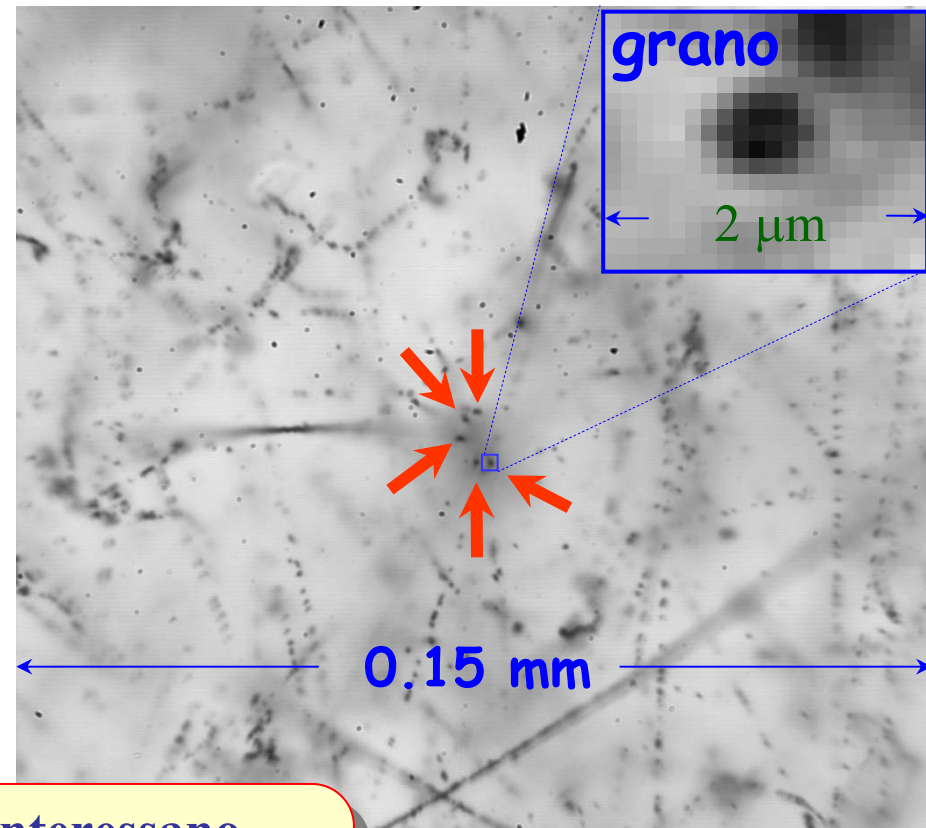
fascio di particelle
(perpendicolare alla
superficie delle emulsioni)



Grani in un campo di vista

ingrandimento ~ 50

profondità di campo $\sim 2 \mu\text{m}$



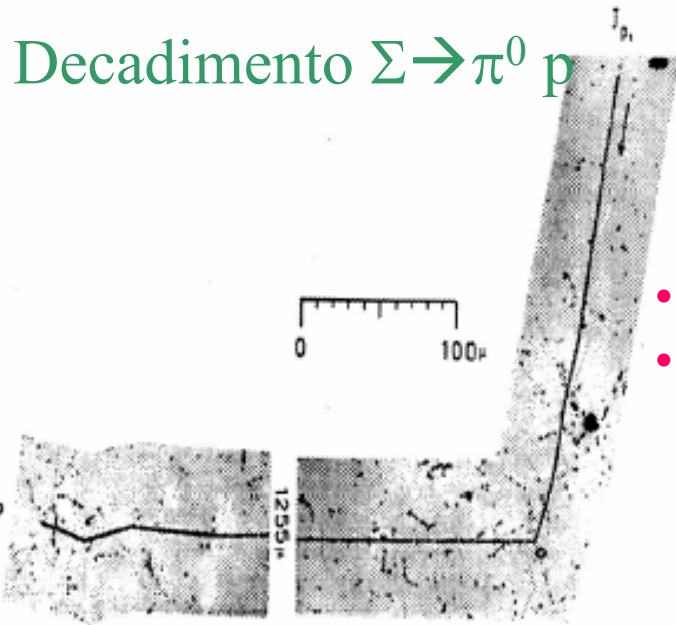
Le tracce delle particelle che interessano
sono perpendicolari al foglio:
dopo lo sviluppo sono viste come
“grani” di argento metallico

Analisi delle immagini
Collegare grani \rightarrow tracce
Collegare tracce \rightarrow eventi

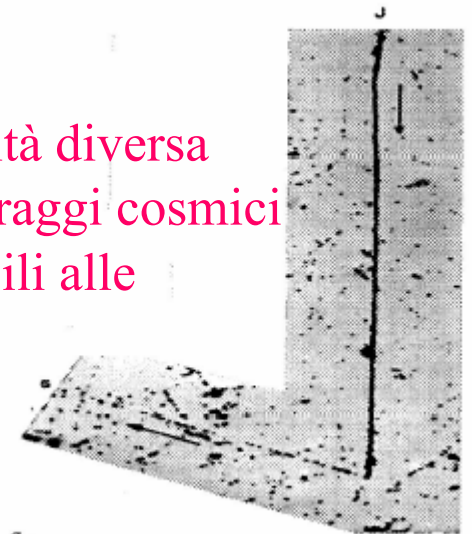
Risultati
di Fisica

Emulsioni nella fisica delle particelle

- 1896 Bequerel scopre la radioattività osservando l'annerimento di lastre fotografiche a causa di sali di uranio
- 1910 Kinoshita osserva tracce singole di particelle α



Decadimento $\Sigma \rightarrow \pi n$



- Utilizzate emulsioni di sensibilità diversa
- In molte delle esperienze con i raggi cosmici emulsioni da $50 \mu\text{m}$ non sensibili alle particelle al minimo

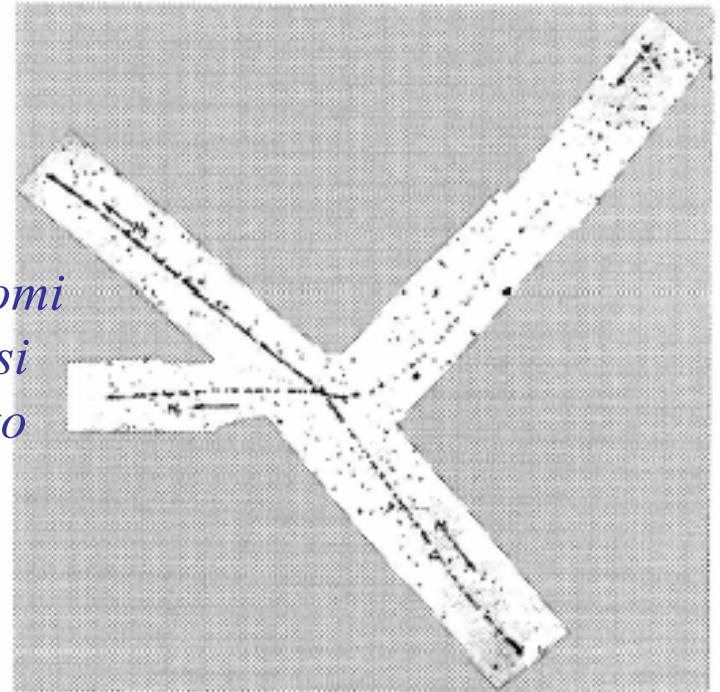
Dopo la seconda guerra mondiale, fervida collaborazione tra gruppi universitari e industrie fotografiche (Kodak, Ilford)

La scoperta del pione

Studio dei raggi cosmici su aereo a circa 9 km e a Pic du Midi

Perkins Nature 159 (1947) 126

Nuclear disintegration by meson capture



Brown, *Nature* 163 (1949) 47
osservata la catena $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$

π *Conversi Pancini e Piccioni*
Phys. Rev. 71 (1947) 209
Assorbimento dei muoni con atomi pesanti, mentre con Carbonio si aveva solitamente decadimento

$\pi \rightarrow \mu$

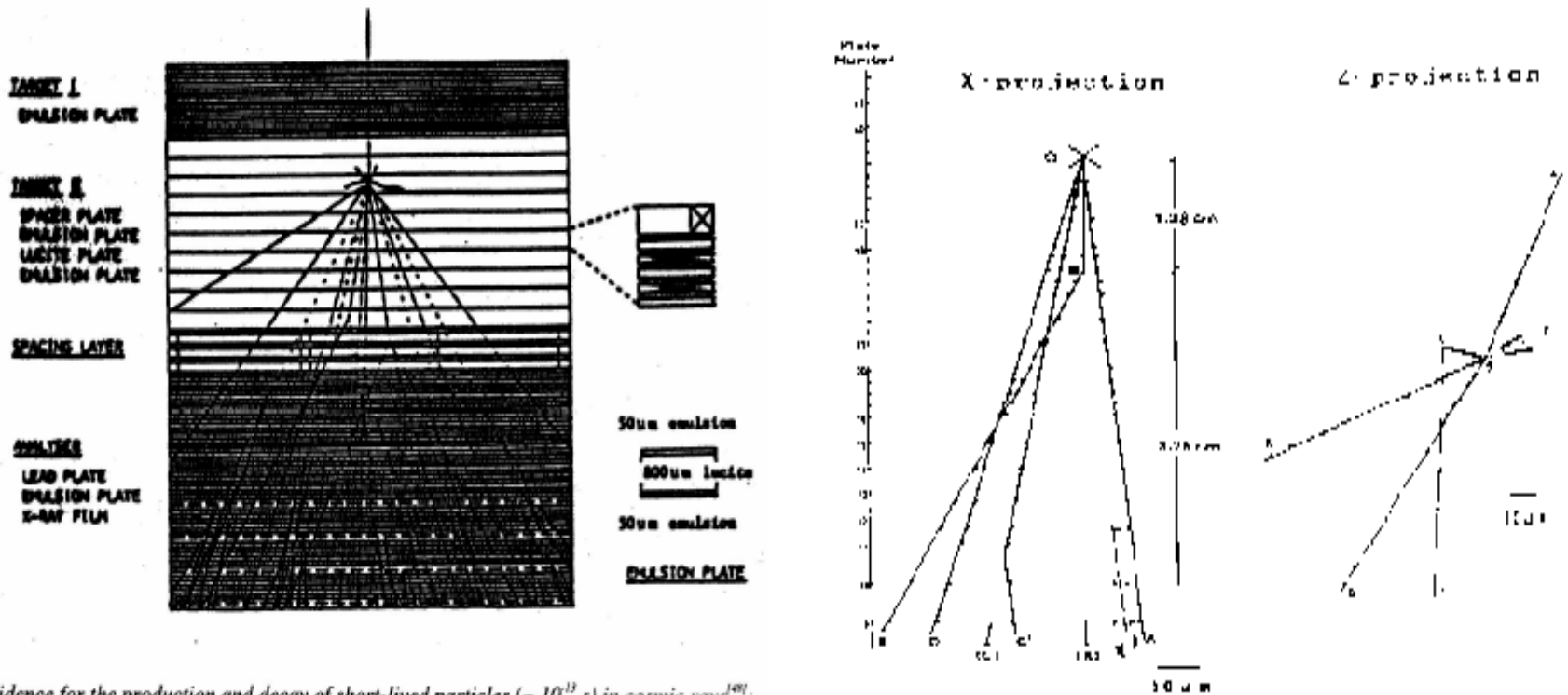
Lattes, Muirhead, Occhialini and Powell,

OBSERVATIONS ON THE TRACKS OF SLOW MESONS IN PHOTOGRAPHIC EMULSIONS, *Nature* 159 (1947) 694.

Prima particella con "charm" (X)

A POSSIBLE DECAY IN FLIGHT OF A NEW TYPE PARTICLE

Niu et al., Prog.Theor.Phys.46 (1971) 1644-1646.



(a) First evidence for the production and decay of short-lived particles ($\sim 10^{-13}$ s) in cosmic rays¹⁰⁰;
 (b) the event was observed in an emulsion chamber.

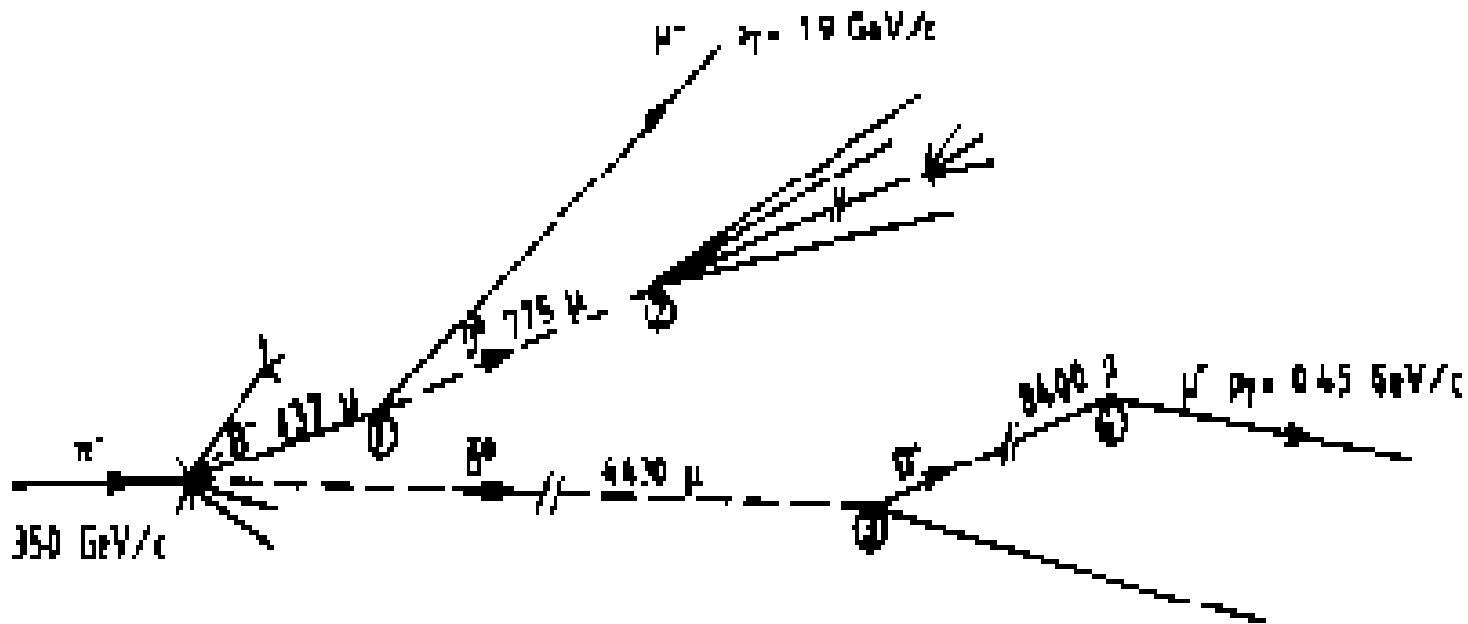
DISCOVERY OF A NARROW RESONANCE IN E+ E- ANNIHILATION

Phys.Rev.Lett.33:1406-1408,1974

WA75 experiment at CERN

- *A hybrid experiment to observe directly particles with open beauty and estimate their lifetimes.*
- *π^- beam at 360 GeV/c. Explored lifetime range of 10^{-15} - 10^{-12} s. The decay vertices of B and of the subsequent charm decays identified in emulsion.*
- *The semi-leptonic decays of B's and C's used to create a selective trigger.*
- *The muons identified and momenta measured behind a 2m iron dump equipped with a tungsten core. The last part of the data taken with the dump replaced by the WA78 calorimeter.*
- *The emulsions scanned using the recently developed semi-automatized technique. A volume of 60 litres of emulsion will provide a sensitivity of the order of 1.5 B pairs per nanobarn cross-section.*

Prima particella con “beauty”



*Due particelle con “beauty” sono create e decadono di lì a poco (10^{-12} s)
Creando particelle con “charm” che a loro volta decadono*

DIRECT OBSERVATION OF THE DECAY OF BEAUTY PARTICLES INTO CHARM PARTICLES, Phys. Lett. B158 (1985) 186, Esperimento WA75, CERN

Prima osservazione di charm in interazioni di neutrino

Esperimento E247 al Fermilab, 1965

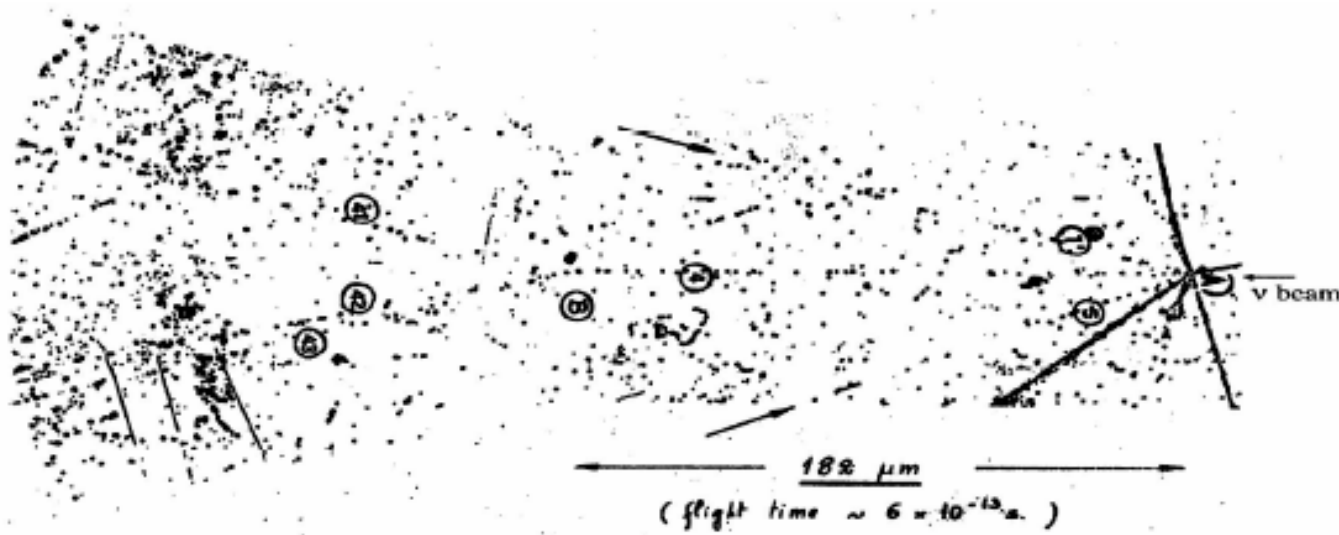


Fig. 14 First observation of the neutrino-production and subsequent decay of a charmed hadron; the charmed hadron decay path is $182 \mu m$, corresponding to a flight time of $6 \times 10^{13} s$.

37 interazioni di neutrini e 1 evento di produzione di charm ($183 \mu m$)
Burhop et al., N.C. 39 (1965) 1037

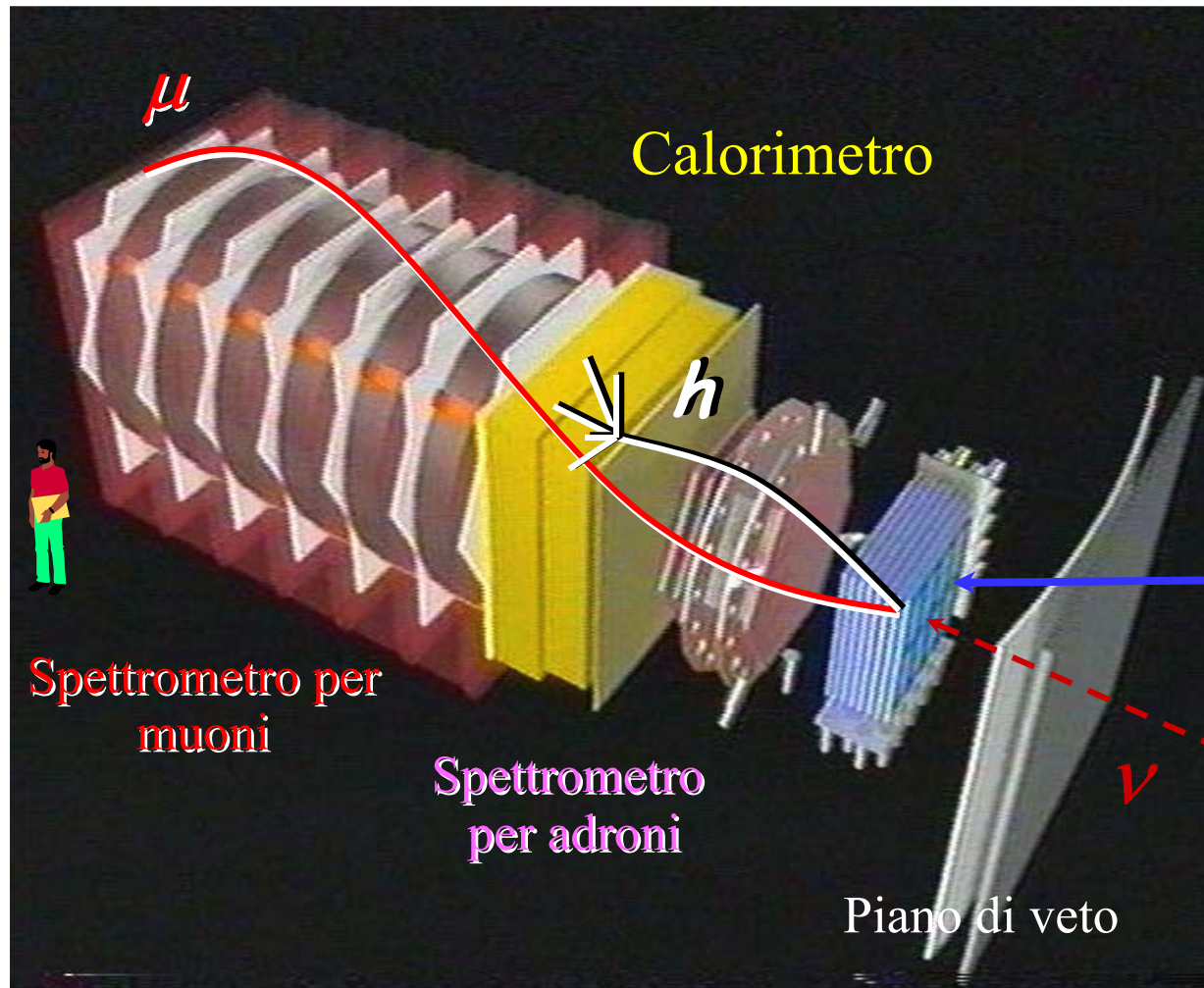
CHORUS (CERN): ricerca di oscillazioni di neutrino e fisica del quark charm



Rivelatori "elettronici"

- localizzare tracce nelle emulsioni
- identificare le particelle
- misurarne l'energia

Fibre ottiche scintillanti e altre tecniche



Prima automatizzazione su larga scala

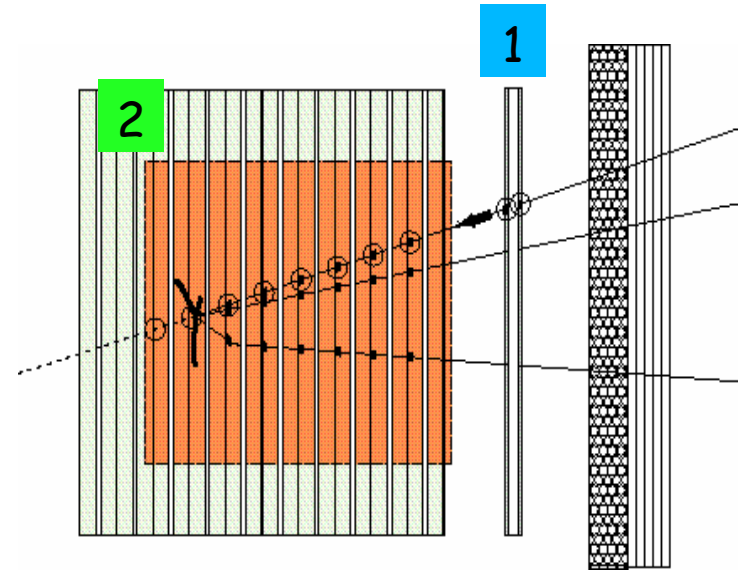
1 Location of ν interaction vertex guided by electronic detector.

2 Full data taking around ν interaction vertex called Netscan

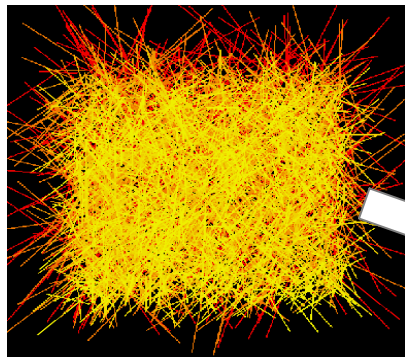
Volume : $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2 \times 6.3 \text{ mm}$

Angular acceptance : 400 mrad

~ 11 minutes / event

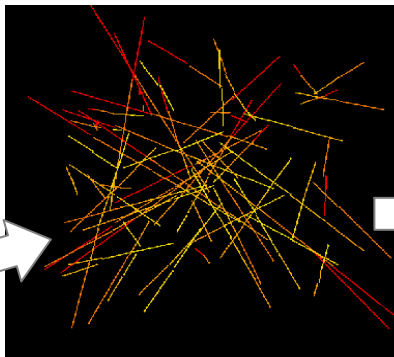
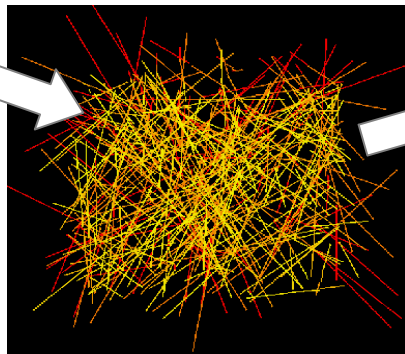


3 Offline tracking and vertex reconstruction



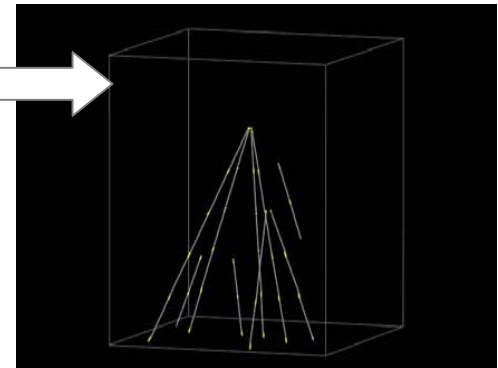
Track segments
from 8 plates
overlapped

At least 2-segment
connected tracks



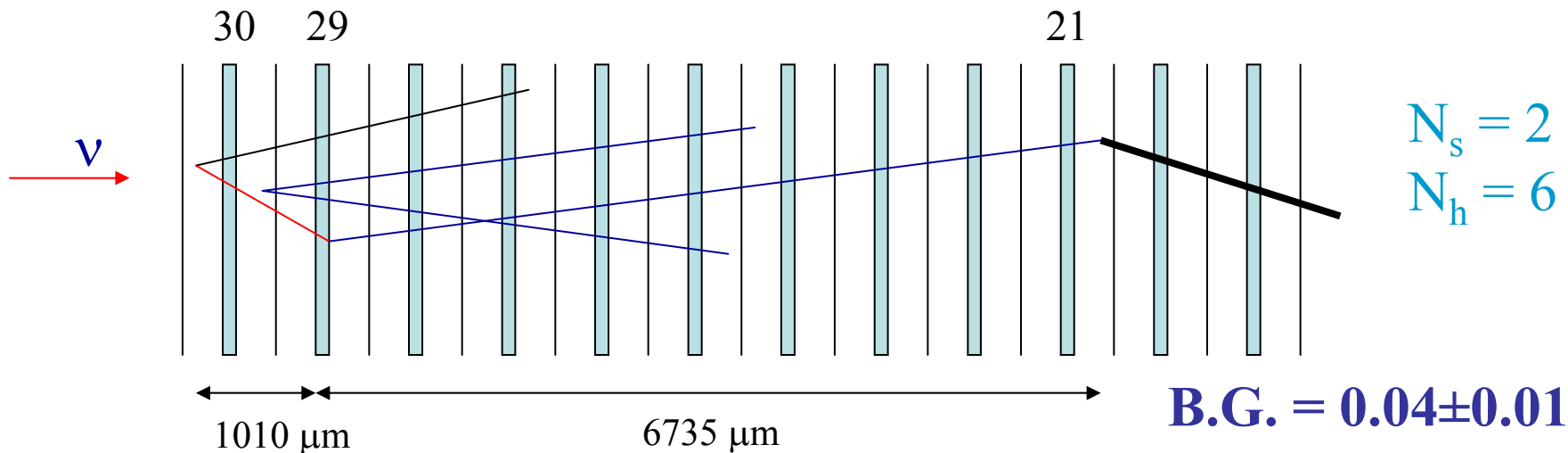
Eliminate passing
through tracks

Reconstruct full
vertex topology



Prima osservazione della produzione associata di charm in CC

Phys. Lett B 539 (2002) 188, CHORUS Coll.



D^0 f.l. = $340 \mu\text{m}$

1st vertex

$\theta_{\text{kink}} = 420 \text{ mrad}$
f.l. = $1010 \mu\text{m}$

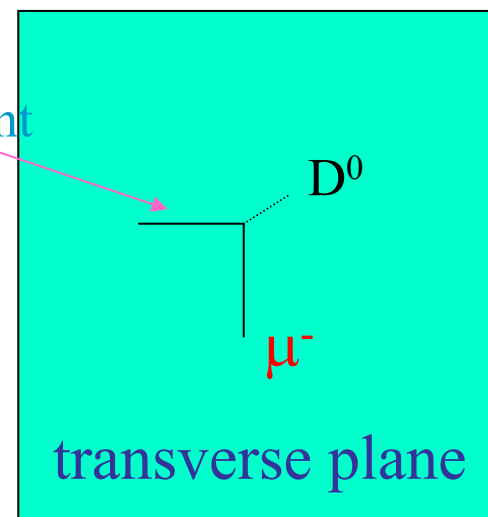
2ry vertex

$\theta_2 = 310 \text{ mrad}$
f.l. = $7560 \mu\text{m}$

$p\beta = 500^{+180}_{-110} \text{ MeV}/c$ } $P = 0.78 \text{ GeV}/c$

$dE/dx \rightarrow \text{proton}$ } $P_{\perp} > 330 \text{ MeV}/c$

kink parent



Produzione associata in NC

Ns = 6

Nh = 1 (gray)

4Vee @ pl 17

FL = 884 μm

C3 @ pl 17

FL = 426 μm

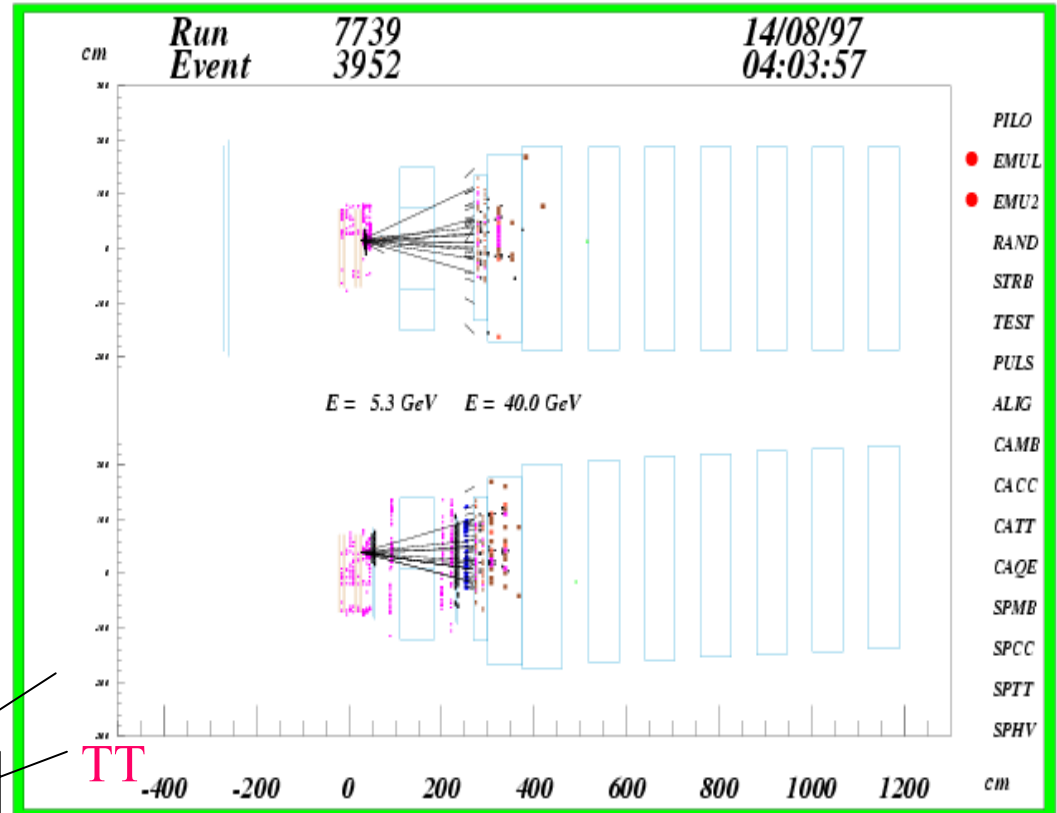
PLATE 18

PLATE 17

210 μm

140 μm

120 μm



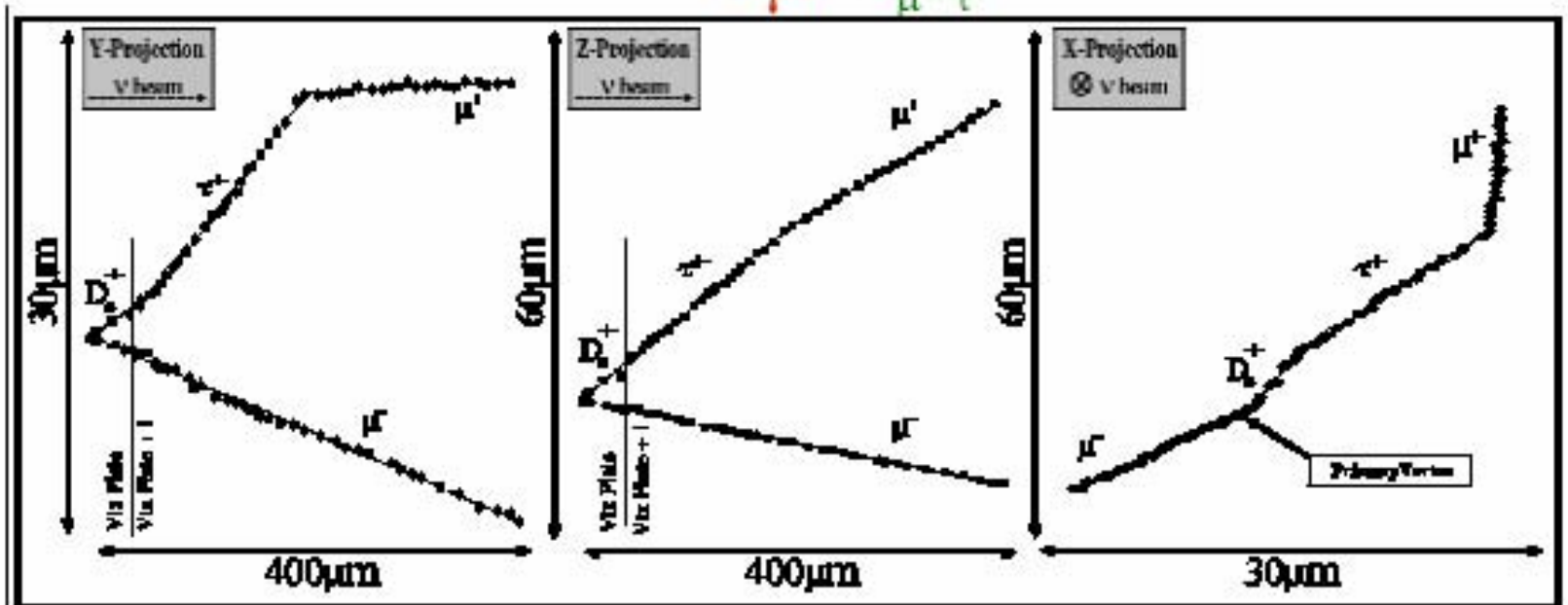
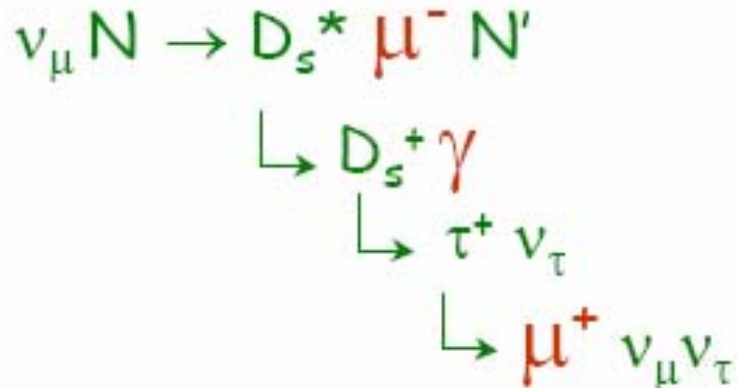
TT

TT

TT

Diffractional D_s production

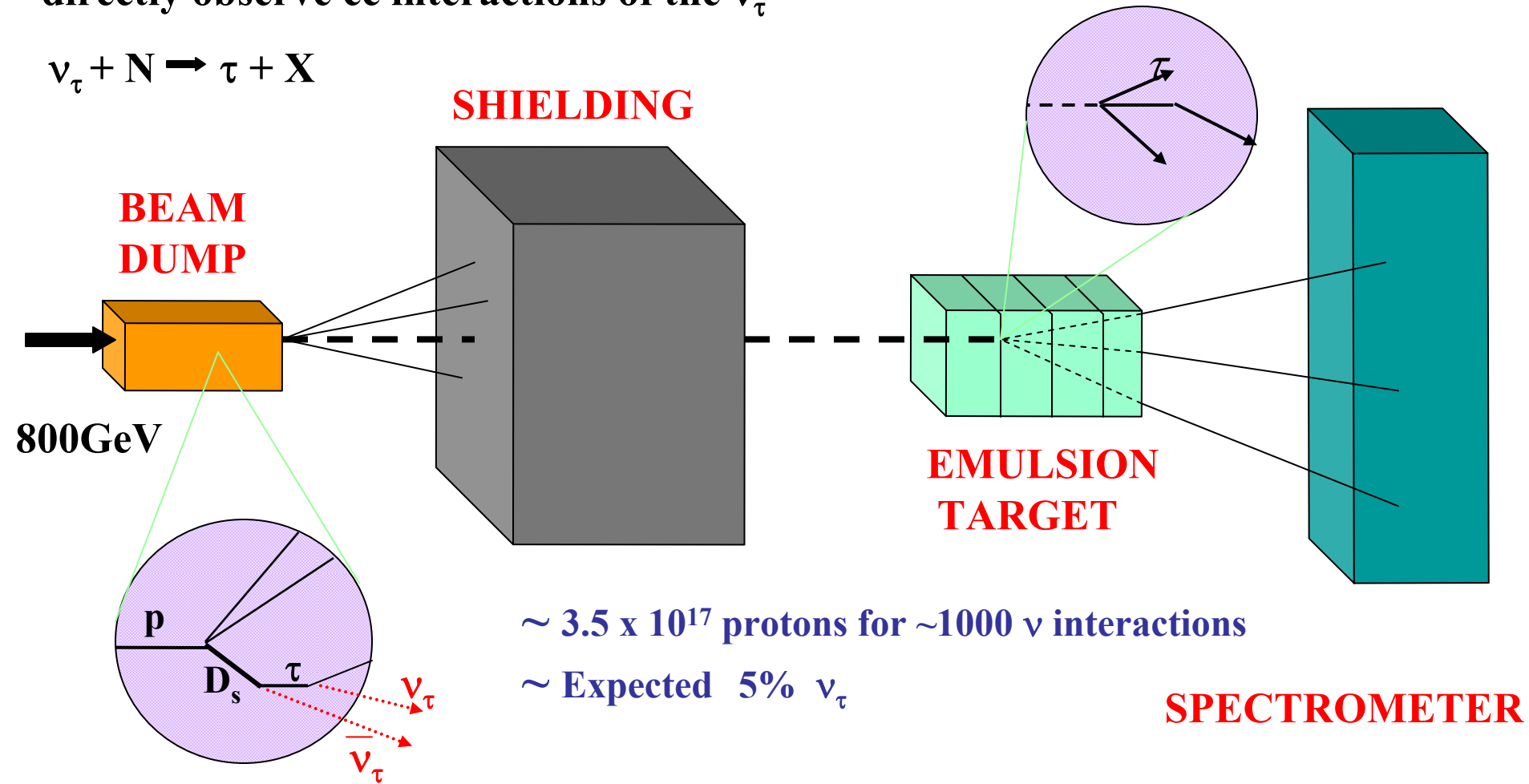
Phys. Lett. B 435 (1998) 458, CHORUS Coll.



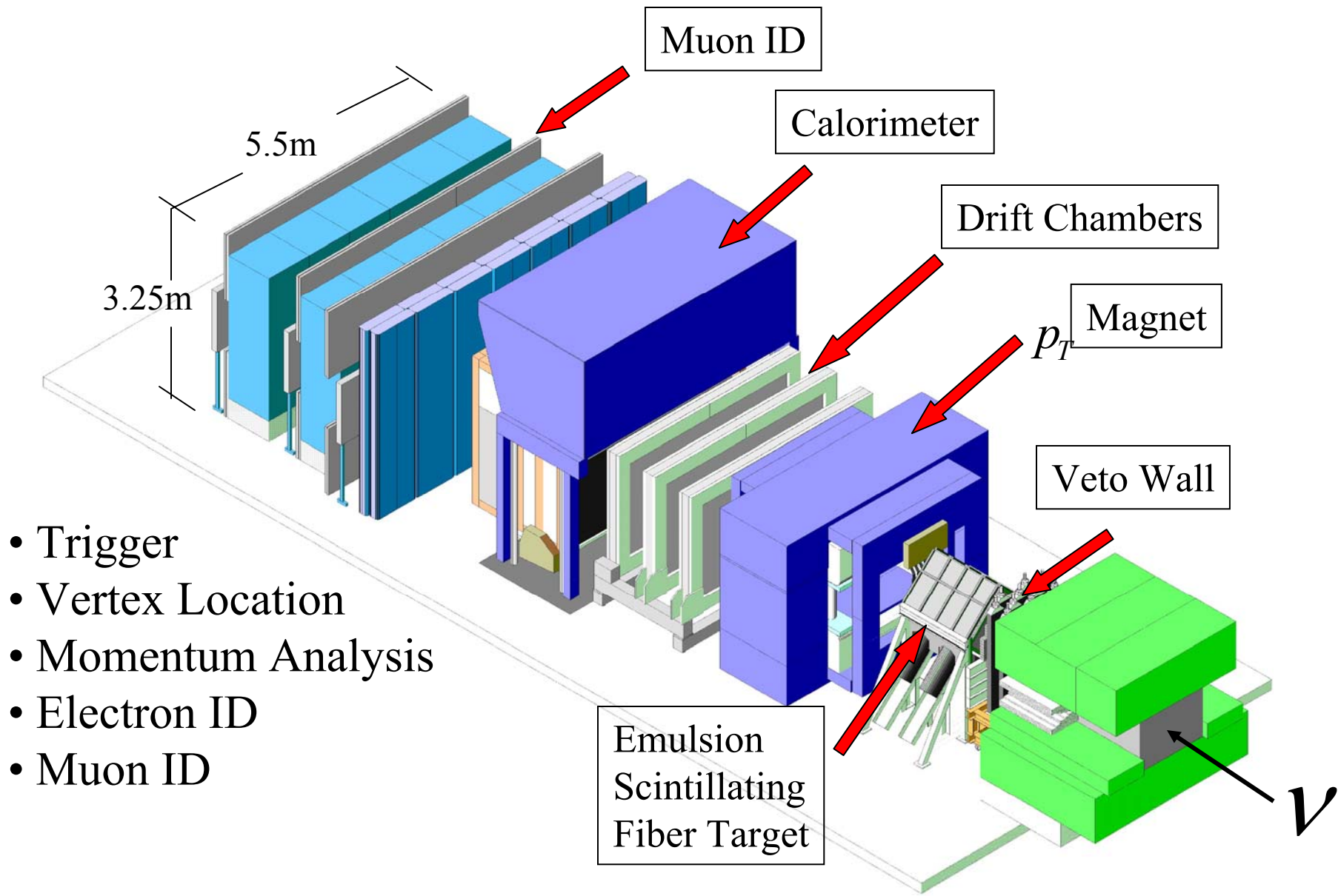
The DONUT experiment (Fermilab)

directly observe cc interactions of the ν_τ

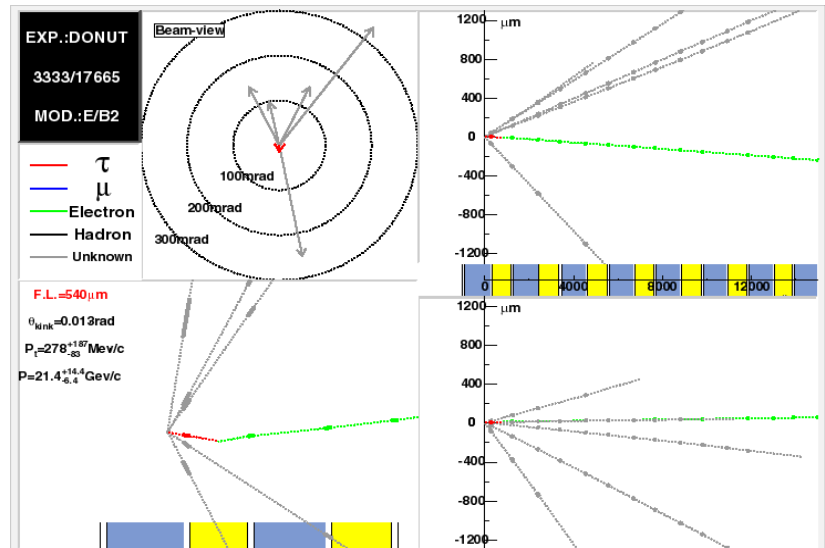
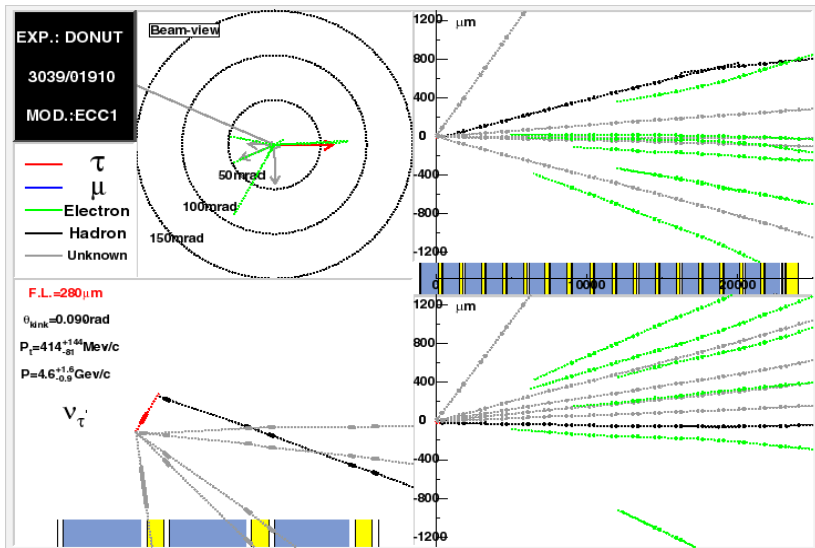
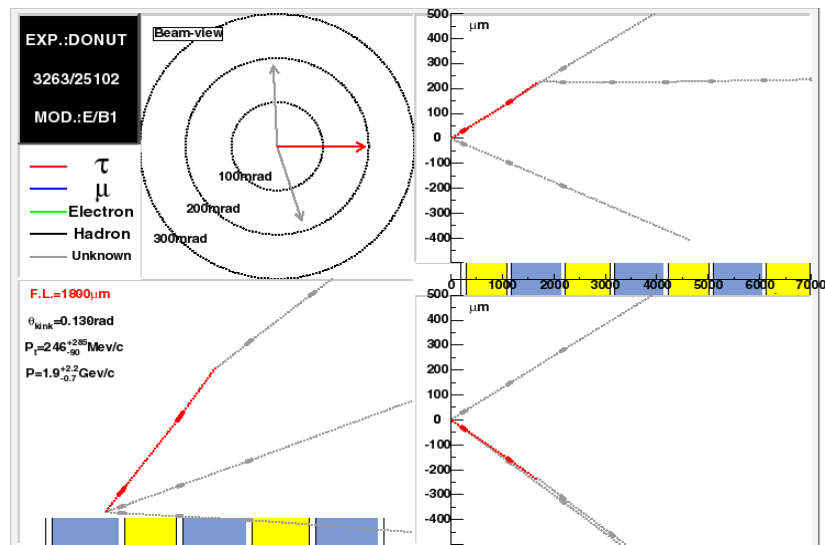
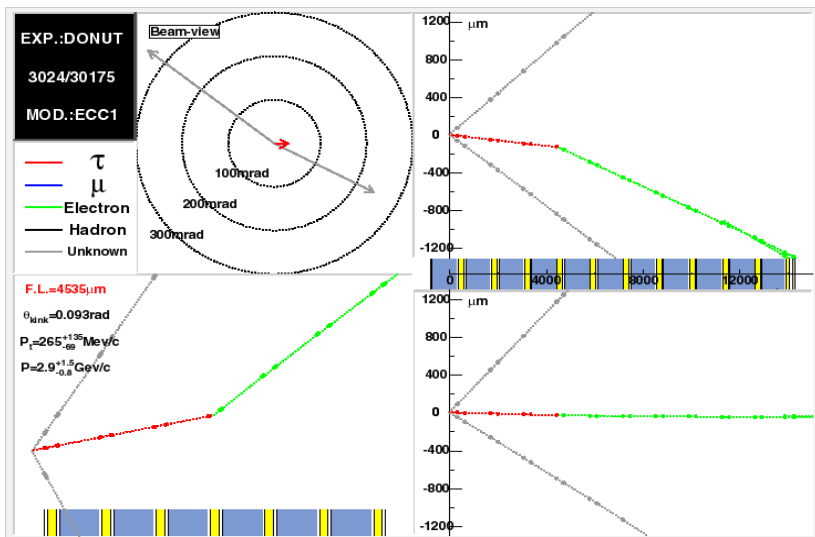
$$\nu_\tau + \mathbf{N} \rightarrow \tau + \mathbf{X}$$



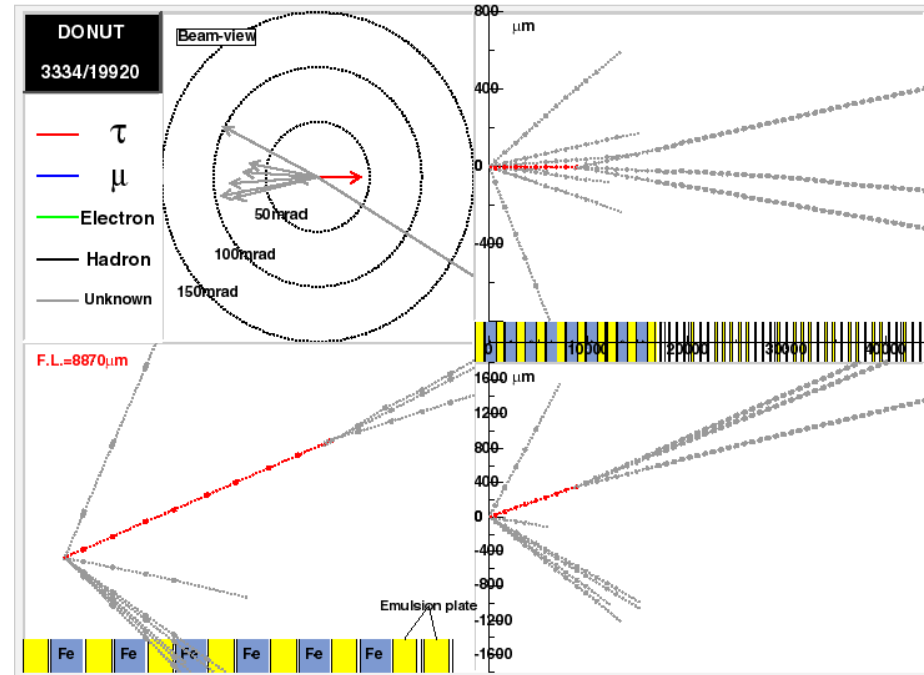
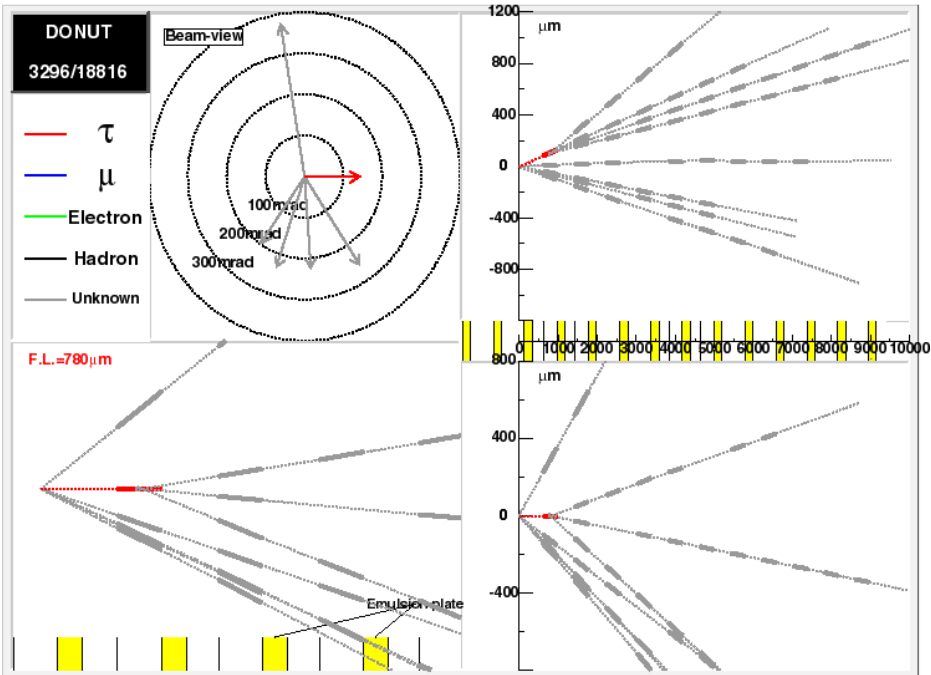
Spectrometer



Phase 1 ν_τ Candidates



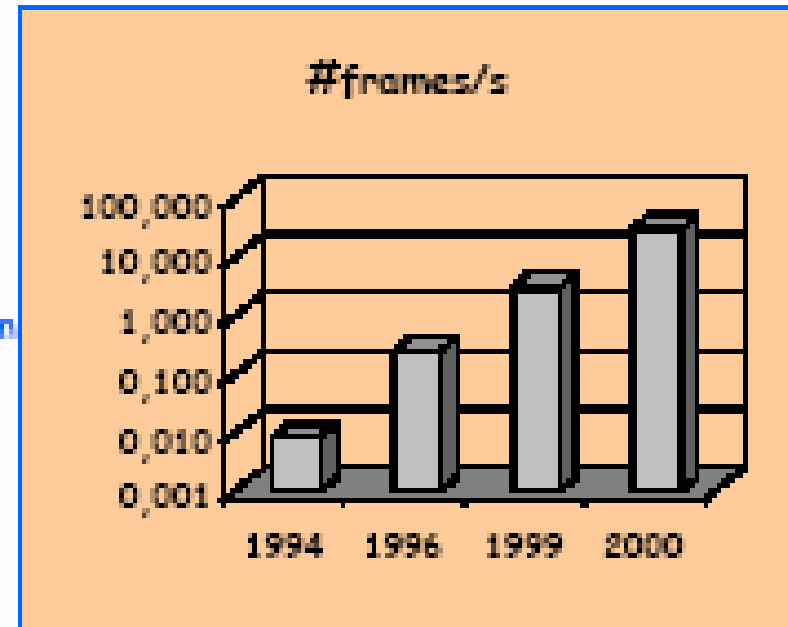
Phase 2 ν_τ Candidates



Velocità di scansione dei primi sistemi

- *Analisi completamente visiva fino agli anni '80*
- *Primo prototipo semi-automatico negli anni 80*
- *Primo prototipo completamente automatico negli anni '90*
- *Sviluppo tecnologico negli anni '90*

scanning speed



Sviluppo di microscopio automatico per l'esperimento OPERA

Primo prototipo assemblato a Napoli nel 2001 utilizzando HW e SW allora disponibile. Dopo numerosi aggiornamenti e lungo lavoro di ottimizzazione la versione finale è stata messa a punto nel 2004.

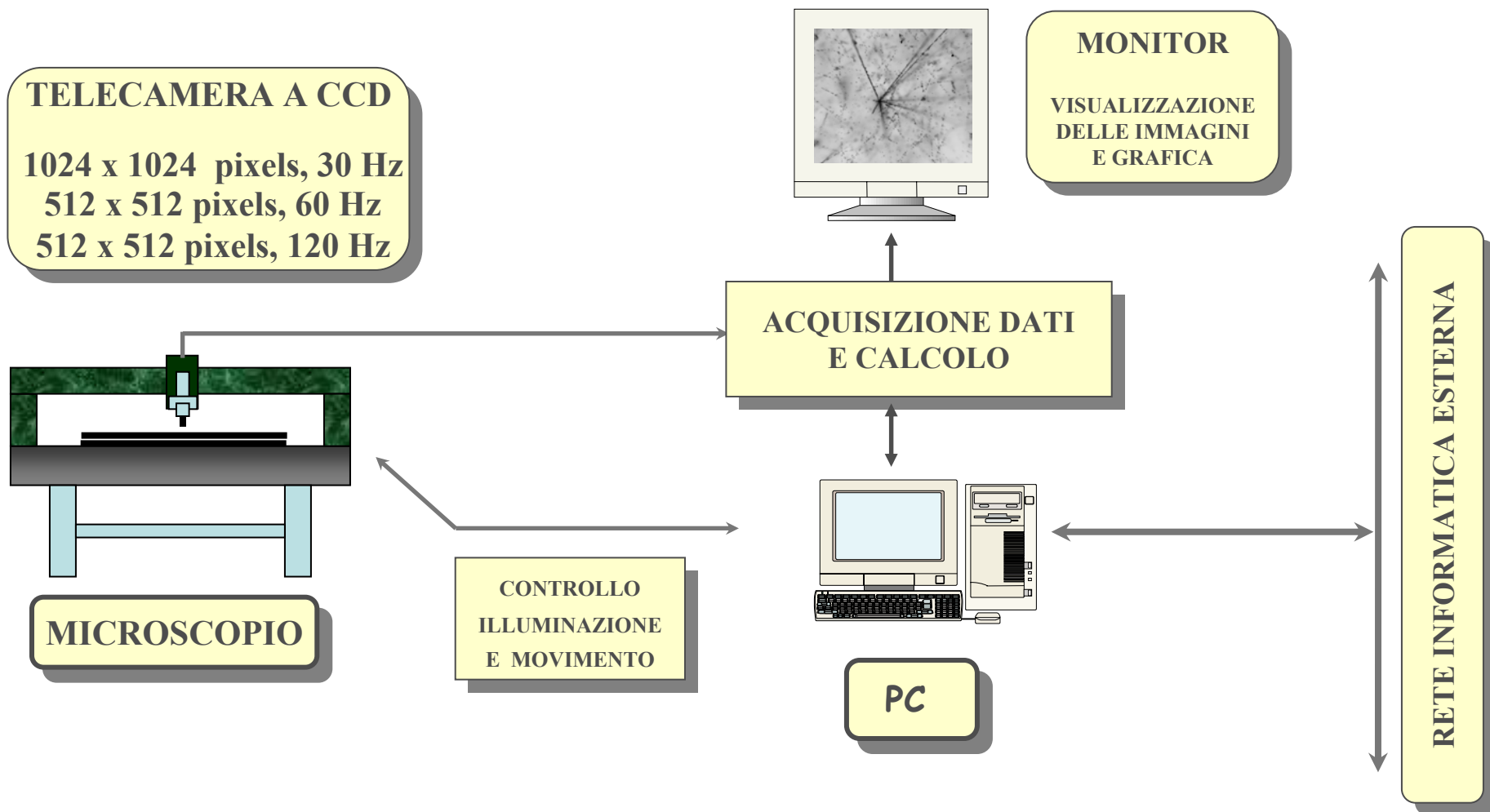
2004

<i>velocità di scansione (cm^2/h) :</i>	<i>20</i>
<i>efficienza di tracciamento (tracce verticali) :</i>	<i>94%</i>
<i>(200 mrad)</i>	<i>90%</i>
<i>(400 mrad)</i>	<i>85%</i>
<i>fondo strumentale (tracce/cm^2):</i>	<i>~ 2</i>

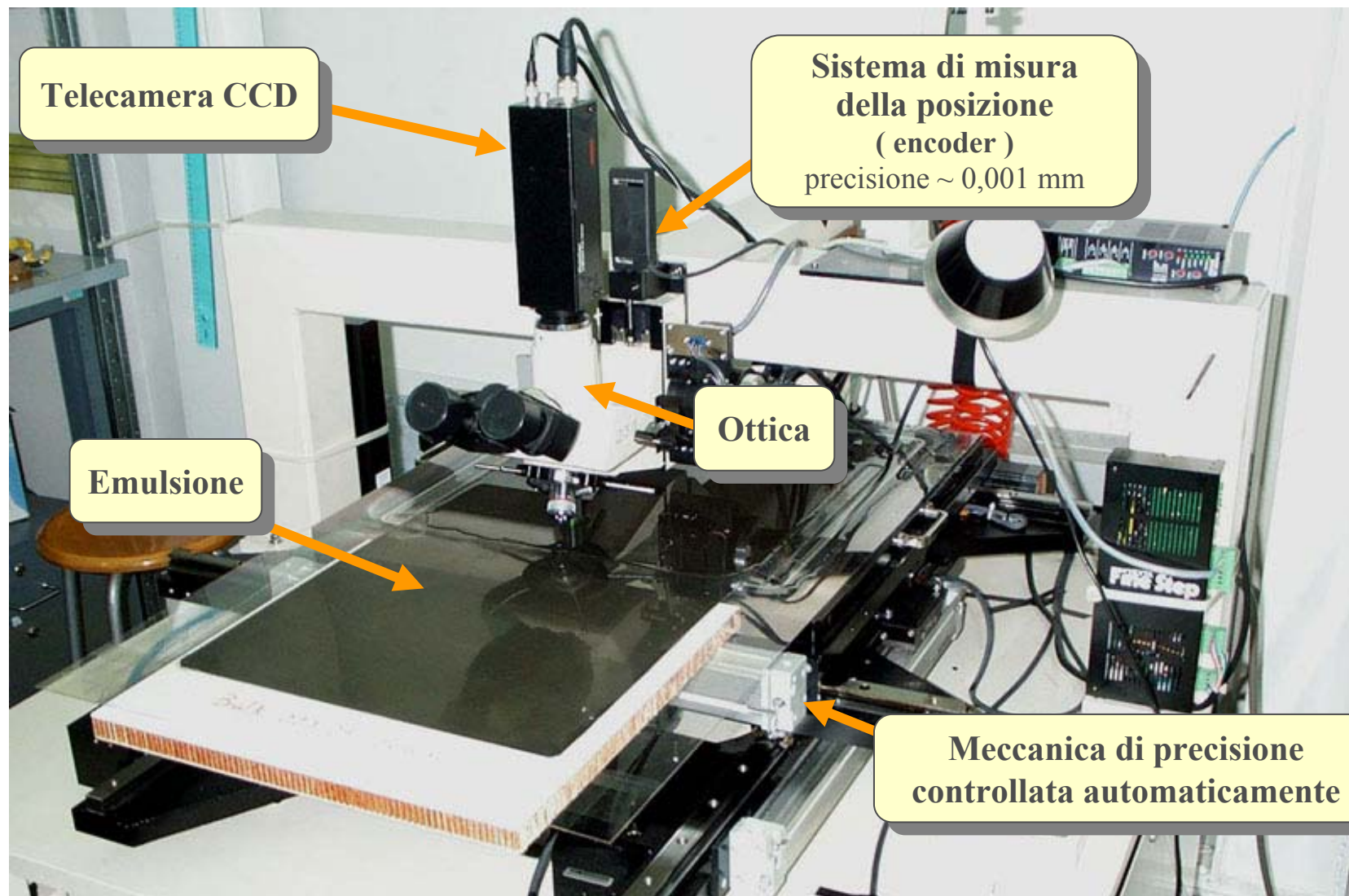
Evoluzione temporale della velocità



SISTEMA AUTOMATICO PER ANALISI DI IMMAGINI 3-DIMENSIONALI IN EMULSIONI (schema generale)



MICROSCOPIO AUTOMATICO E TELECAMERA



RICERCA AUTOMATICA DI TRACCE ED EVENTI

VISTE A
DIVERSA PROFONDITA'
NELL'EMULSIONE

CCD

OBIETTIVO 50 X

vista $\sim 0,15 \times 0,15 \text{ mm}^2$

profondità di fuoco
 $\sim 0,003 \text{ mm}$

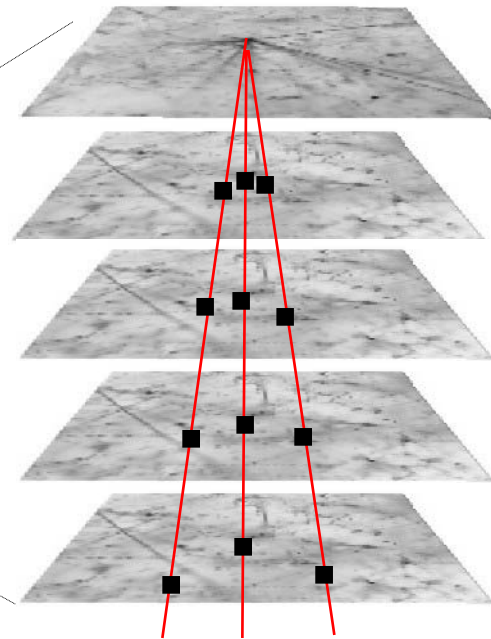
EMULSIONE

BANCO OTTICO E
MICROSCOPIO

10 - 50 viste

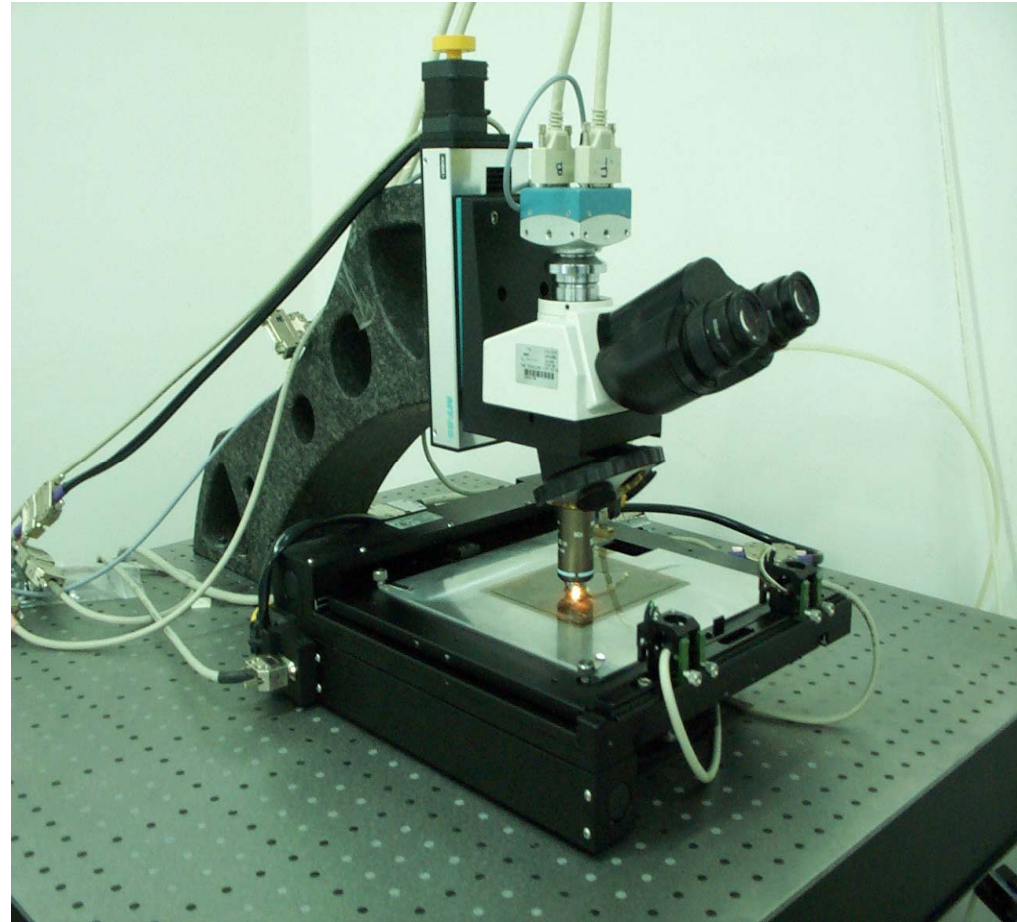
RICERCA DI GRANI
ALLINEATI

TRACCE
(grani allineati)



Configurazione attuale del microscopio

- Telecamera Mikrotron MC1310 con sensore CMOS (1280 x 1024 pixels da $12 \times 12 \mu\text{m}^2$) a 500 fps e risoluzione di $0.3 \mu\text{m}/\text{pixel}$
- Trinoculare Nikon
- Obiettivo Nikon 50x oil, NA 0.9, WD 0.4 mm, fd $0.54 \mu\text{m}$
- Asse verticale Micos MT-85 e piatto Micos MS-8 pilotati da motori passo-passo con encoder di lettura posizione da $0.1 \mu\text{m}$
- Braccio in granito
- Sistema di vuoto per il fissaggio dell'emulsione
- Gruppo di illuminazione in collaborazione con la Nikon-Italia



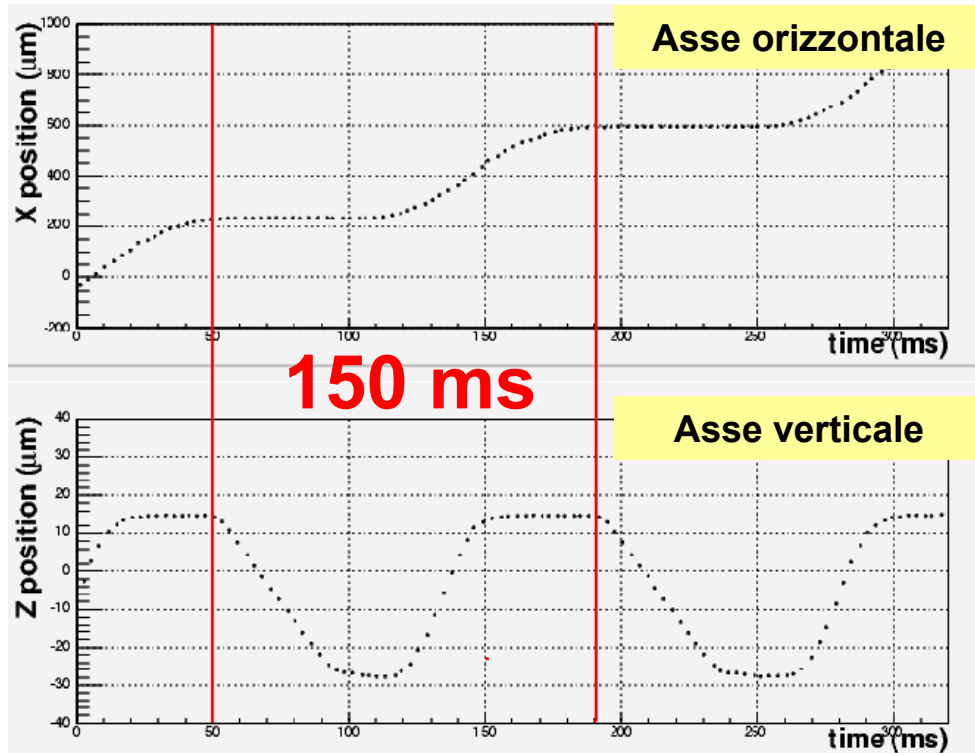
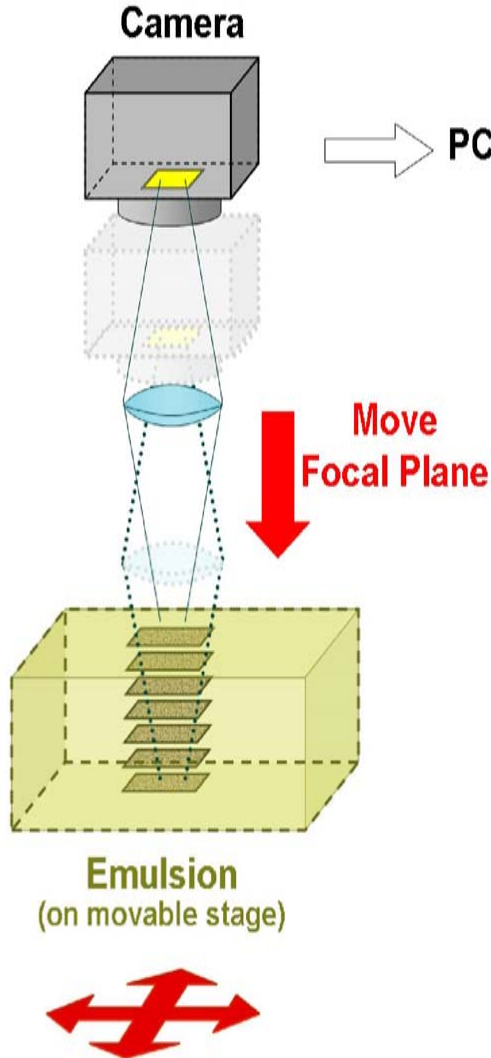
Definizione del ciclo di funzionamento

16 immagini ($360 \times 280 \mu\text{m}^2$) acquisite in $42 \mu\text{m}$

Frequenza di funzionamento della telecamera: 376 fps

Spostamento verticale a velocità costante: $987 \mu\text{m/s}$

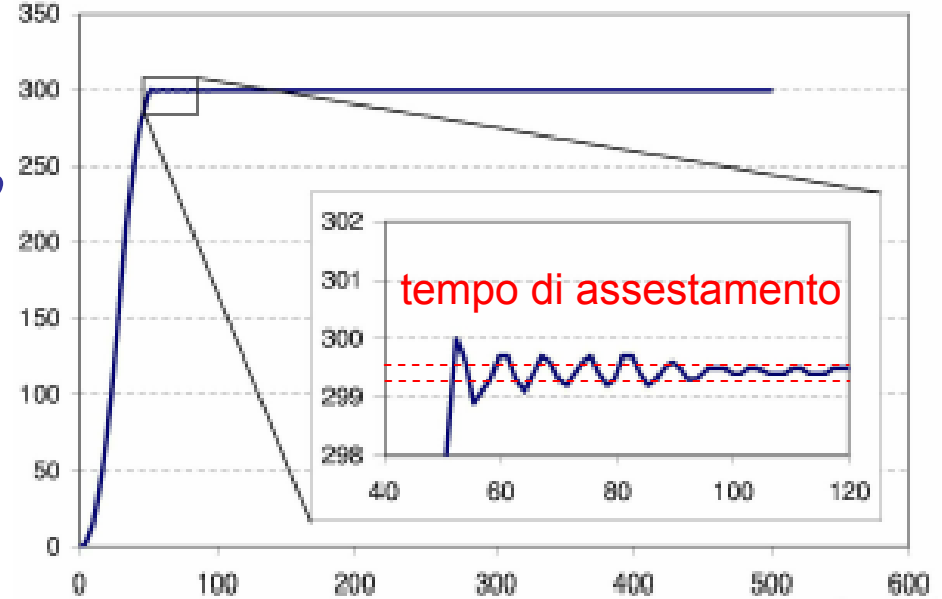
Tempo di spostamento verticale: 42.5 ms



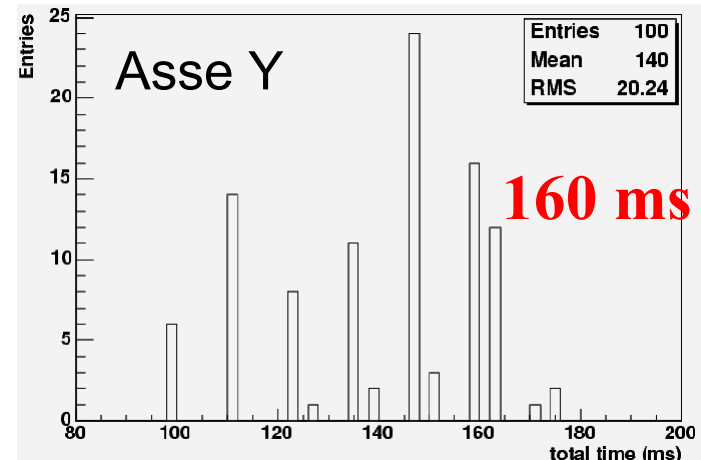
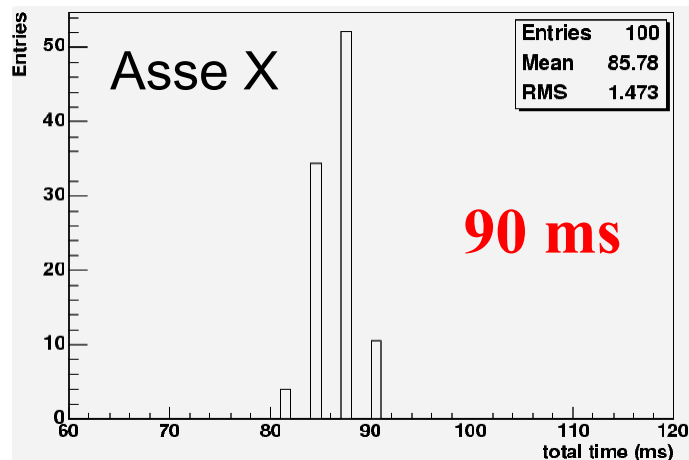
Ottimizzazione degli spostamenti orizzontali

Il tempo necessario per il cambio dell'inquadratura (spostamento orizzontale) è dato dalla somma del tempo di spostamento e del tempo di assestamento.

Le oscillazioni del piatto devono essere contenute entro $0.3 \mu\text{m}$ (dimensione lineare dell'area inquadrata da un pixel).



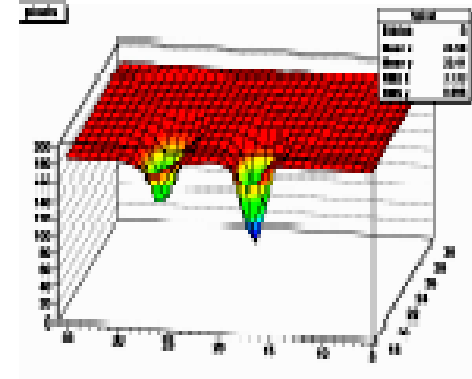
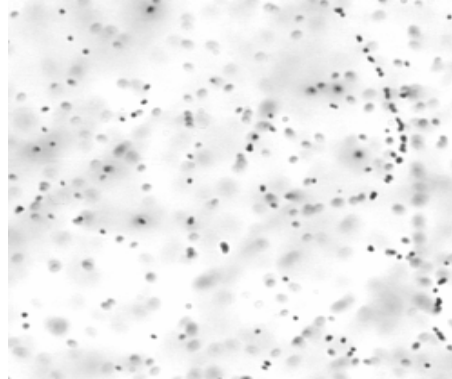
Parametri ottimali: velocità 30 mm/s accelerazione 200 mm/s^2



Analisi delle immagini

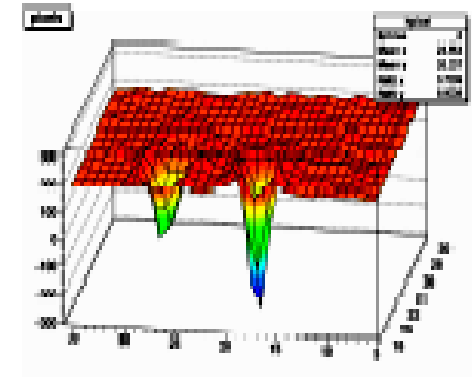
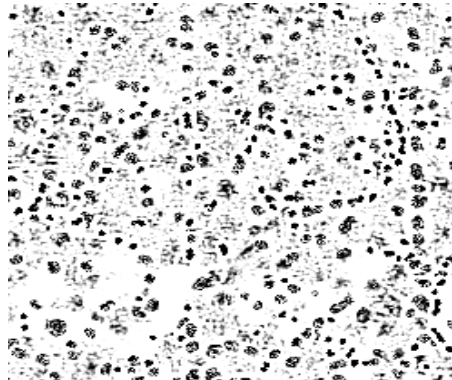
ACQUISIZIONE

Le immagini vengono trasferite alla scheda di processamento



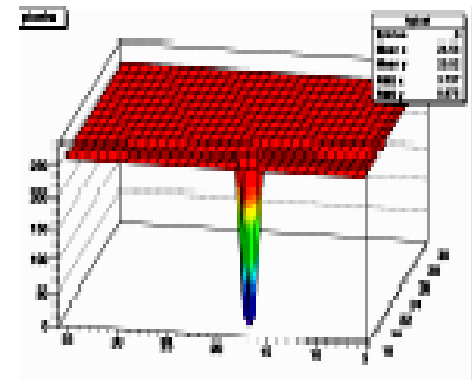
FILTRAGGIO

il valore di ogni pixel viene ricavato come risultato di una media pesata anche sui pixel confinanti



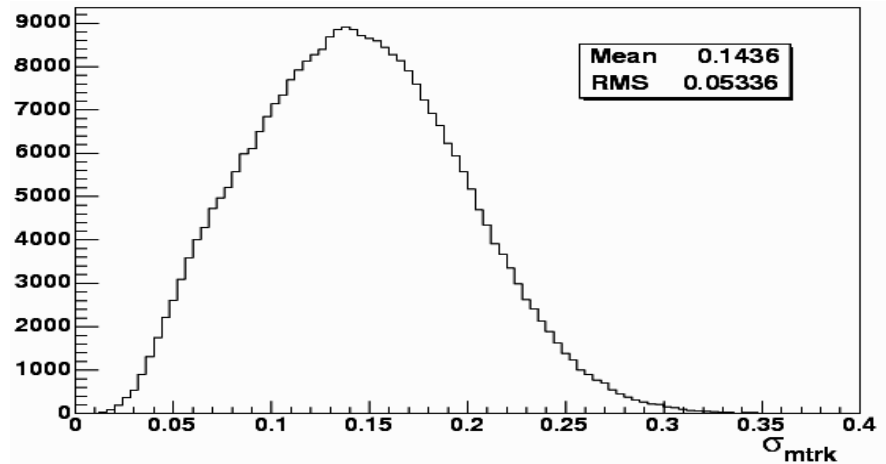
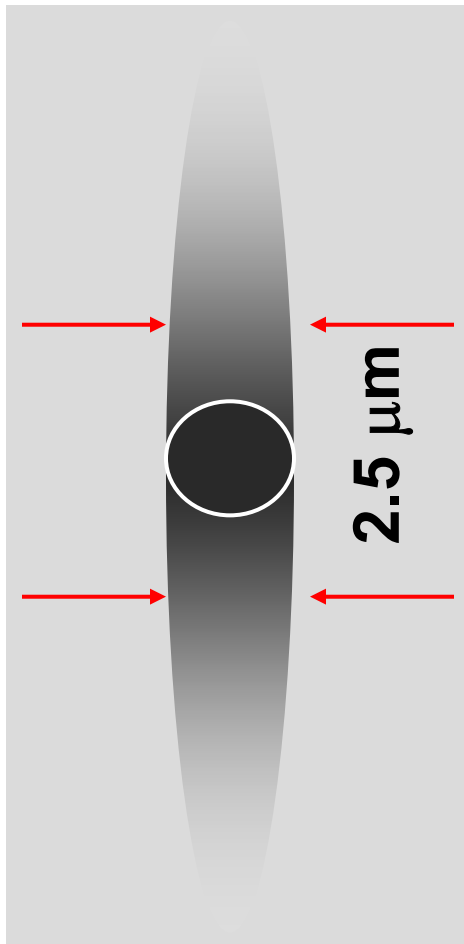
SOGLIA e BINARIZZAZIONE

Viene applicata una soglia e l'informazione viene binarizzata. Si procede poi alla ricerca delle sequenze di pixel "neri"



Risoluzione dei cluster

La posizione X,Y dei cluster è ricavata come media delle posizioni dei pixel appartenenti al cluster. La risoluzione ottenuta è strettamente legata alla risoluzione della telecamera: $\sigma(X,Y) = 0.14 \mu\text{m}$



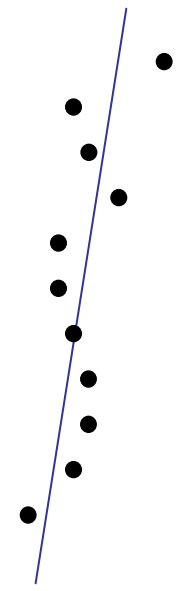
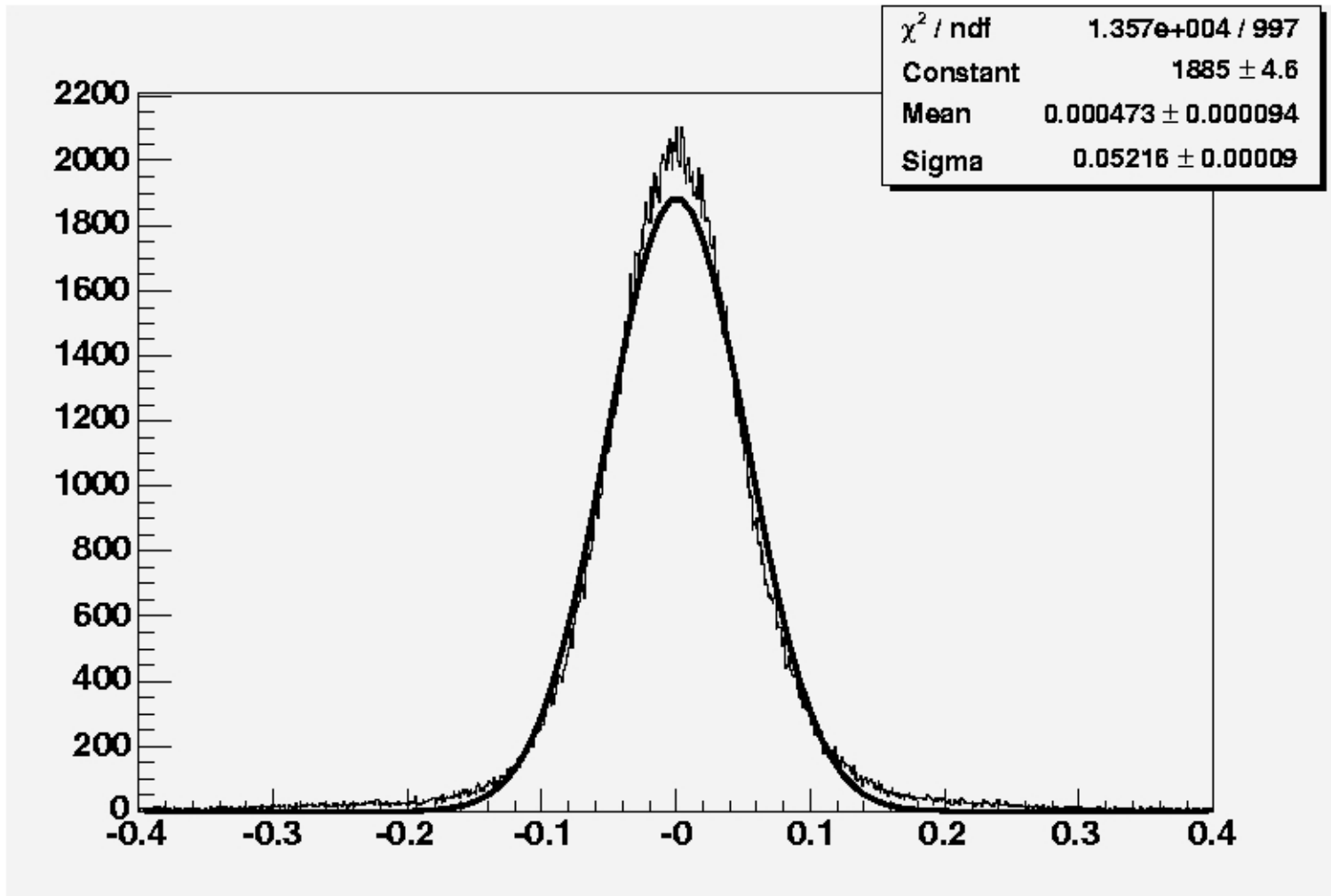
La soglia applicata definisce la profondità focale effettiva del sistema.

Al fine di evitare sovra o sottocampionamenti si fa in modo che la profondità focale effettiva coincida con la distanza fra 2 immagini consecutive.

Si avrà pertanto che:

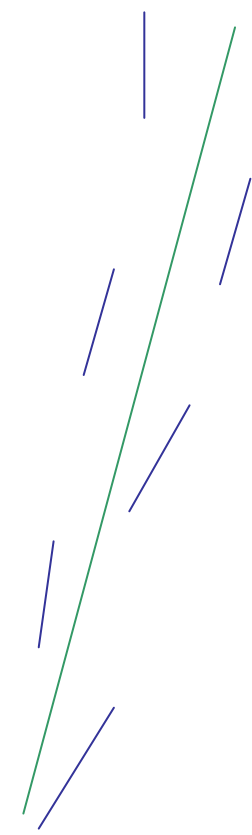
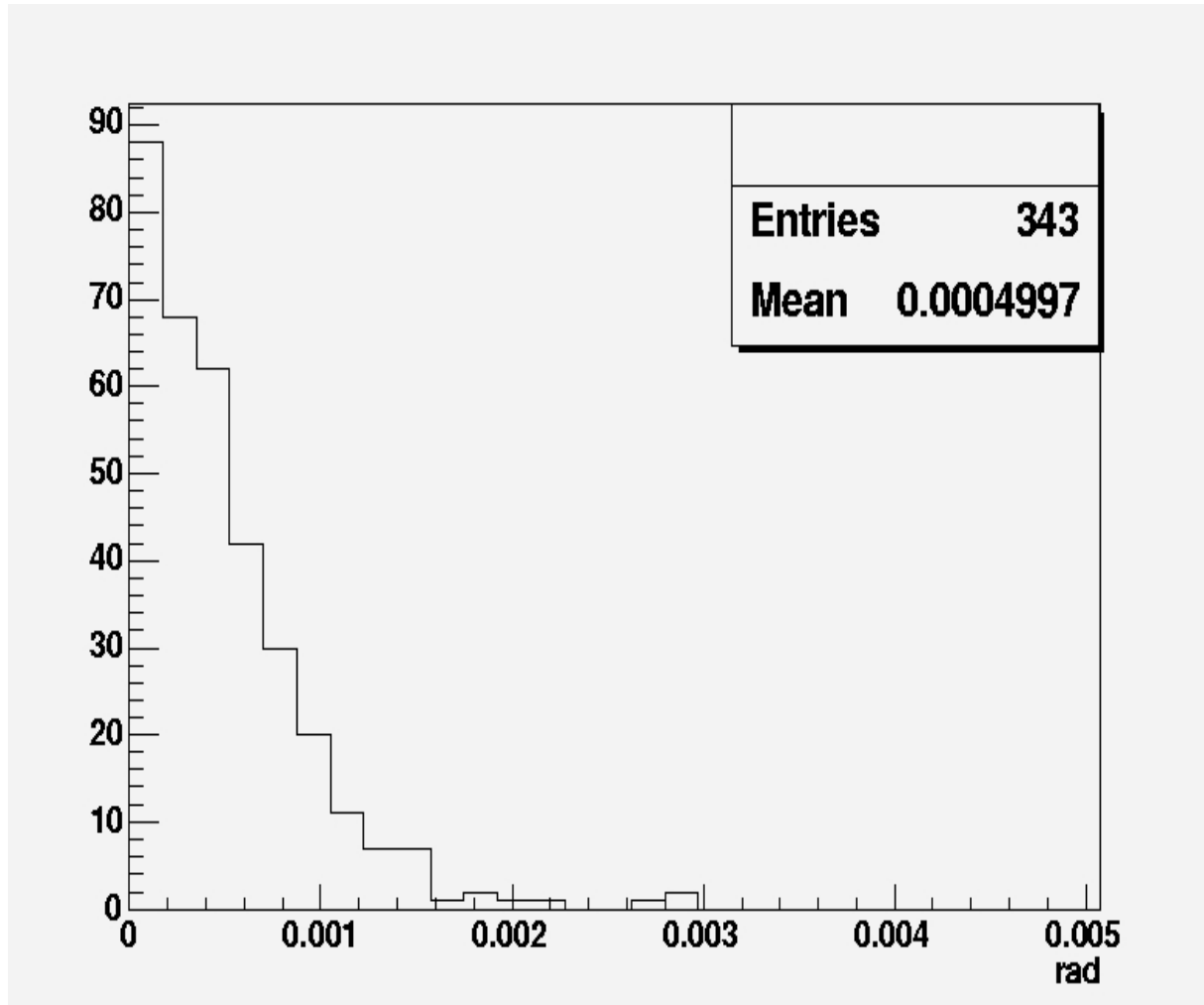
$$\sigma(Z) = 2.5/\sqrt{12} \mu\text{m} \cong 0.7 \mu\text{m}$$

Misura della posizione



Distanza dei cluster dalla traccia

Misura degli angoli (residui)

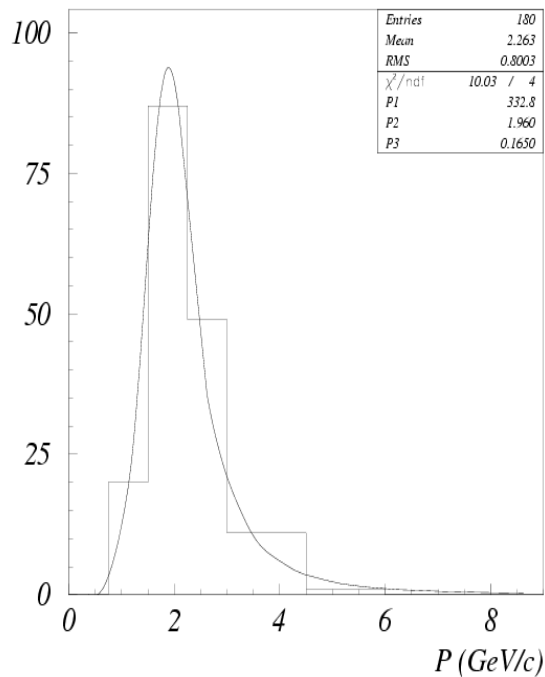


Mediana = 0.4 mrad

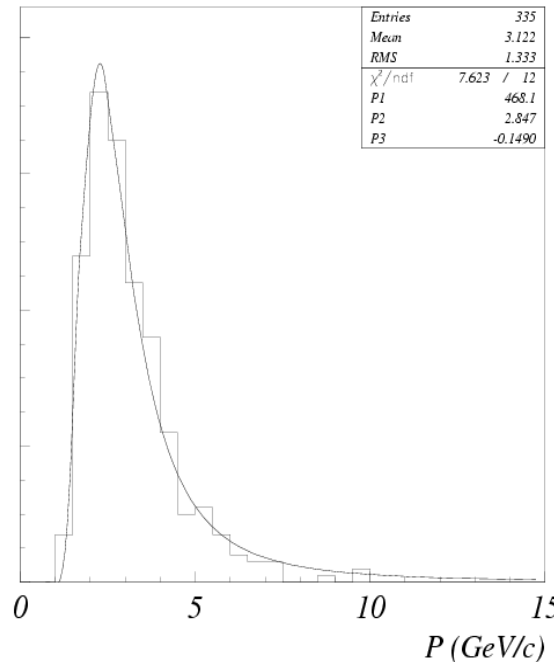
Residui delle singole misure angolari rispetto al fit della traccia fatto su più lastre consecutive

Misure di quantità di moto attraverso la deflessione Coulombiana multipla

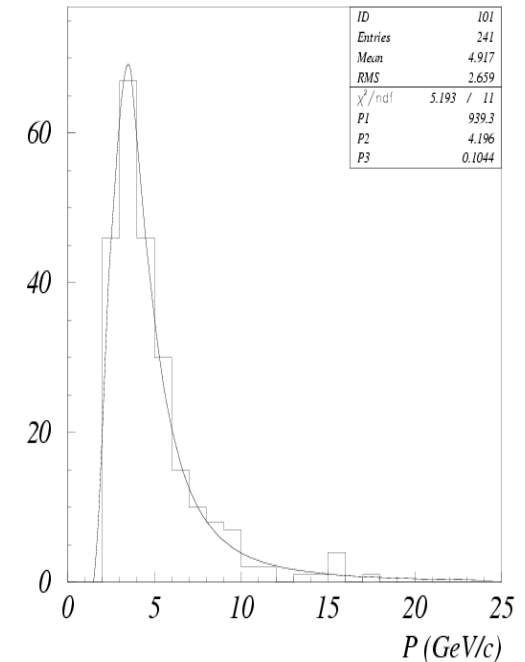
2 GeV



3 GeV



4 GeV



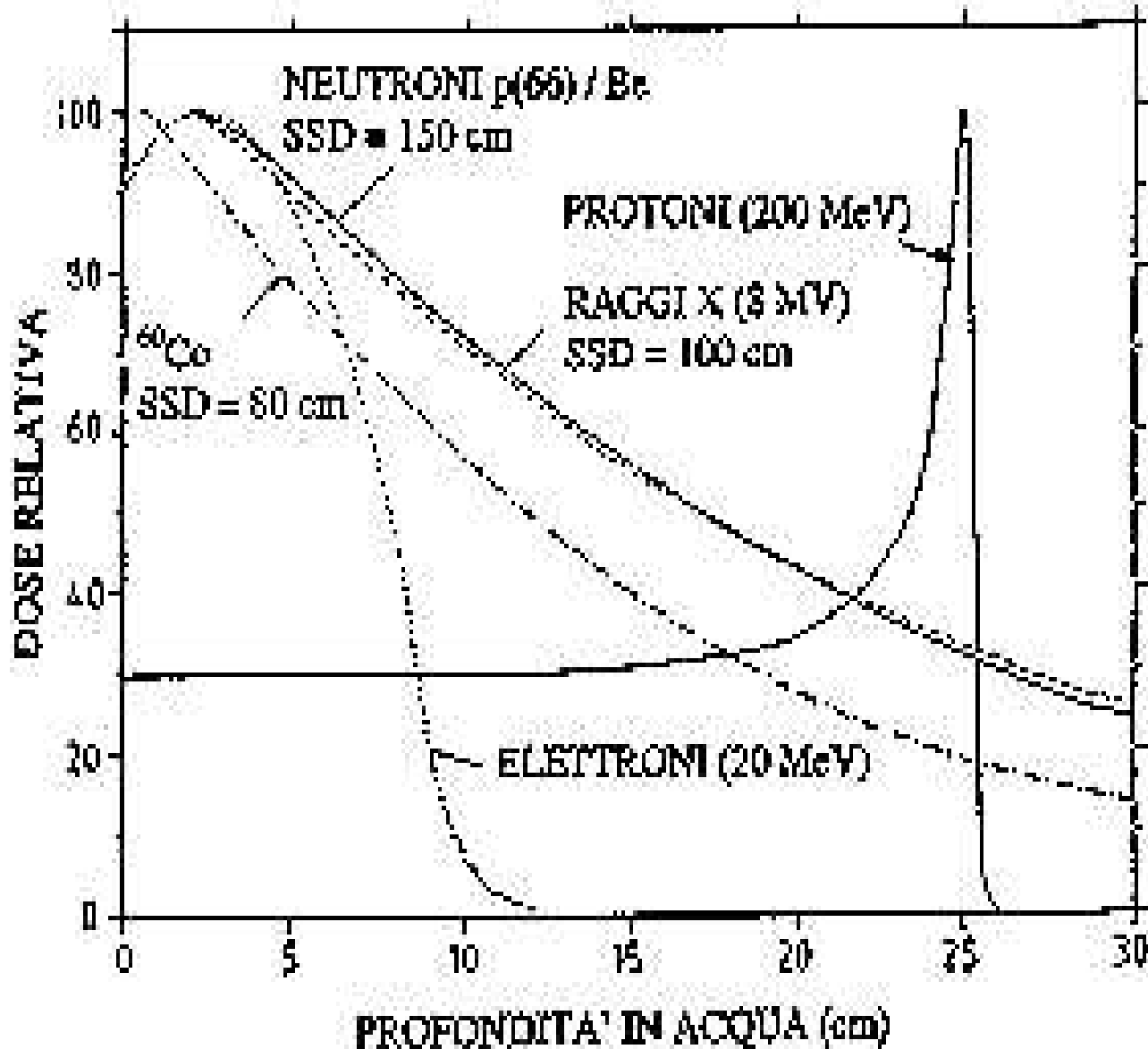
$$f(x) = \sqrt{\sigma^2 + \left(\frac{13.6}{p}\right)^2 \left(\frac{x}{5.6}\right)^2}$$

Risoluzioni in impulso del 25% ottenibili con camere da circa 2.5 cm

Applicazioni alla biofisica

- Caratterizzazione della radiazione usata in adroterapia oncologica
- Miglioramento della conoscenza della radiazione → miglioramento nella efficacia della terapia
- Capacità di misurare la carica (attraverso la ionizzazione)
- Capacità di misurare la cinematica
- Incomparabile risoluzione in posizione (misure di molteplicità e di spettri angolari dei prodotti)

Rilascio energetico nei tessuti

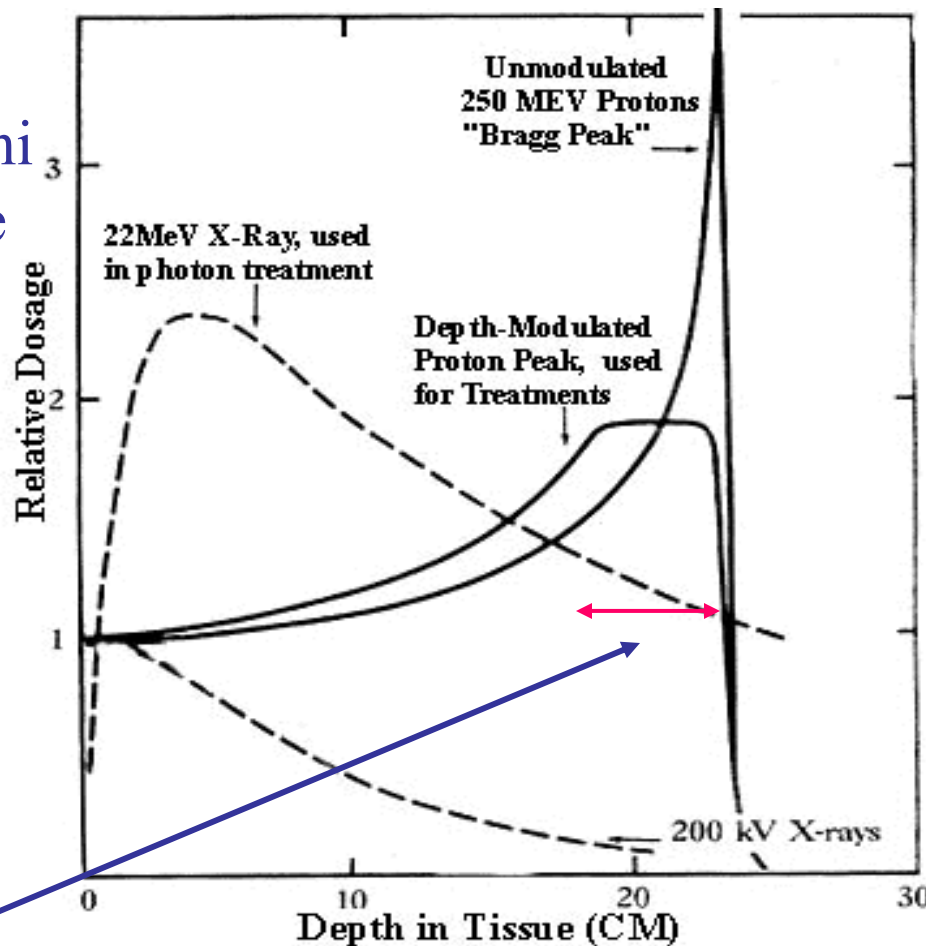


vantaggio dei protoni
(adroni) per tumori
profondi:
cervello, base del
collo, prostata

Modulazione della dose

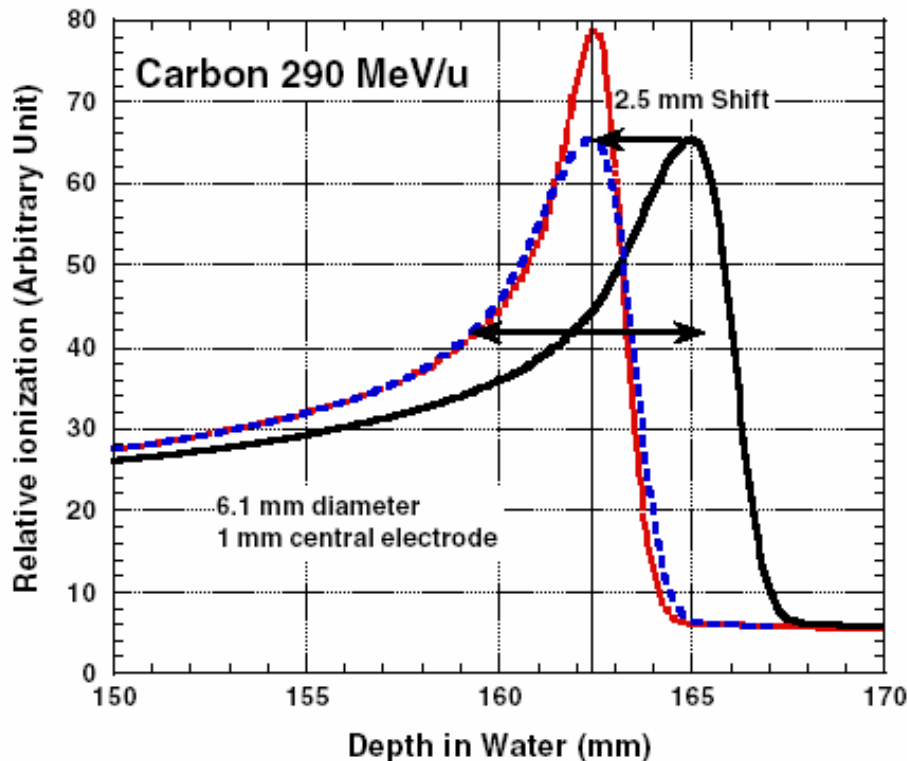
dalla sovrapposizione di picchi vicini (energie simili), viene ricavato il profilo “conformazionale”

il paziente viene ruotato in modo da evitare una forte esposizione dei tessuti circostanti

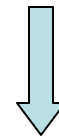


dimensioni della parte da trattare

Carbon beam





profilo di deposito
analogo a quello dei
protoni ma maggiore
deposito di energia
per unità di lunghezza

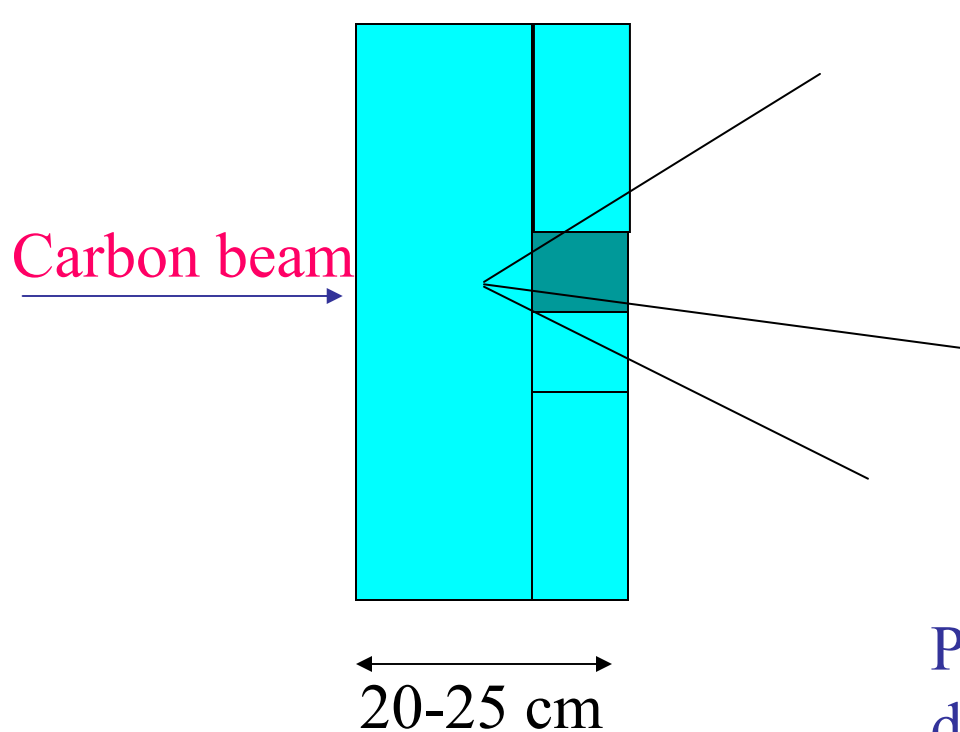


una ionizzazione
ogni ~ 10nm
(elica DNA ~ 2nm)

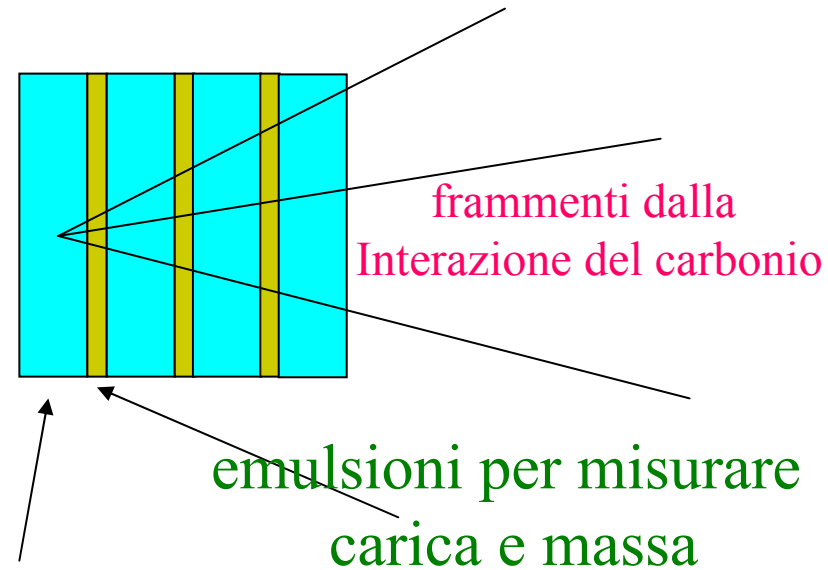
Figure 2. Simulated depth dose distribution measured by a PTW30001 cylindrical chamber. Dotted curve shows the result of the simulation for PTW30001. Solid curve is the measured depth dose distribution measured by a parallel plate ionization chamber, Markus.

Radiazione secondaria: frammentazione

 Tessuti sani
 zona da trattare



Simulare il corpo umano



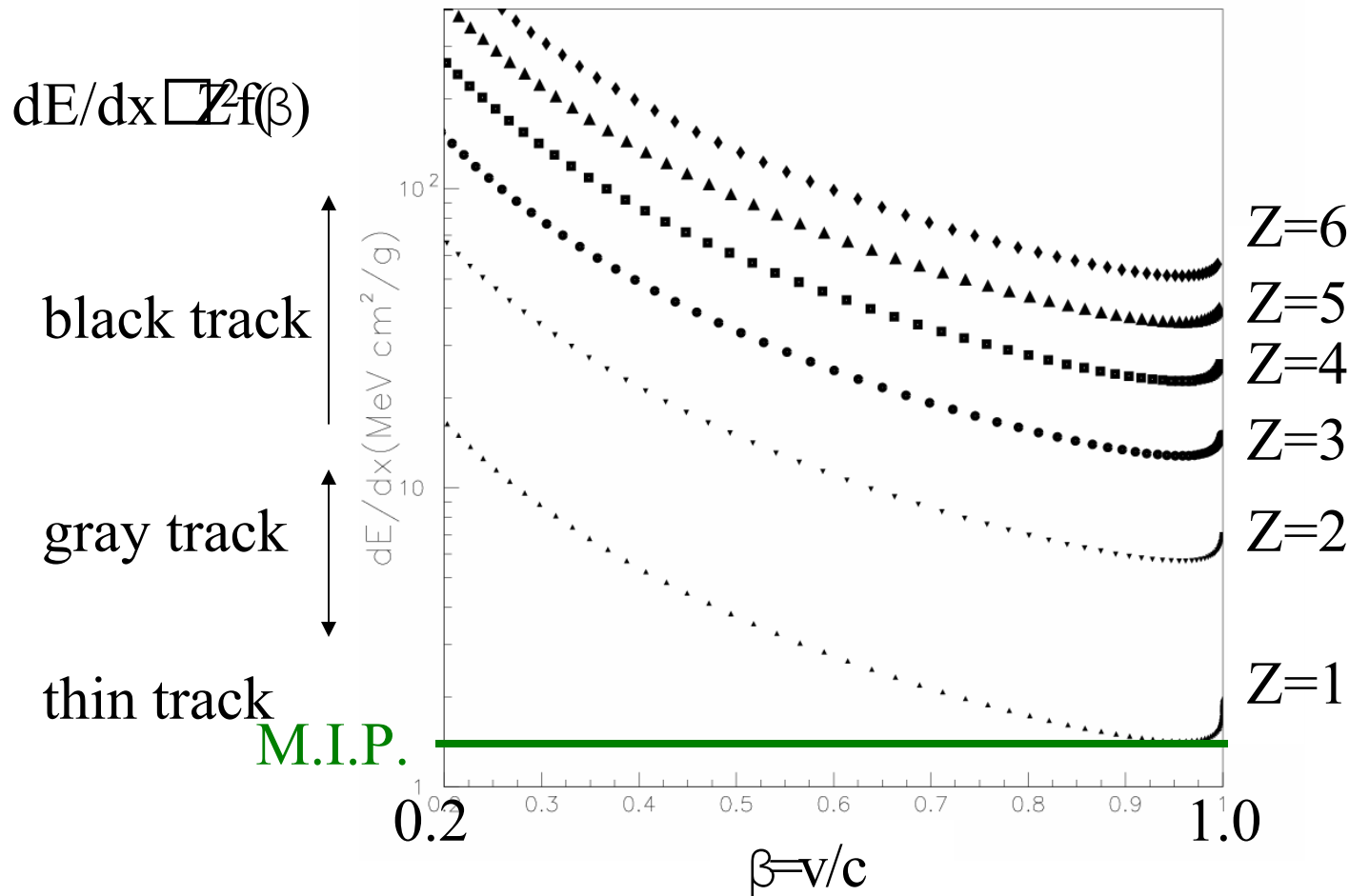
Plastica: stessa densità
dell'acqua (corpo umano)

Misura di carica e massa

- *La densità di grani lungo la traccia è $\propto Z^2$*
- *La diffusione angolare consente di ricavare $p\beta$*
- *Dalla misura combinata, noto β , ricavo p e quindi la massa*
- *Processo iterativo (β può essere misurato)*
- *(A, Z) determina la natura dello ione*

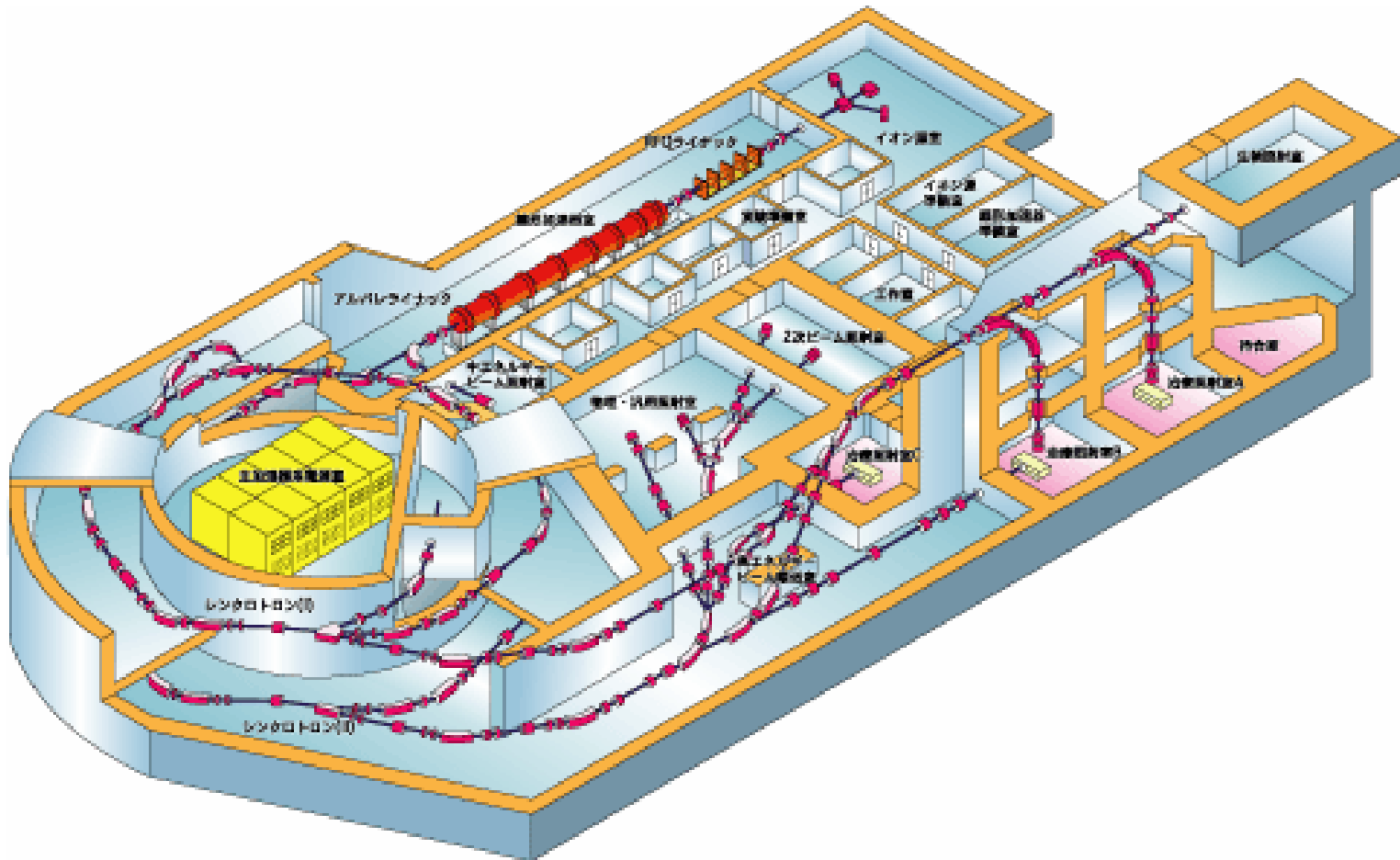
dE/dx in emulsion

Calculated by
Bethe-Bloch equation



HIMAC

(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)



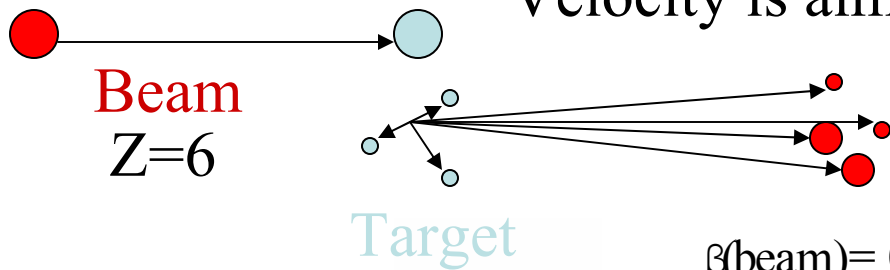
Max. 800MeV/u

Treatment for cancer by heavy ion

Diameter 40m, Synchrotron

dE/dx in emulsion

Velocity is almost conserved in fragmentation.

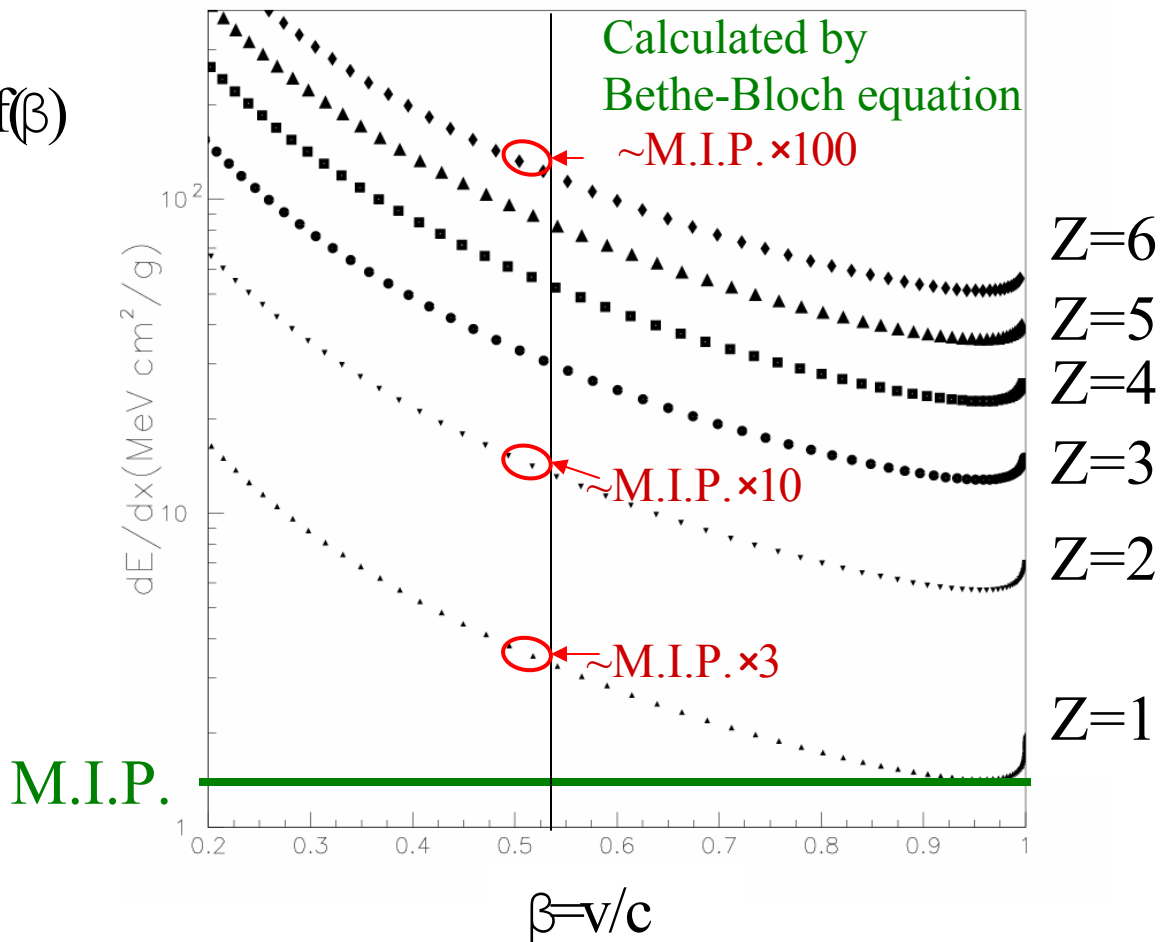


$$\beta(\text{beam}) \sim \beta(\text{fragment})$$

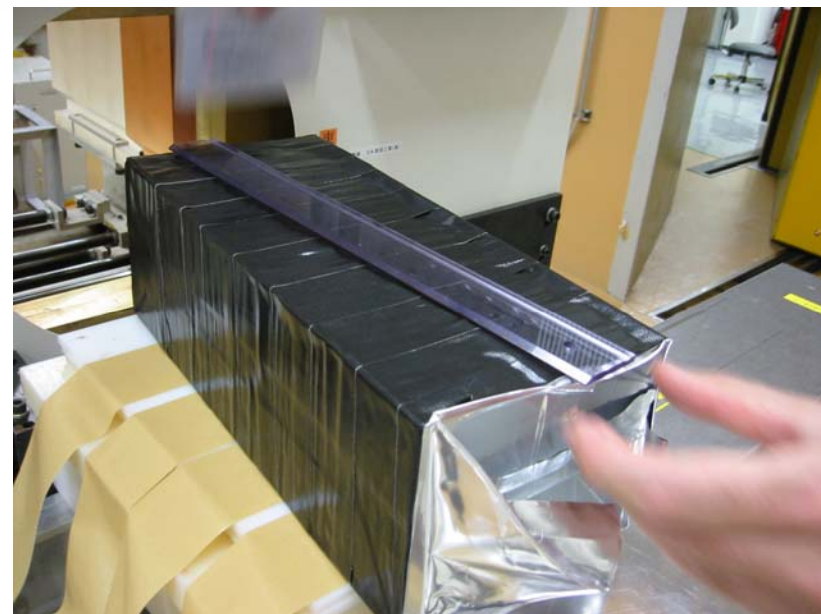
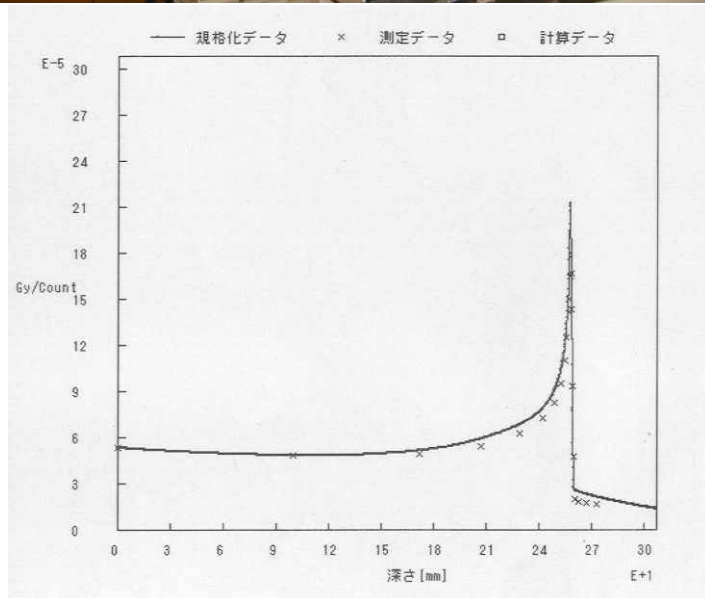
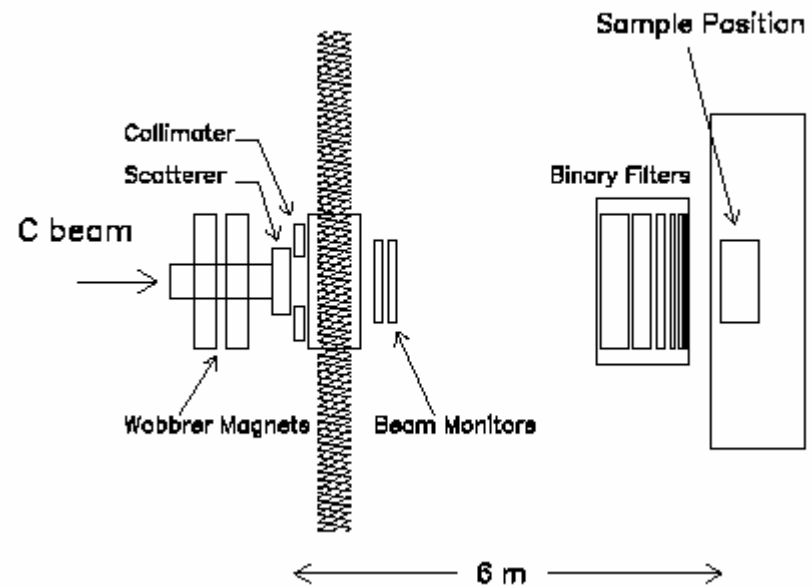
mainly Z=1, Z=2

$$\beta(\text{beam}) = 0.54$$

$$dE/dx \propto Z^2 f(\beta)$$



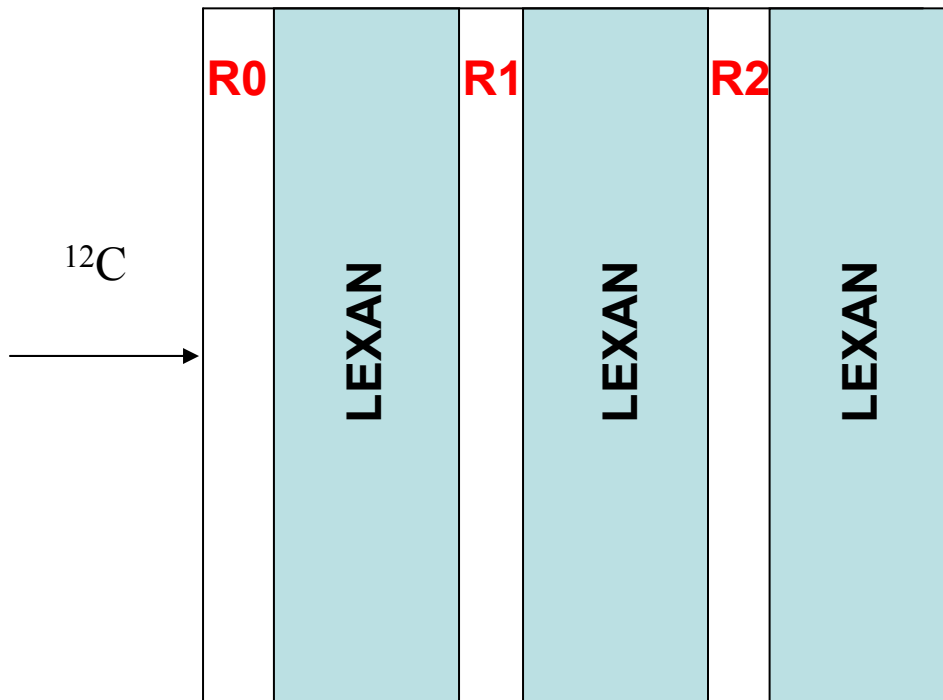
Esposizione a NIRS (Chiba)



Exposure of an ECC to 350 Mev/u Carbon ions at NIRS

ECC structure: 219 emulsions and 219 Lexan (C₅H₈O₂) target sheets ($\rho = 1.15 \text{ g/cm}^3$) 1 mm thick (73 consecutive “cells”)

Cell structure

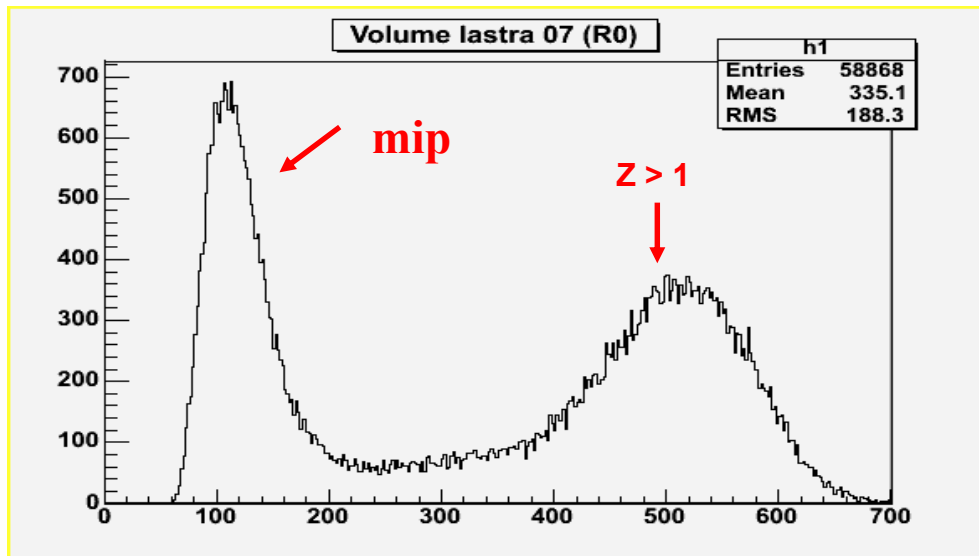


***R0:** sheet normally developed after the exposure*

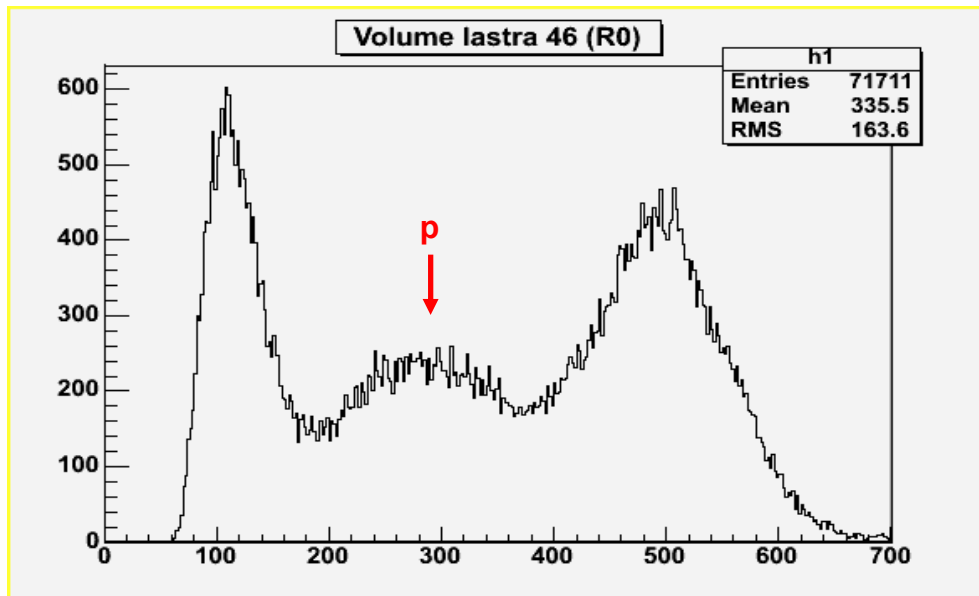
***R1:** sheet refreshed after the exposure (3 days, 30°C, 98% R.H.)*

***R2:** sheet refreshed after the exposure (3 days, 38°C, 98% R.H.)*

Ionizzazione (singola lastra – R0)

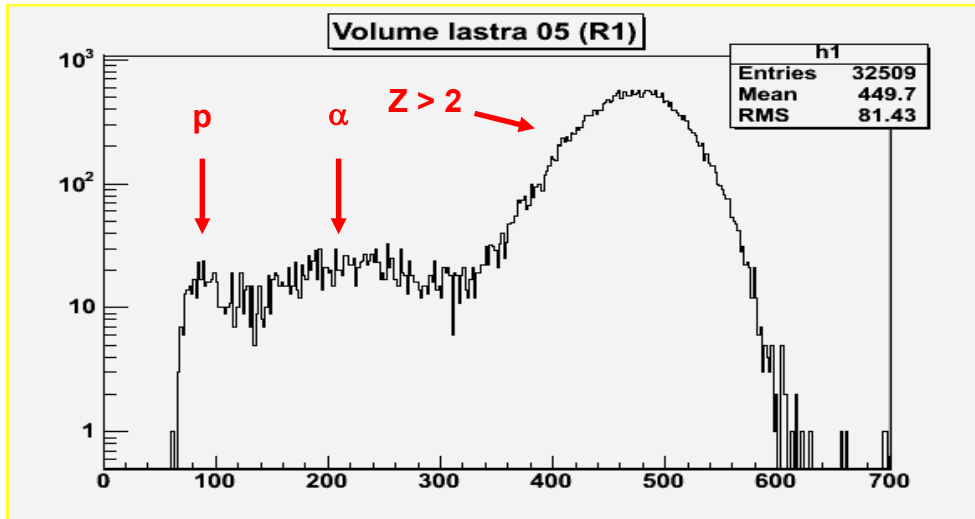


Upstream sheet

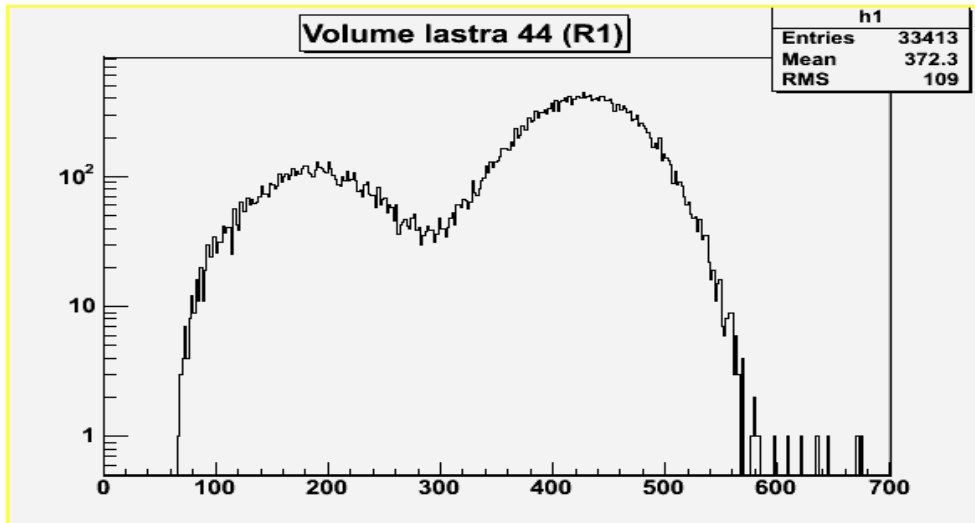


*Downstream sheet
(about 5 cm)*

Ionizzazione (singola lastra – R1)

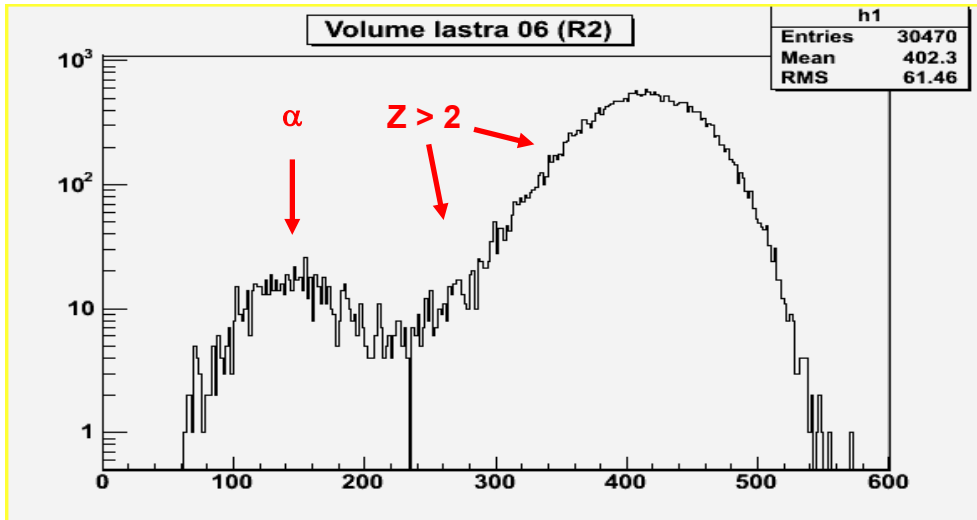


Upstream sheet

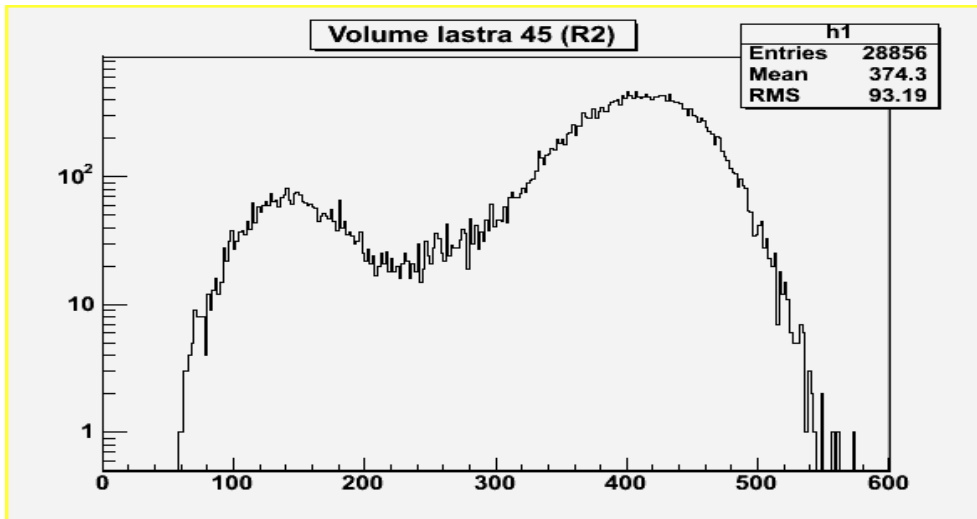


*Downstream sheet
(about 5 cm)*

Ionizzazione (singola lastra – R2)

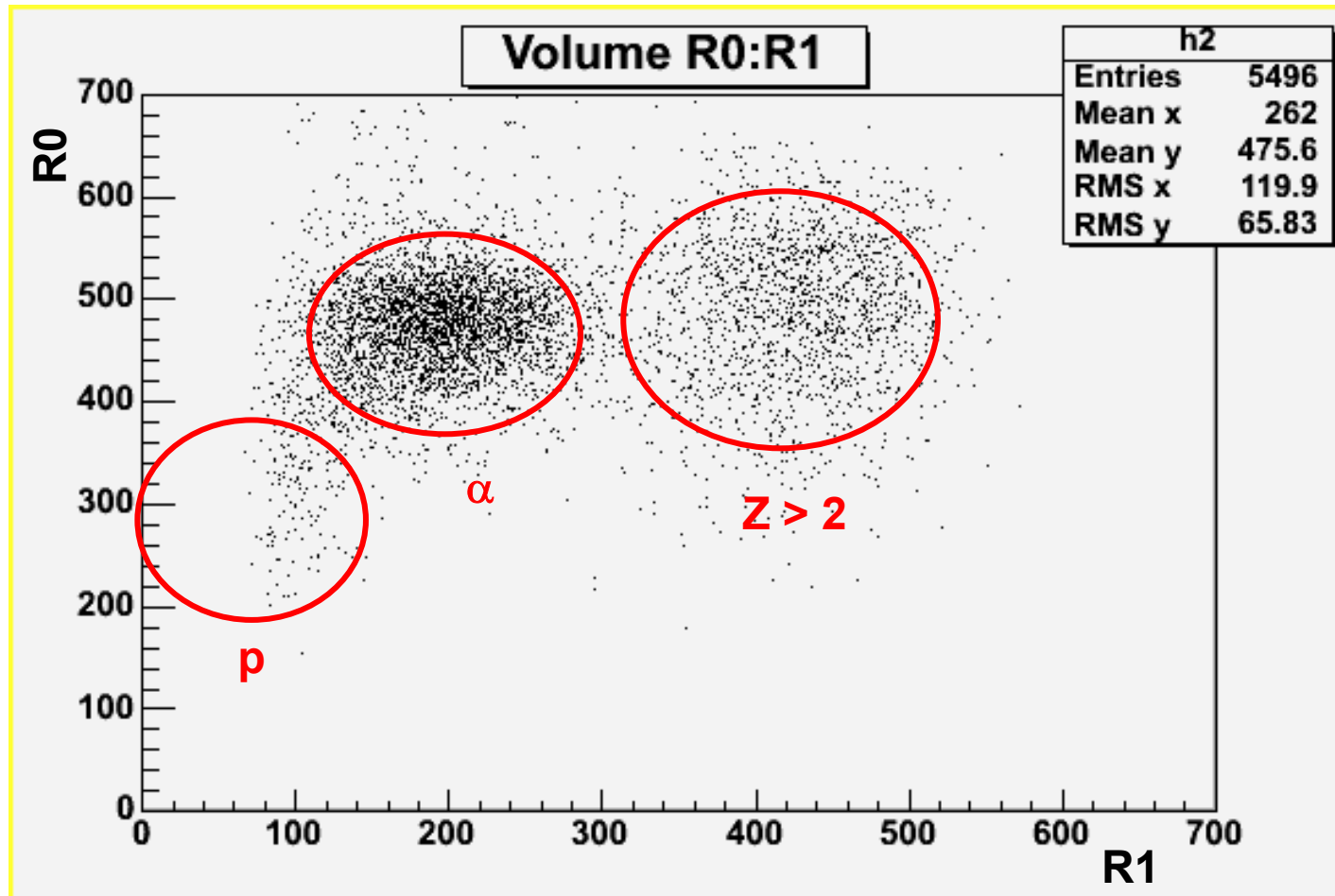


Upstream sheet

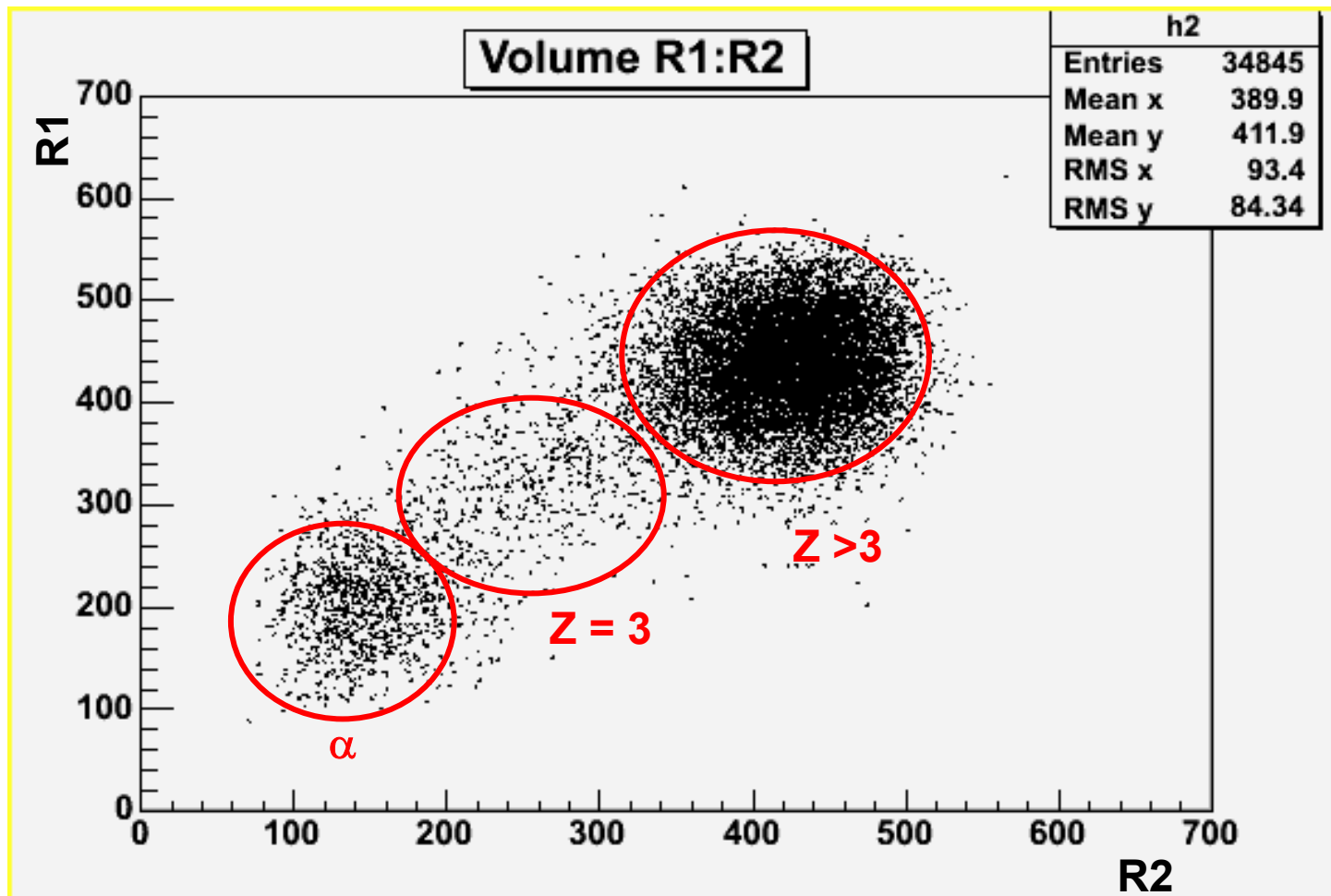


*Downstream sheet
(about 5 cm)*

Ionizzazione (tre lastre – R0 versus R1)



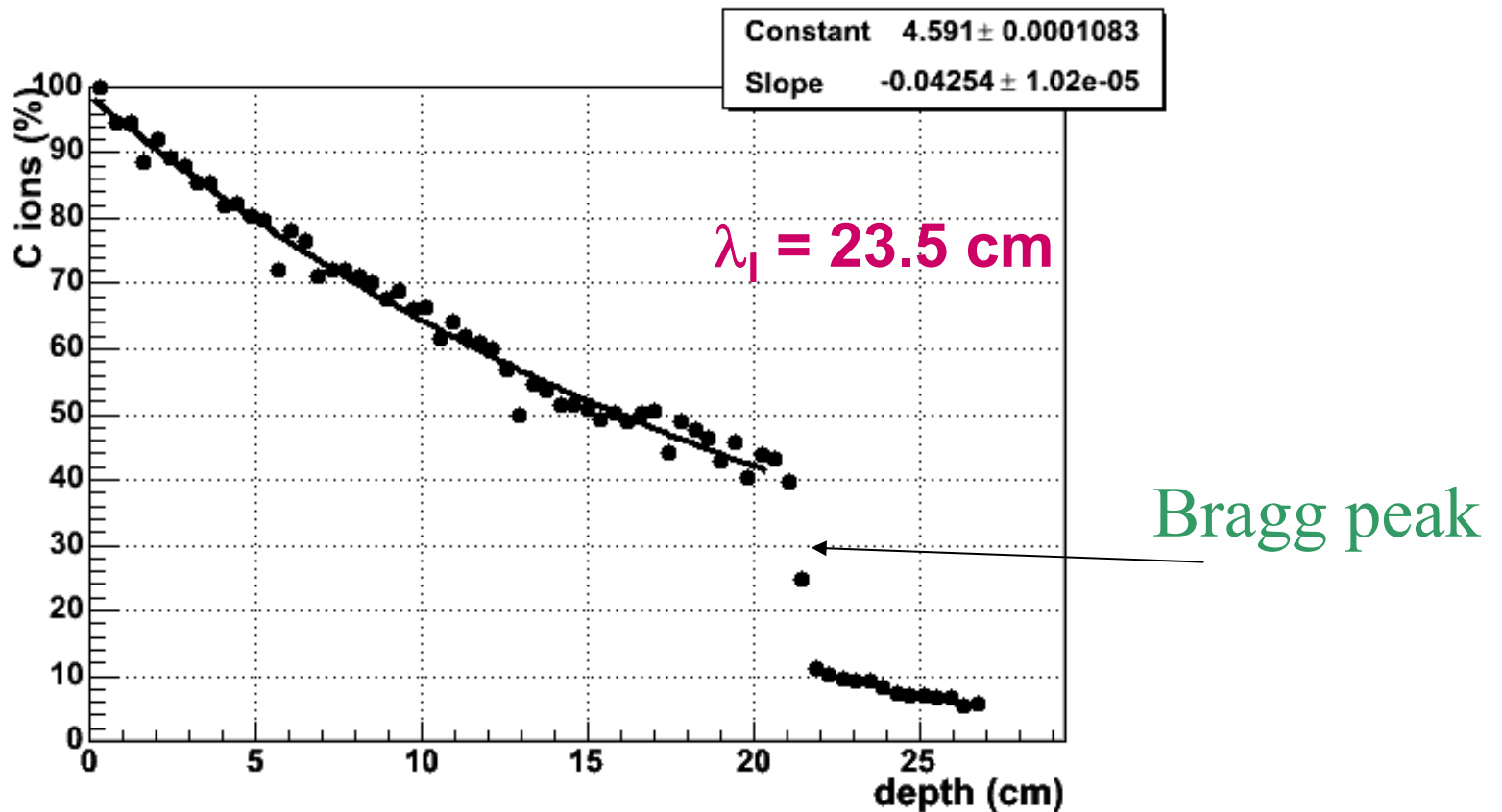
Ionizzazione (tre lastre – R1 versus R2)



C ions density

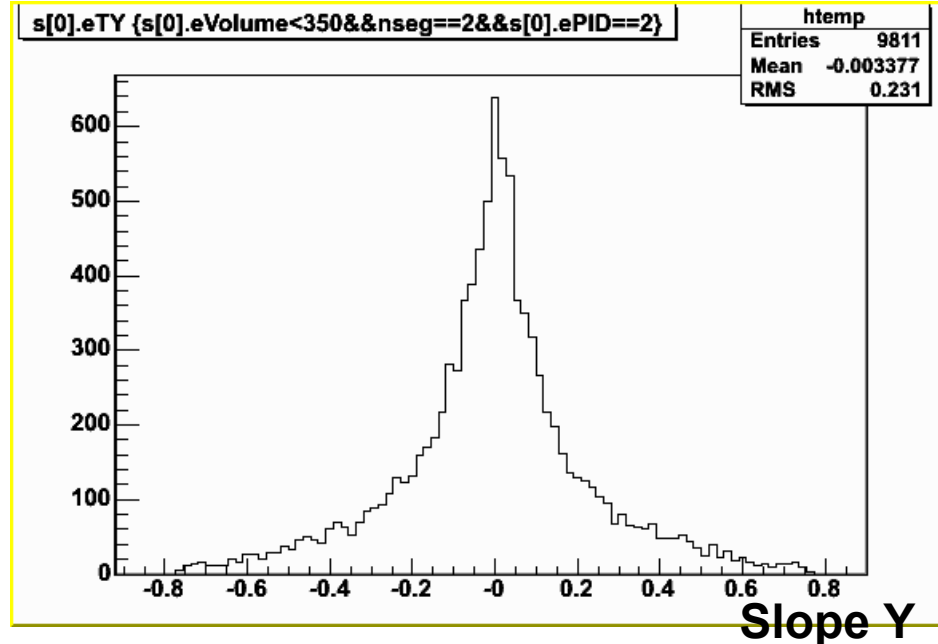
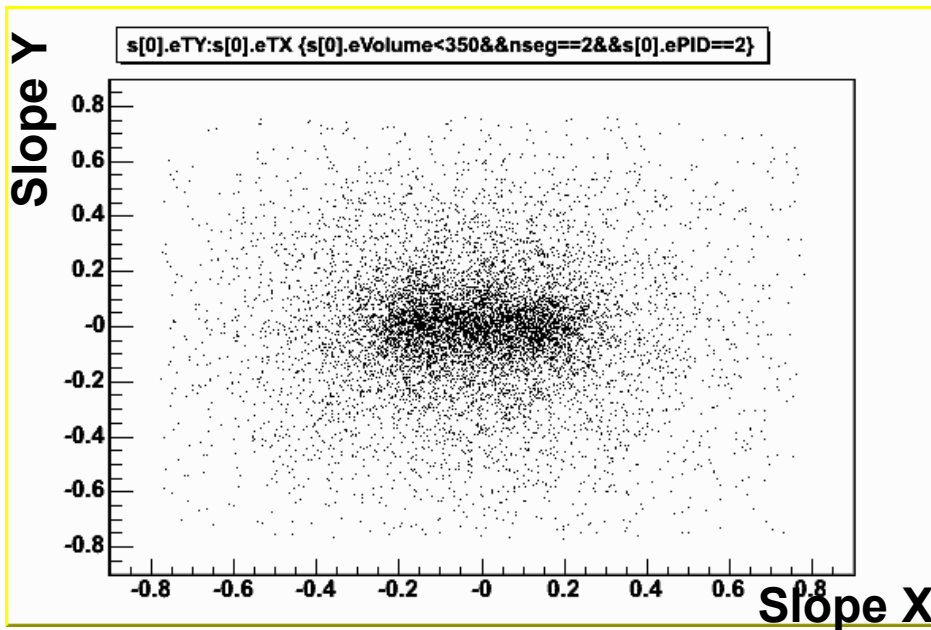
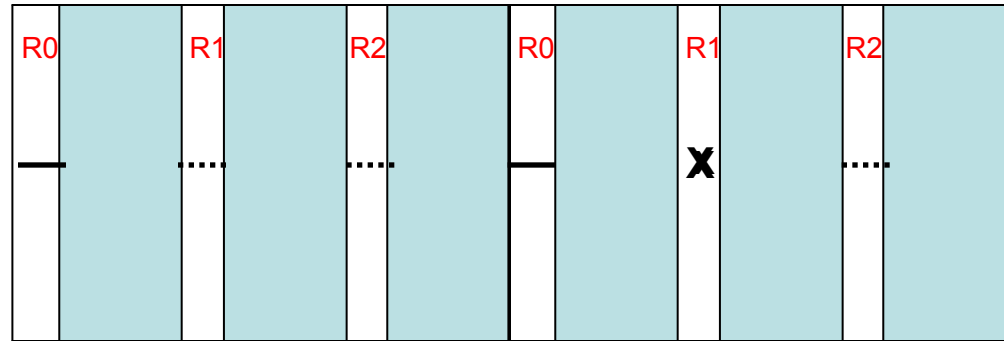
Volume(R2) > 300

Peak angular regions (3 σ) sigma accounts for the scattering



Proton identification

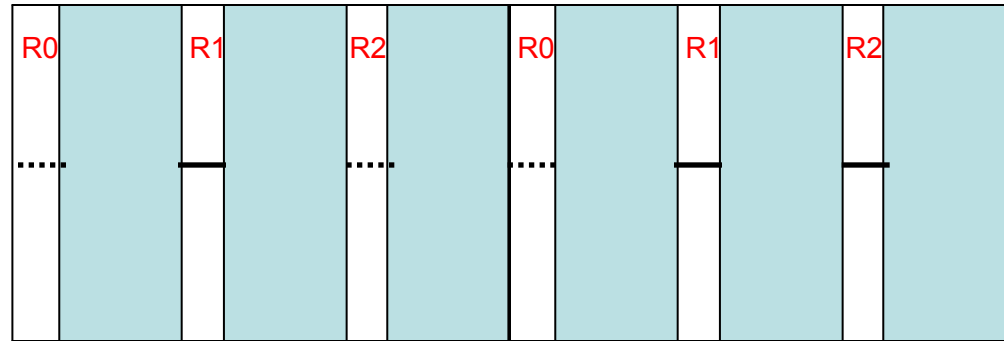
Consider a sequence R0-R0-R1, look for tracks found in both R0 with **200 < Volume < 350** and not found in R1



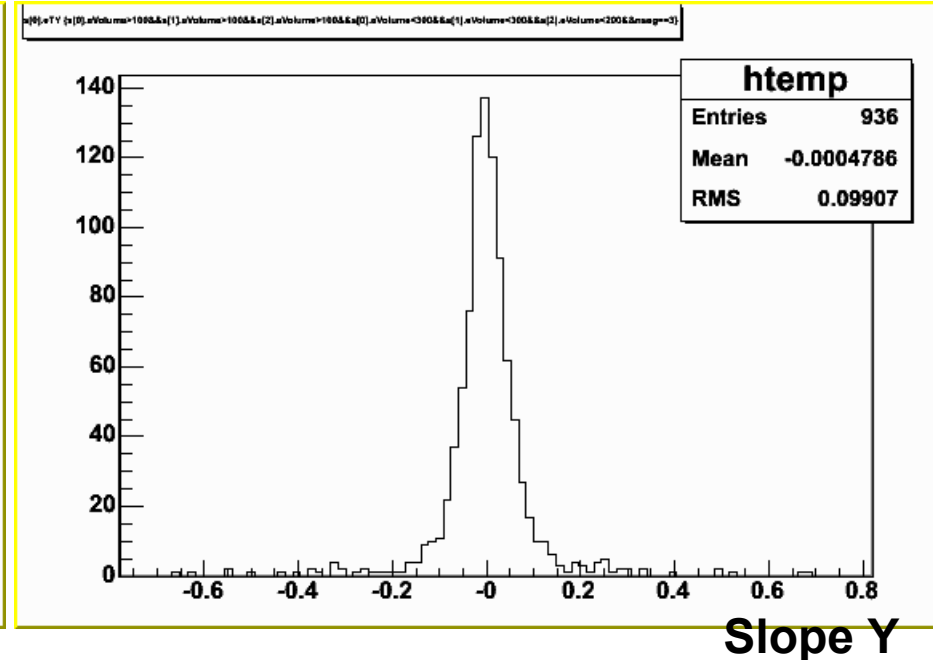
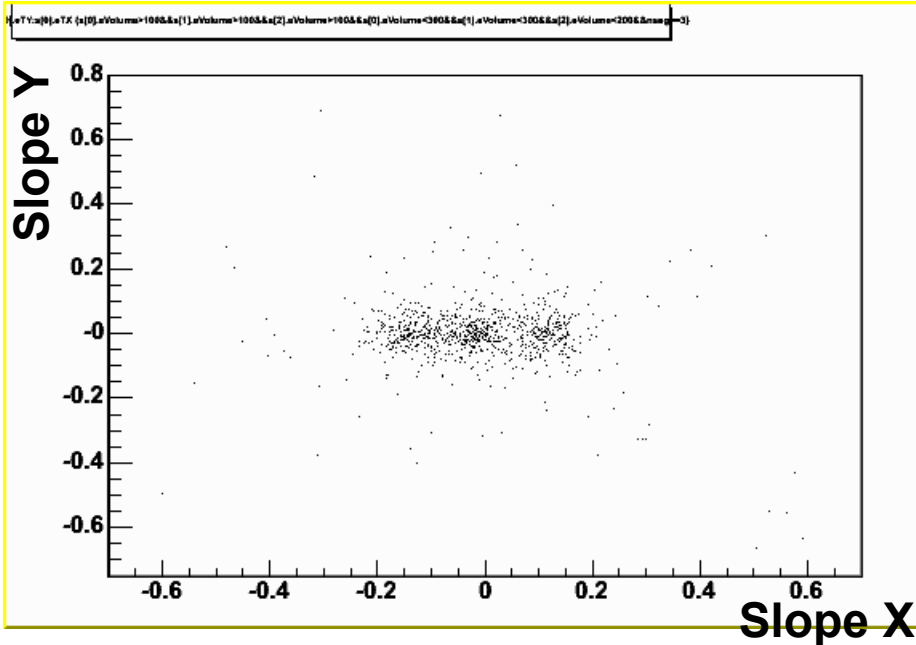
Angolo di deflessione

α identification

Consider a sequence R1-
R1-R2, look for tracks
found in the three plates
with **100 < Volume**
(R1) < 300 and **100 <**
Volume (R2) < 200



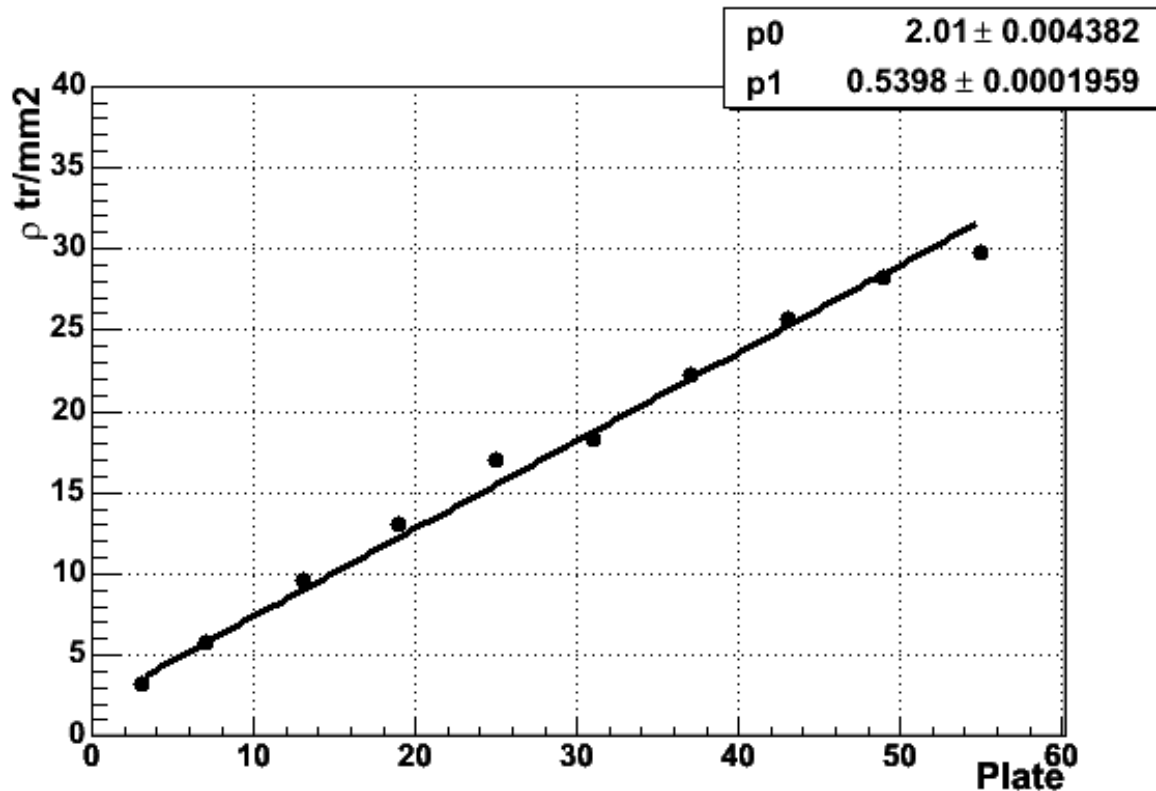
Angolo di deflessione



proton density

In sequences R0R0R1 $200 < \text{Volume}(R0) < 300$

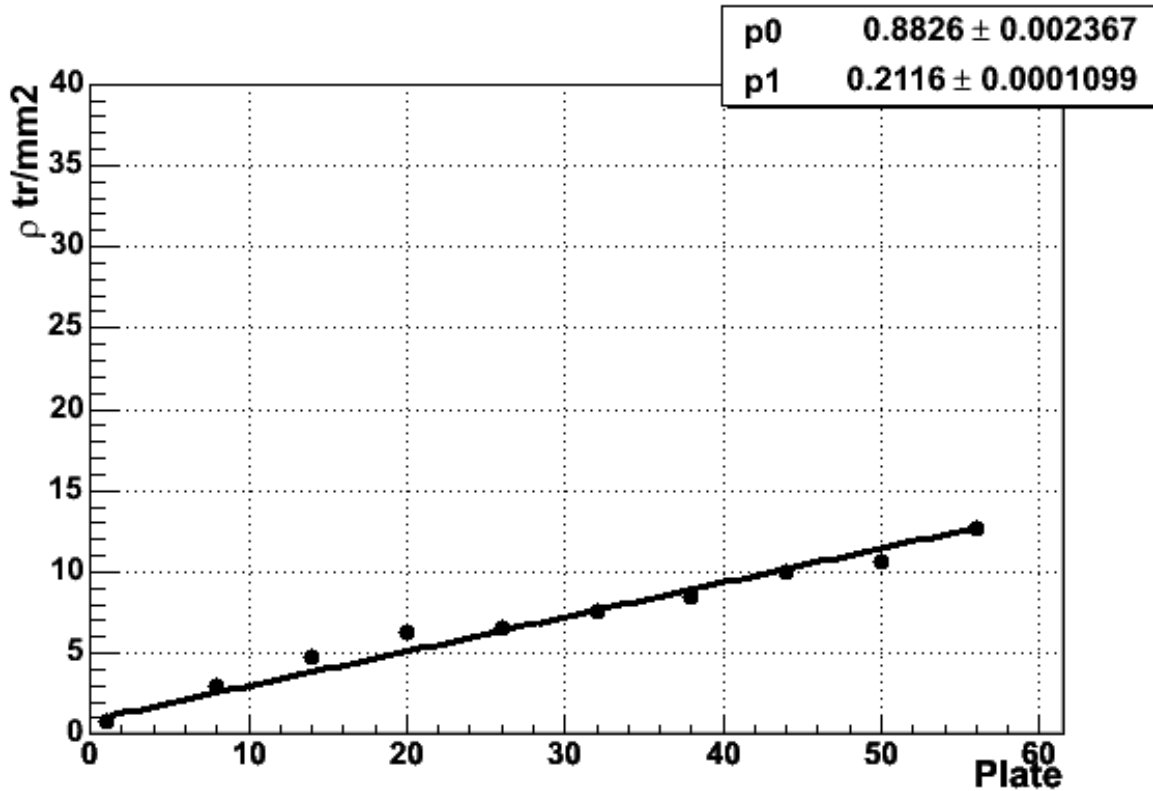
(if track is present in R1) $\text{Volume}(R1) < 150$



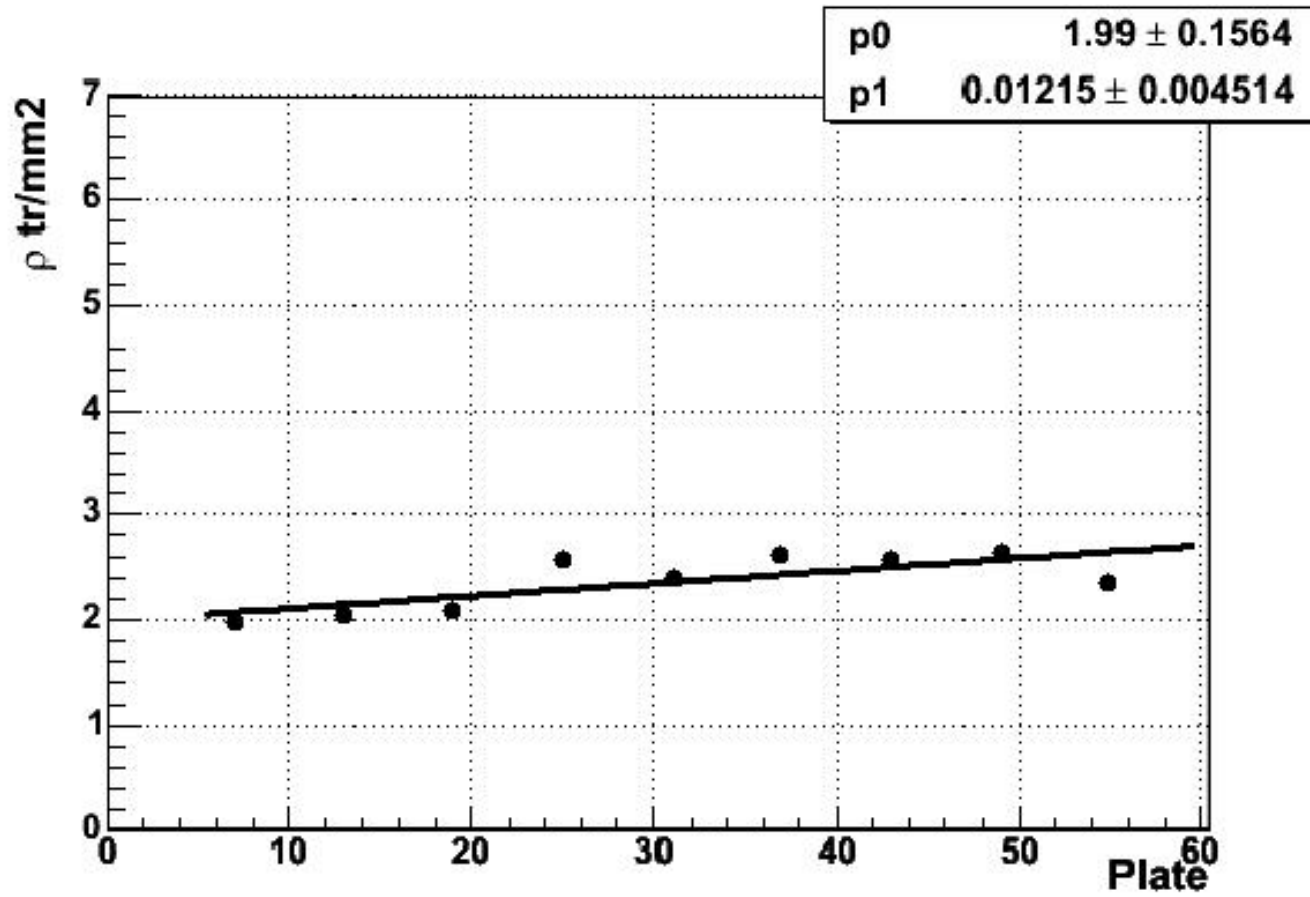
α density

In sequences R1R1R2 $100 < \text{Volume}(R1) < 300$

(if track is present in R2) $\text{Volume}(R2) < 200$



p/α



Conclusioni

- *Revival della tecnica delle emulsioni nucleari dovuta all'automazione completa delle procedure di scansione*
- *Incomparabile risoluzione in posizione*
- *Misure cinematiche*
- *Possibili applicazioni alla biofisica nella caratterizzazione della radiazione per la terapia oncologica*
- *Risultati preliminari molto promettenti*