

**Radiazione nella materia,  
principi di rivelazione e  
rivelatori di particelle elementari:  
rivelatori per neutrini**

M. Sioli  
Lezioni di Astrofisica Nucleare e Subnucleare  
CdL Astronomia  
AA 2004/05

# Caratteristiche principali di un rivelatore di neutrini

- Grandi dimensioni: sezione d'urto piccolissima ( $10^{-44}$  -  $10^{-38}$  cm<sup>2</sup>), e flussi molto bassi (es.  $10^{-13}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>sr<sup>-1</sup> per  $\nu$  atm)
- Ottimo schermaggio da radiazione ambientale e cosmica (generalmente sono esperimenti sotterranei)
- Richiesta ottima reiezione del fondo, in genere predominante (rapporto segnale/rumore massimo possibile)

# Outline di questa panoramica sui rivelatori di neutrini

- Mostriamo: prima principio di rivelazione, poi tecnica di rivelazione ed infine esempio di implementazione.
- Faremo un riassunto molto limitato e non esaustivo sui rivelatori di neutrini attualmente esistenti.
- Non tutti i rivelatori sono estremamente massivi: short baseline, ricerche “esotiche” ...

# Emulsioni nucleari

---

Ancora forniscono la migliore risoluzione spaziale (<1mm).

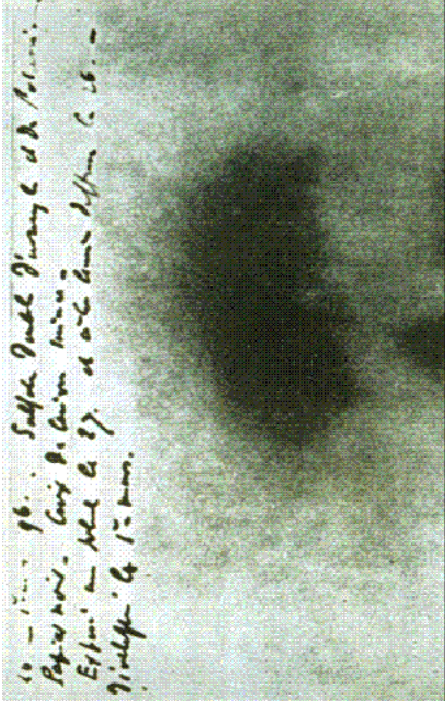
Hanno una grande importanza per la rivelazione di vertici e decadimenti di particelle con breve vita media

Sono composte da micro-cristalli di Aliduro di Argento (AgBr) dispersi in una matrice gelatinosa.

L'energia rilasciata dalla particella ionizzante produce un'immagine latente la quale, mediante un apposito sviluppo, si riduce ad argento metallico.

Alla fine del trattamento chimico, il passaggio della particella ionizzante diviene visibile come una sequenza di grani di argento del diametro di circa 0.8  $\mu\text{m}$  in size.

# Le emulsioni nucleari vengono utilizzate dai fisici da oltre 60 anni



## 1896: radioattività

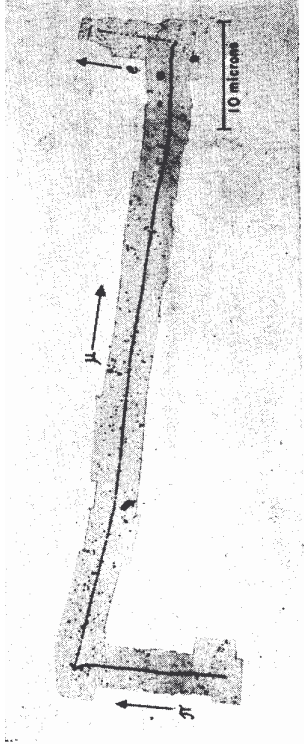
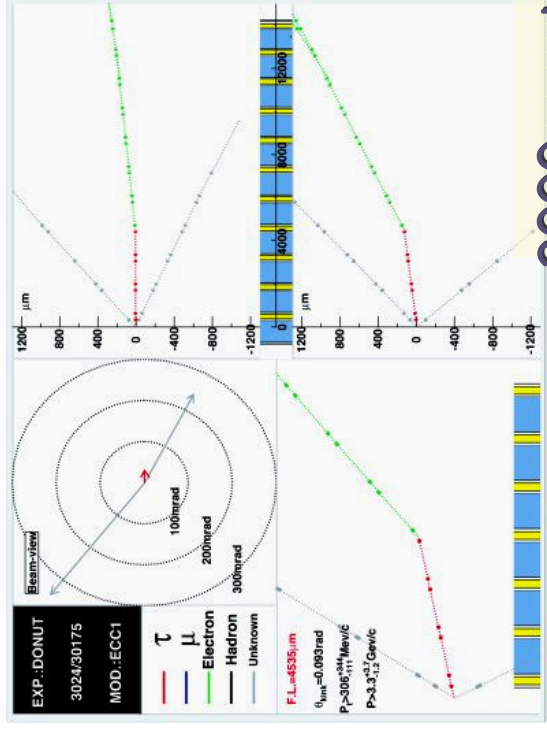


Fig. 4.8.2. Mosaic of microphotographs showing a  $\pi \rightarrow \mu + e$  decay. Kodak NT4 electron-sensitive emulsion. From Brown *et al.* (BRH49.2).

## 1947: decadimento del pione



## 2000: neutrino del tau

# Precisione intrinseca

**Grain Size**

0.2  $\mu\text{m}$

(original crystal)

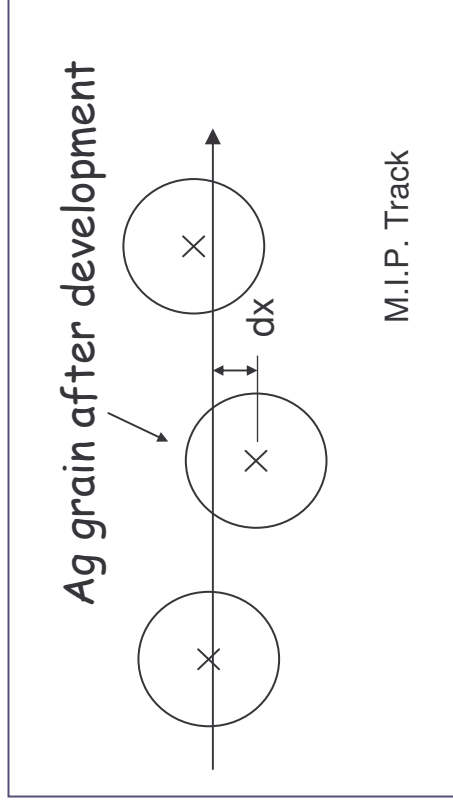
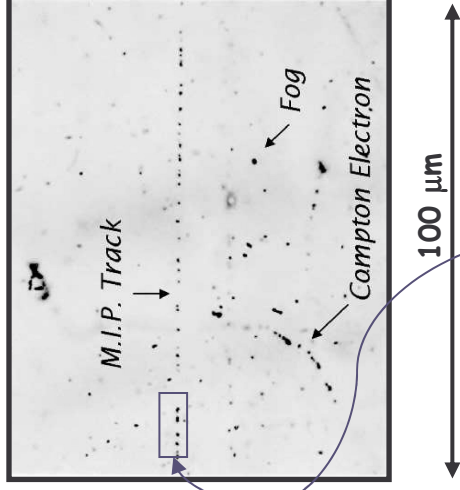


development process



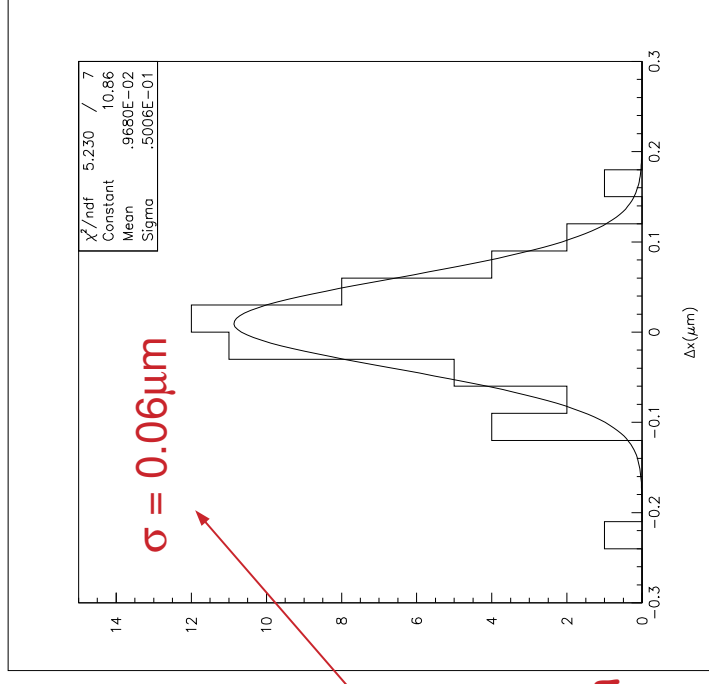
0.8  $\mu\text{m}$

(visible at microscope)

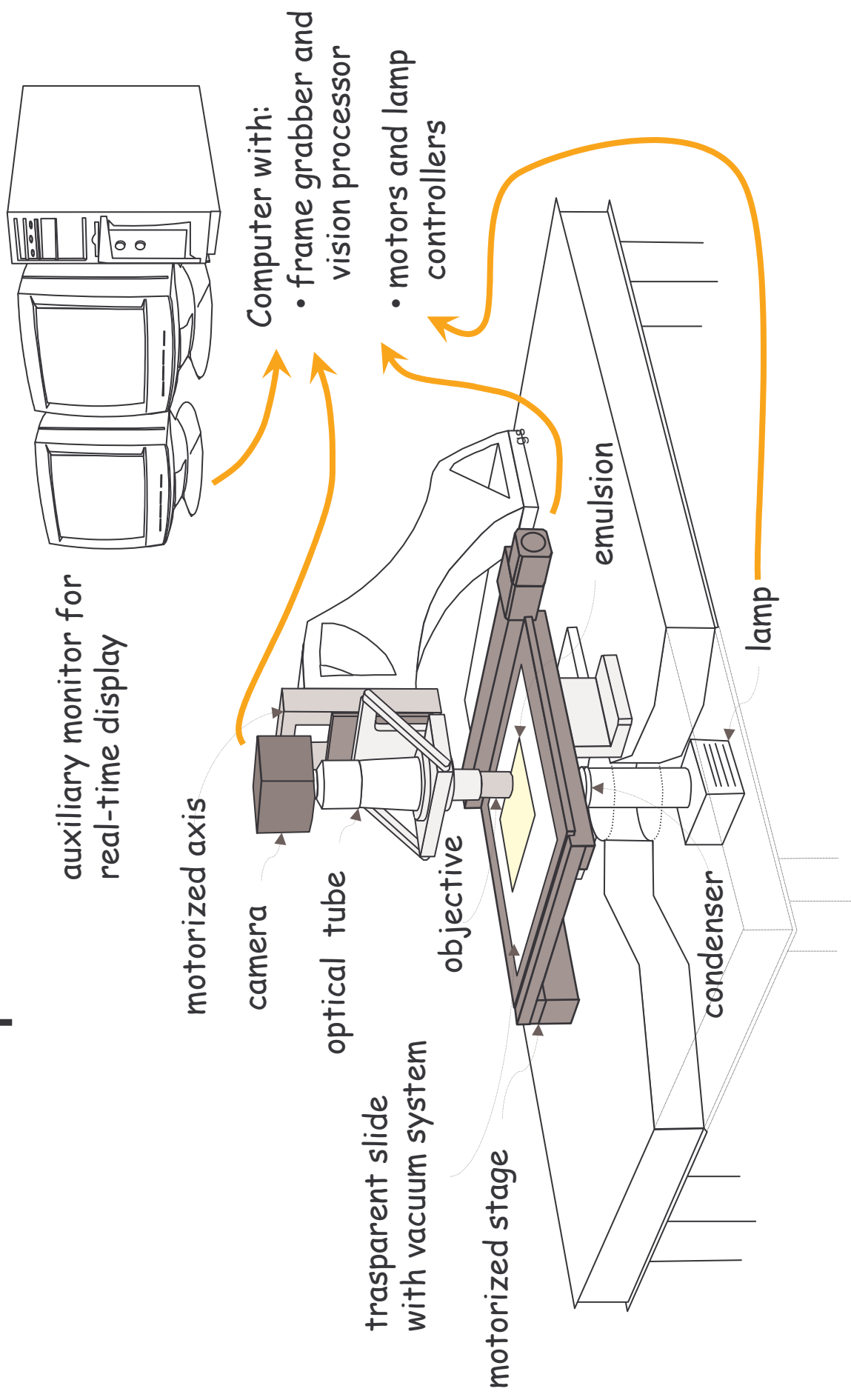


$$\frac{0.2 \mu\text{m}}{\sqrt{12}} = 0.06 \mu\text{m}$$

**intrinsic spatial resolution**



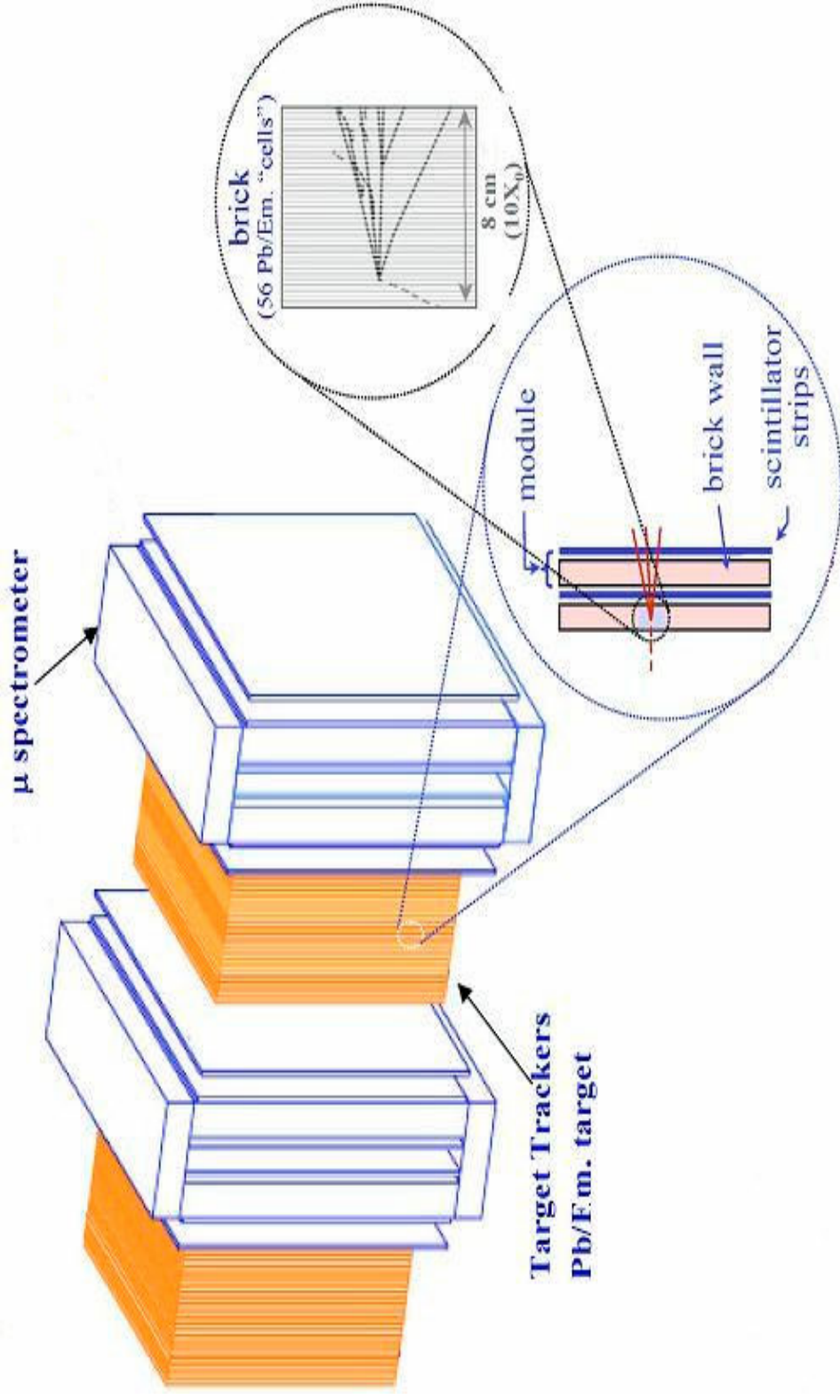
# Sistema di scanning completamente automatico



# Esempio di rivelatore che utilizza emulsioni: OPERA al Gran Sasso (esperimento “su fascio”)

**Rivelatore ibrido** (rivelatori elettronici + emulsioni)

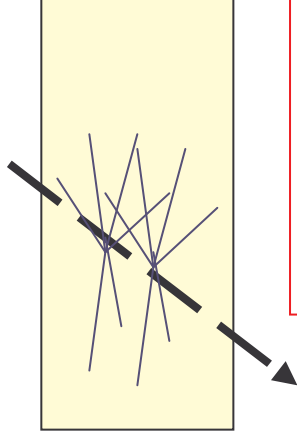
**Massa totale = 1.8 tonnellate, circa 200000 « mattoni »**





# Rivelatori a scintillazione

Una particella carica, attraversando uno scintillatore, perde energia eccitando gli atomi del materiale. Questi ultimi, diseccitandosi, emettono luce visibile



Tipi di scintillatori

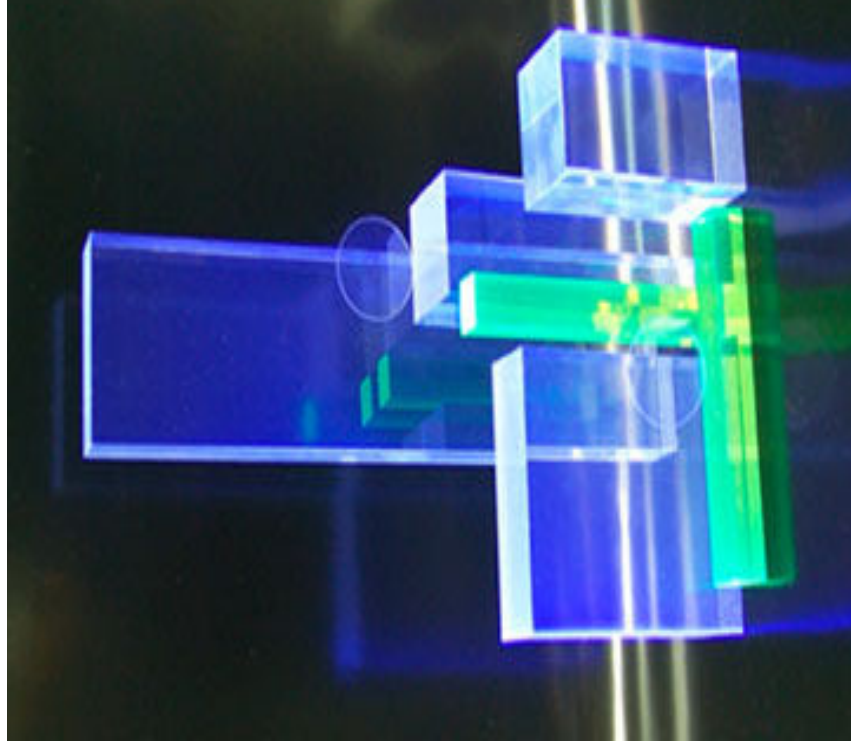
## ❑ Scintillatori inorganici (NaI, CsI ...)

sono cristalli ionici drogati con impurità

- alta efficienza di scintillazione  $1\gamma$  20-100 eV
- elevata densità (rivelatori compatti) 4-5 g/cm<sup>2</sup>
- tempi di emissione elevati (100-600 ns)
- possono essere igroscopici ed avere la risposta dipendente dalla temperatura

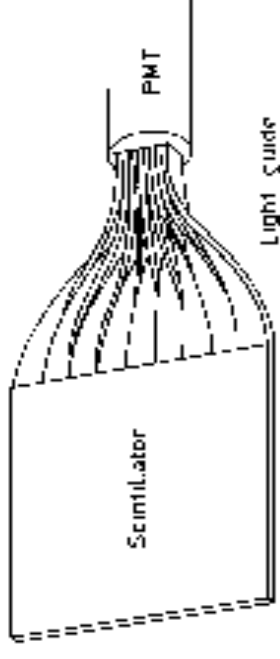
## ❑ Scintillatori organici (BC102, POPOP )

sono complesse molecole organiche in cui si ha emissione di luce UV in seguito all'eccitazione di livelli molecolari. Si aggiungono poi altre molecole (wave length shifter) per trasferire la luce nel visibile: tempi di emissione rapidi (2.5-10 ns) e minor risposta luminosa  $1\gamma$  400 eV



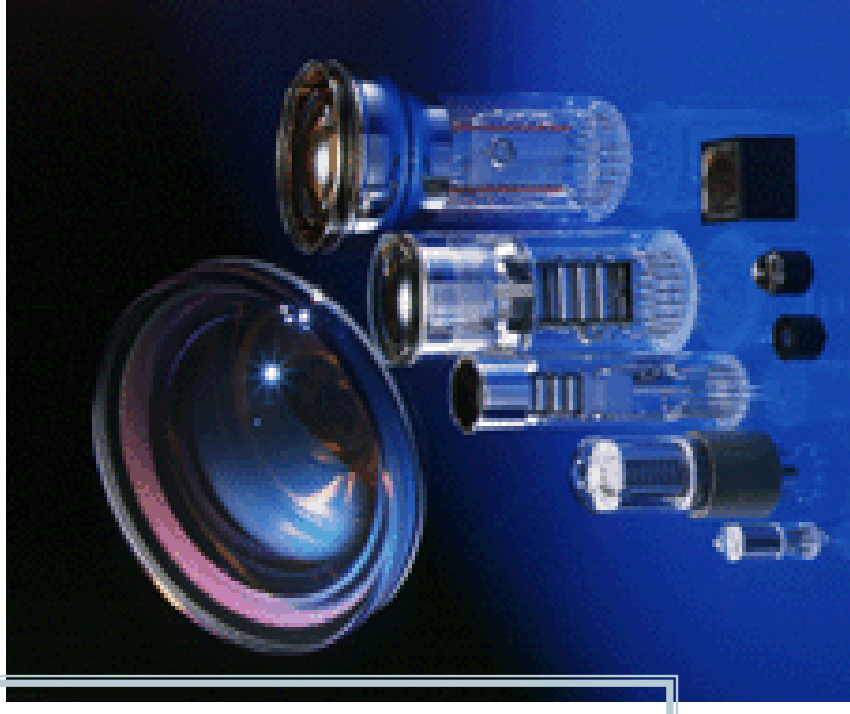
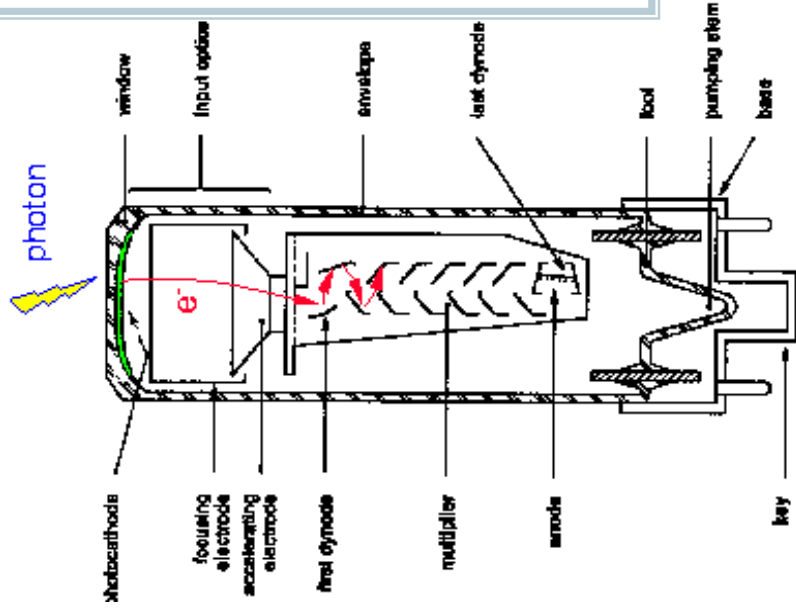
# Raccolta di luce e fotomoltiplicatori

In un rivelatore a scintillatore la luce visibile prodotta viene trasportata verso un apparecchio (**fotomoltiplicatore**, **photodiode**) che la converte in un segnale elettrico.



fotomoltiplicatore

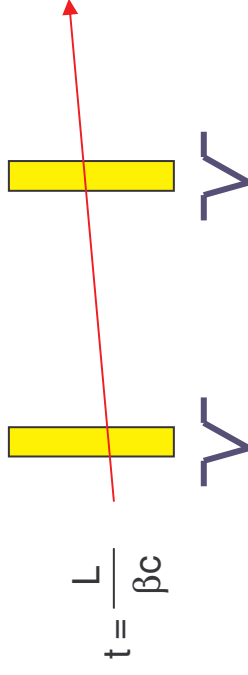
- Fotocatodo: vetro o quarzo con deposito di materiale FOTENSIBILE a basso potenziale di estrazione
- Efficienza quantica  $\epsilon_q = N_{p.e.}/N\gamma = 10-30\%$
  - Dinodi Estrazione secondaria  $K = 3-4$
  - Partitore divisore resistivo per applicare HV sui dinodi
  - Anodo raccolta segnale
  - $G \approx K^{N_{dinodi}}$

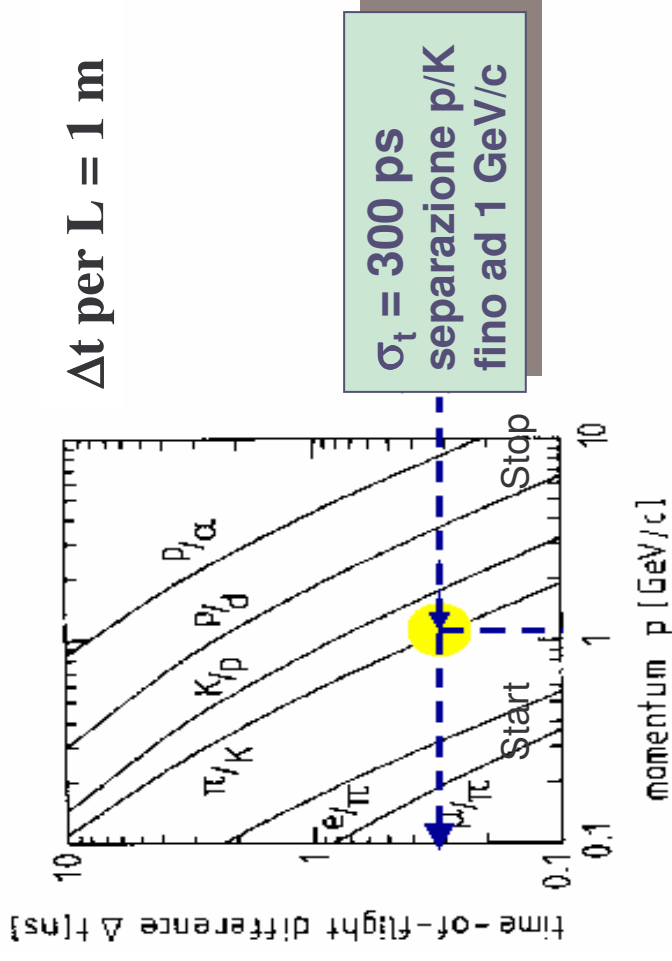


# Utilizzo degli scintillatori per la misura del tempo di volo

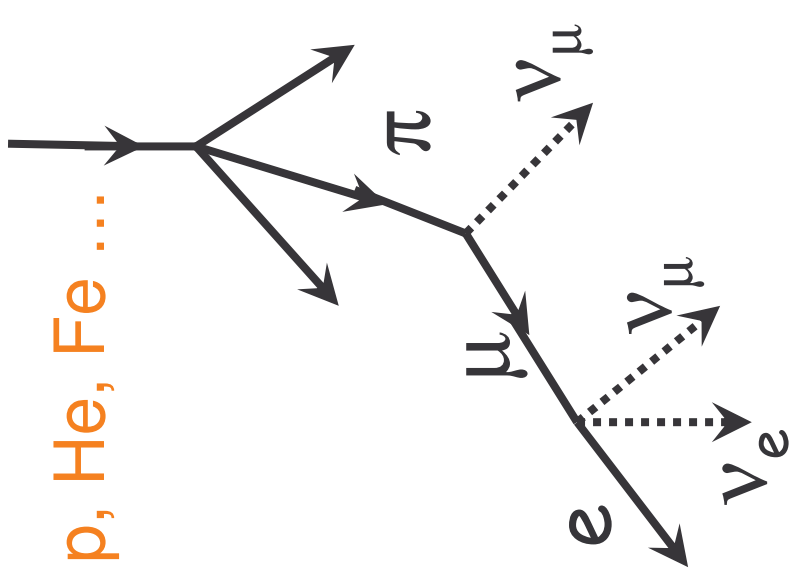
## Tempo di volo

Se si dispone di un rivelatore con buona risoluzione temporale e per tragitti ( $L$ ) della particella abbastanza elevati ....

$$t = \frac{L}{\beta c}$$




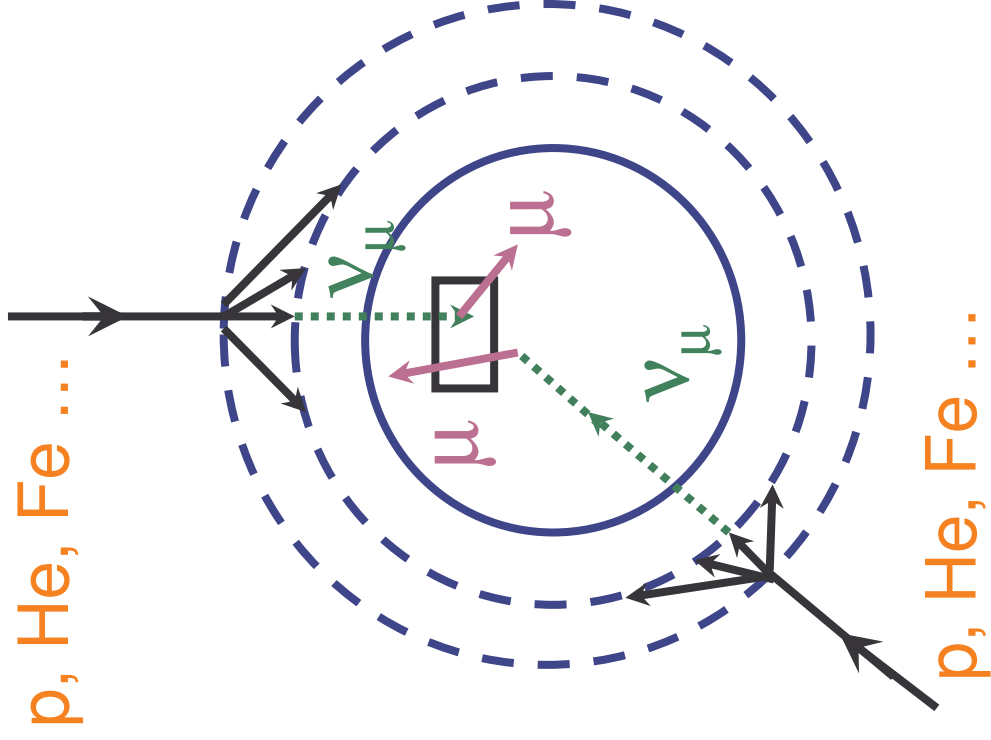
# Neutrini atmosferici



$E_{\nu}$ : 1 GeV  $\rightarrow$  300 GeV

$L$ :  $\sim 100$  km  $\rightarrow$  13000 km

$L/E_{\nu}$ : 30 km/GeV  $\rightarrow$  6000 km/GeV

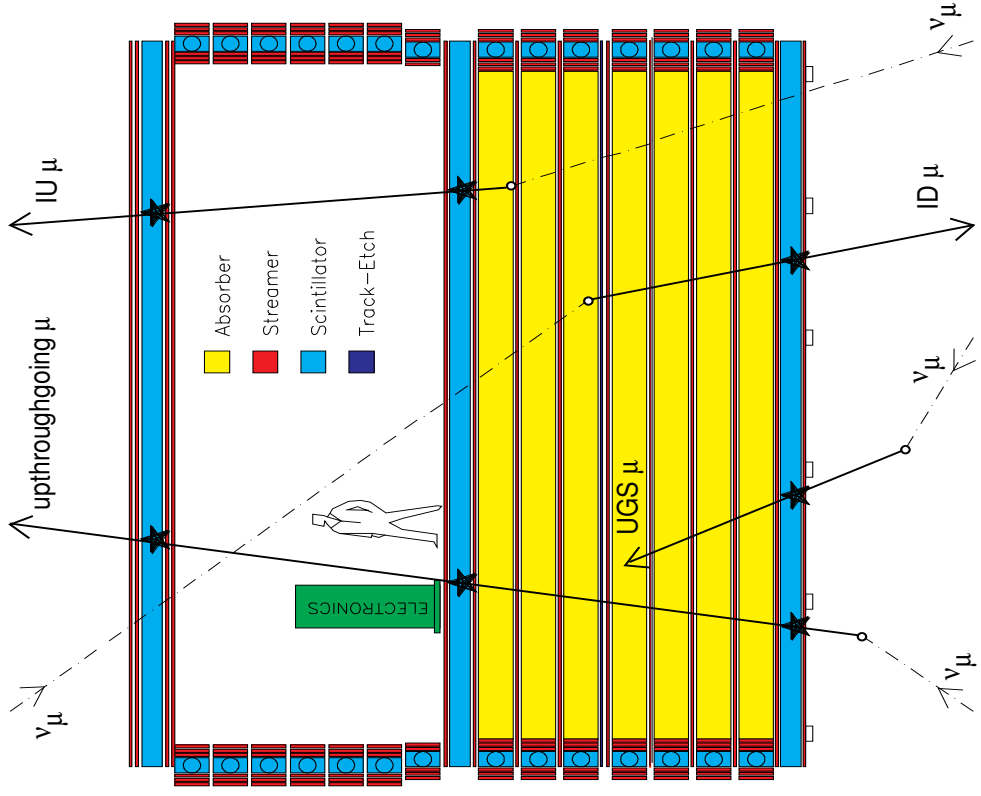


Downgoing  $\nu_{\mu}$ : sorgente vicina

Upgoing  $\nu_{\mu}$ : sorgente lontana

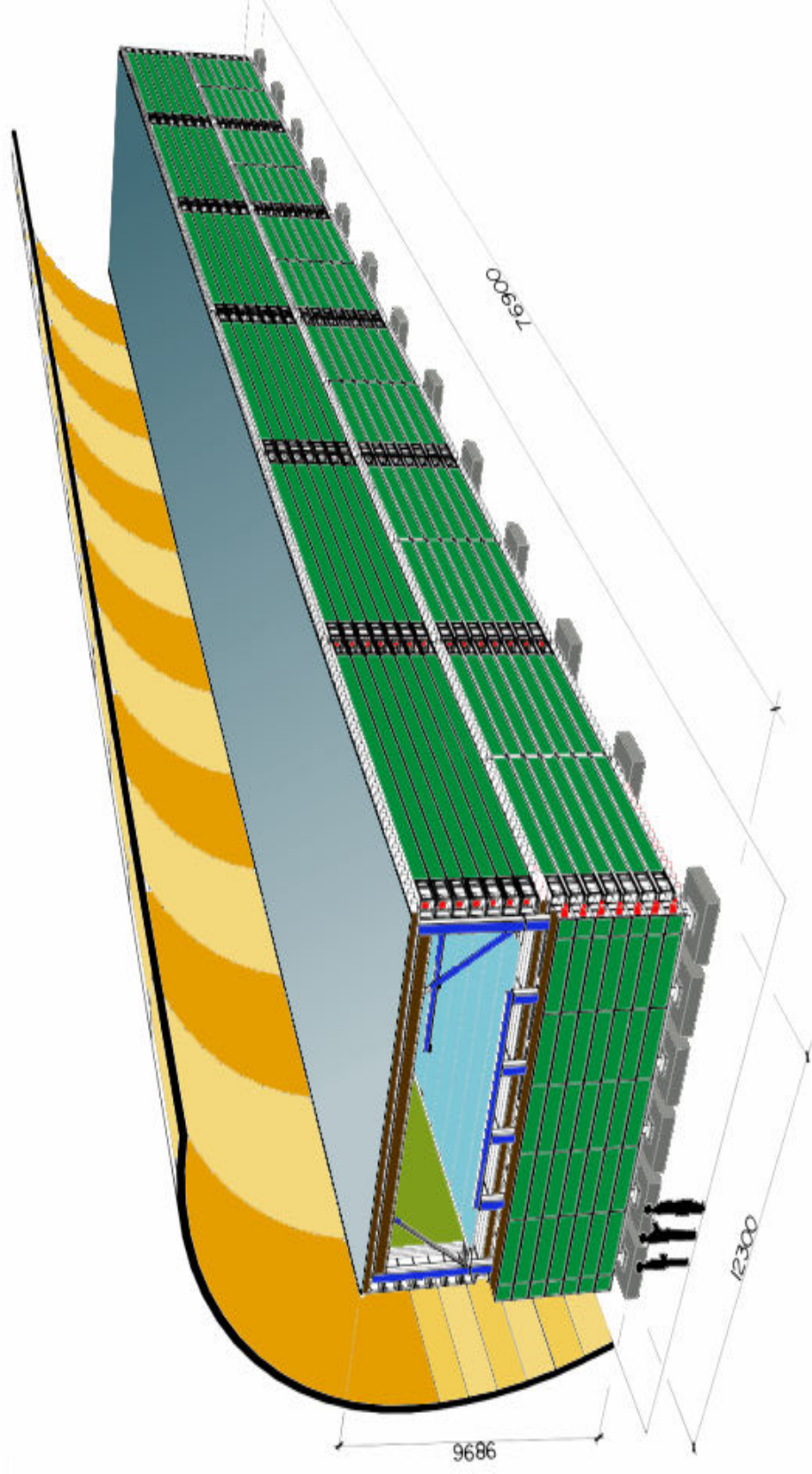
# Esempio: MACRO al Gran Sasso

---



MACRO al Gran Sasso  
(esperimento concluso nel 2000)

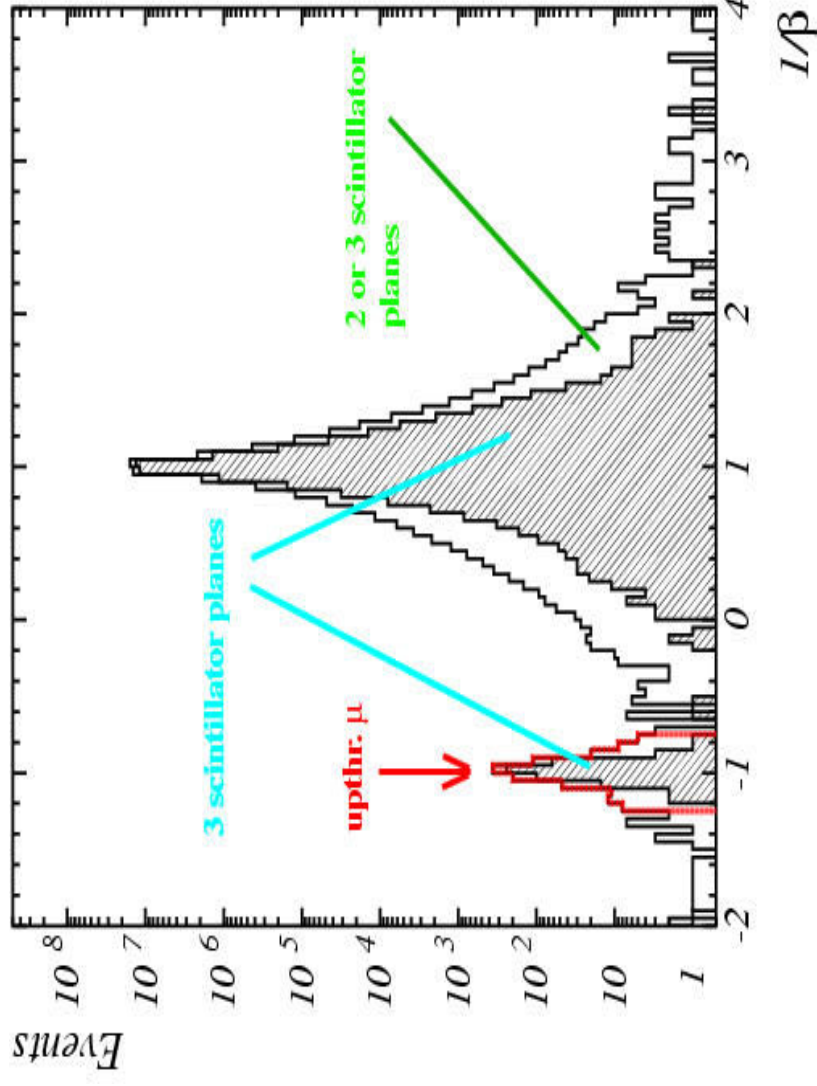
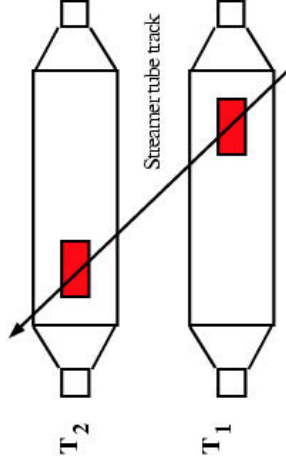




- Grande accettazione (~10000 m<sup>2</sup>sr per un flusso isotropo)
- Ottima reiezione fondo (~10<sup>-6</sup> del flusso superficiale)
- ~600 t di scintillatori liquidi (risoluzione temporale ~500 ps)
- ~20000 m<sup>2</sup> di tubi a streamer (risoluzione angolare < 1°)

# Muoni “passanti” ( $\langle E_n \rangle \sim 50 \text{ GeV}$ )

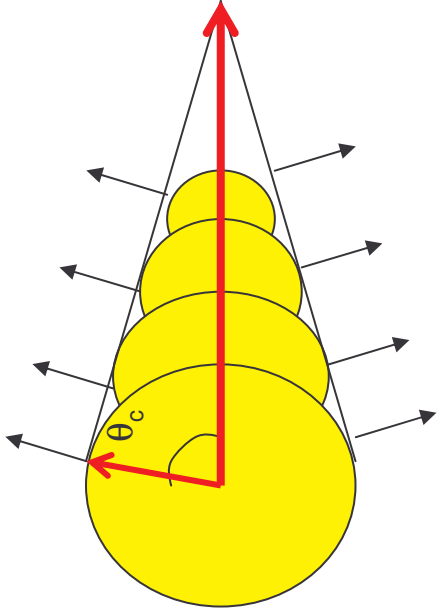
Tempo di volo :  $1/\beta = (T_1 - T_2) \cdot c / L =$    
 +1 down  $\mu$    
 -1 up  $\mu$



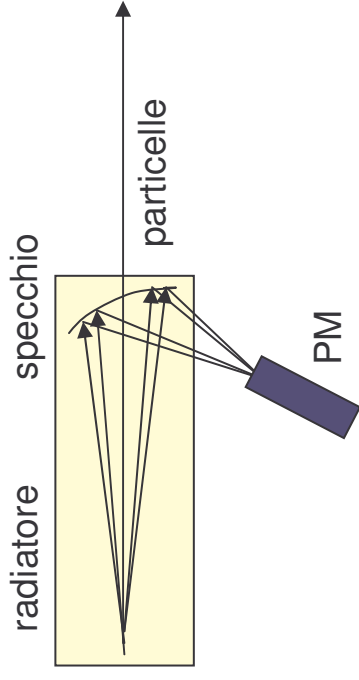
# Effetto Cherenkov

Effetto Cherenkov: le particelle cariche che avanzano in un materiale a velocità maggiore di quella della luce nel mezzo ( $\beta > 1/n$ ) producono della luce “veloce” per depolarizzazione del materiale.

fronte d'onda



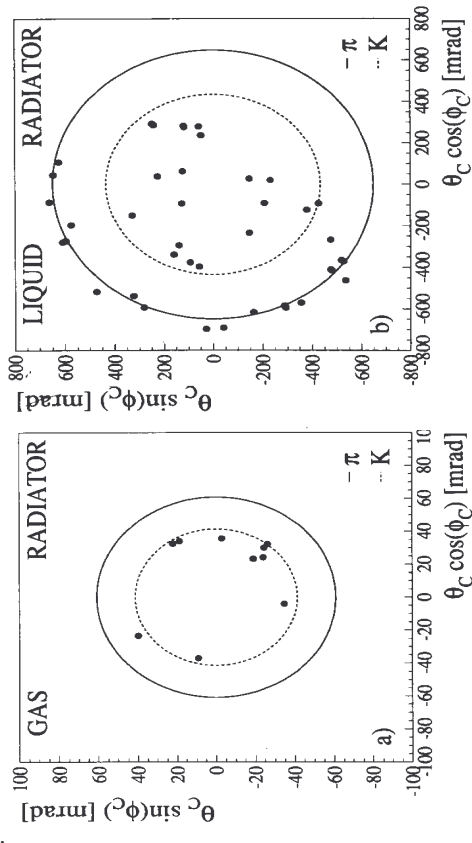
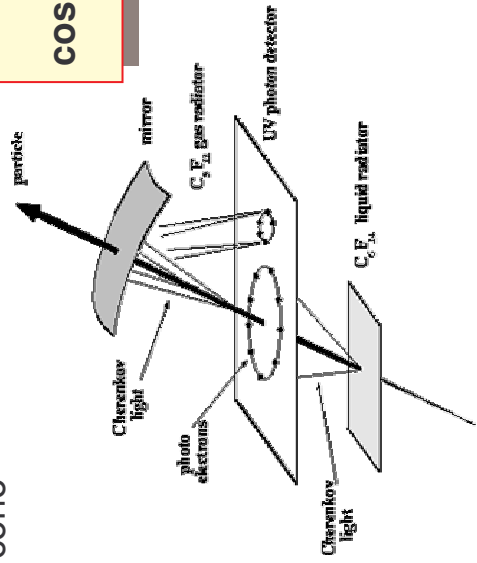
Cherenkov a soglia:



DELPHI RICH

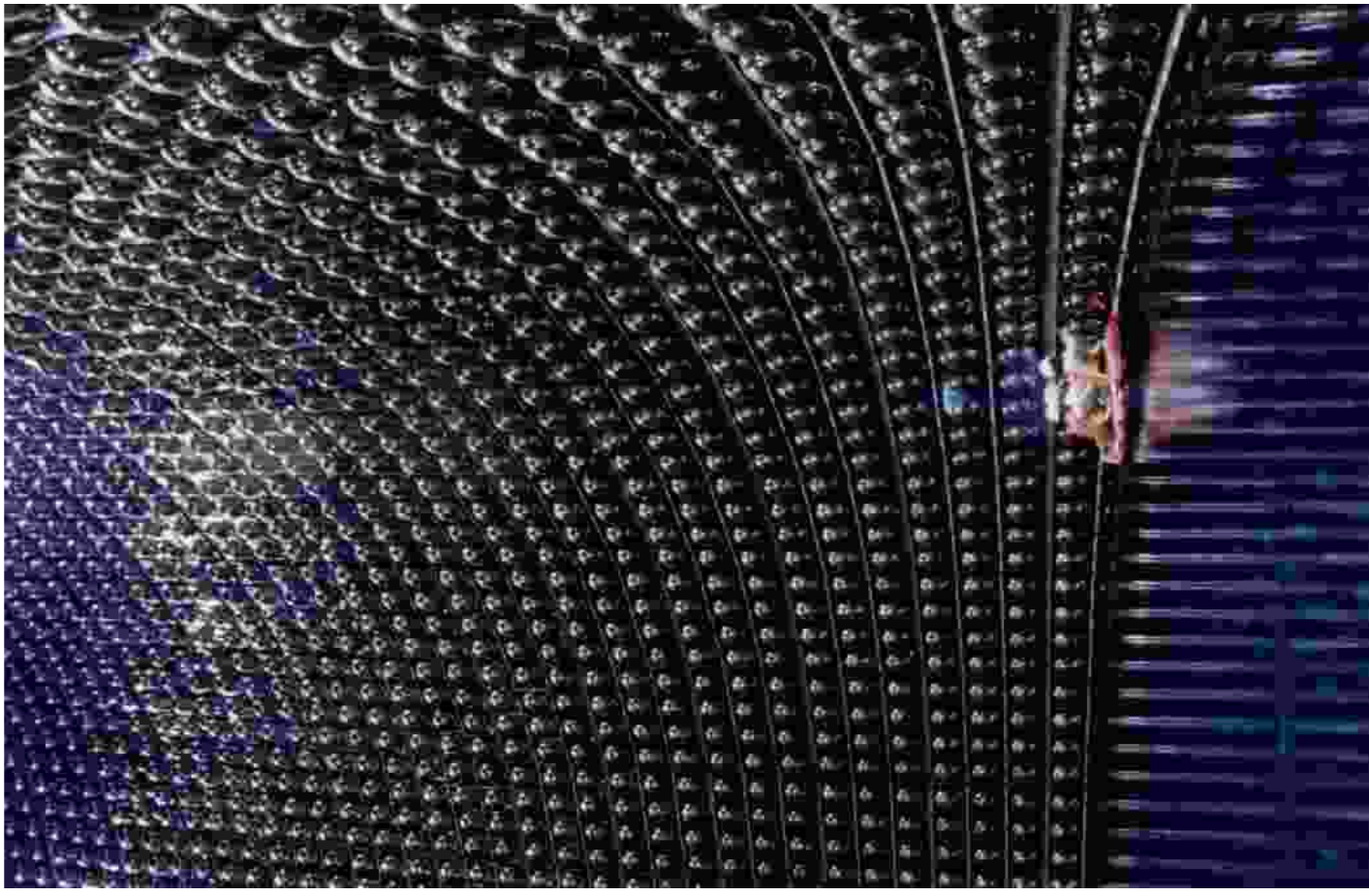
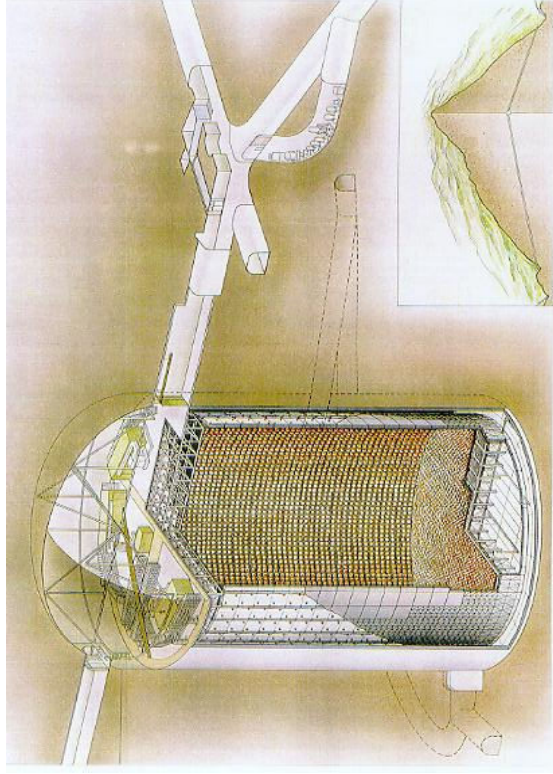
Ring imaging e RICH: viene misurato l'angolo di apertura del cono

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

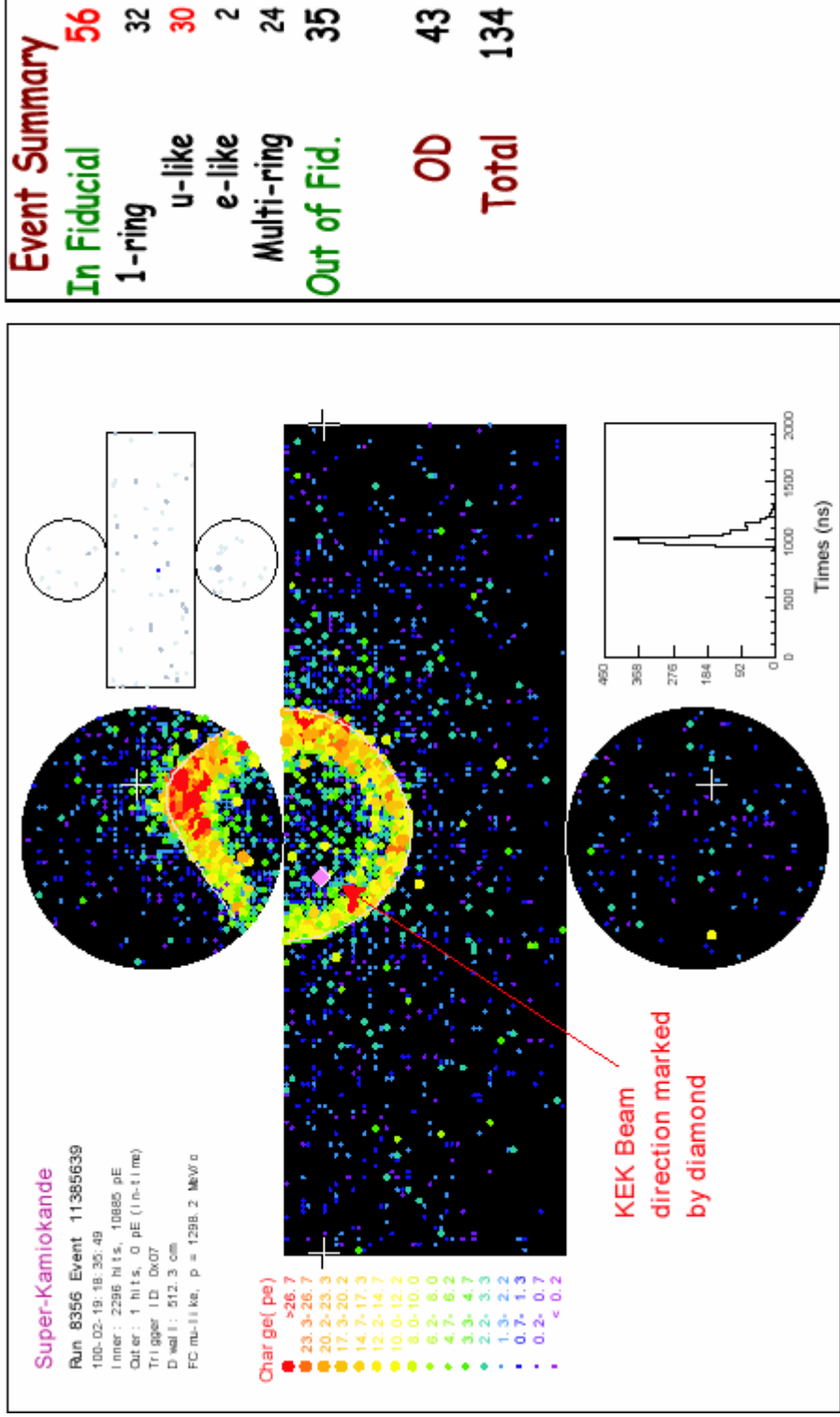




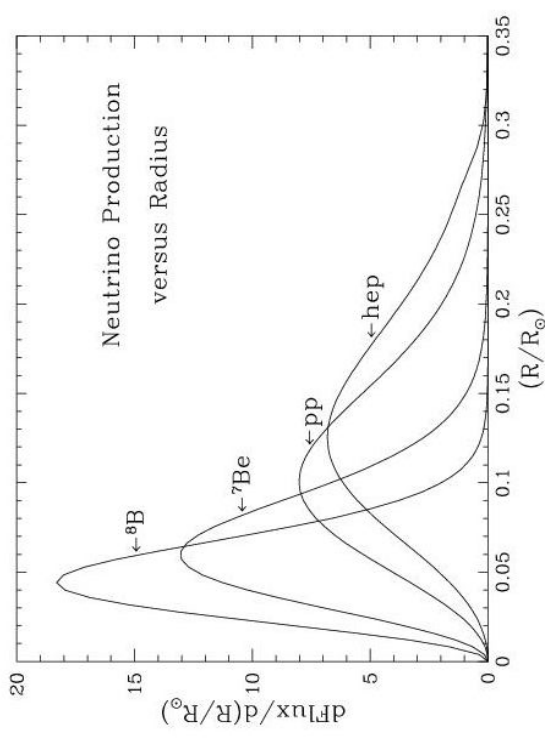
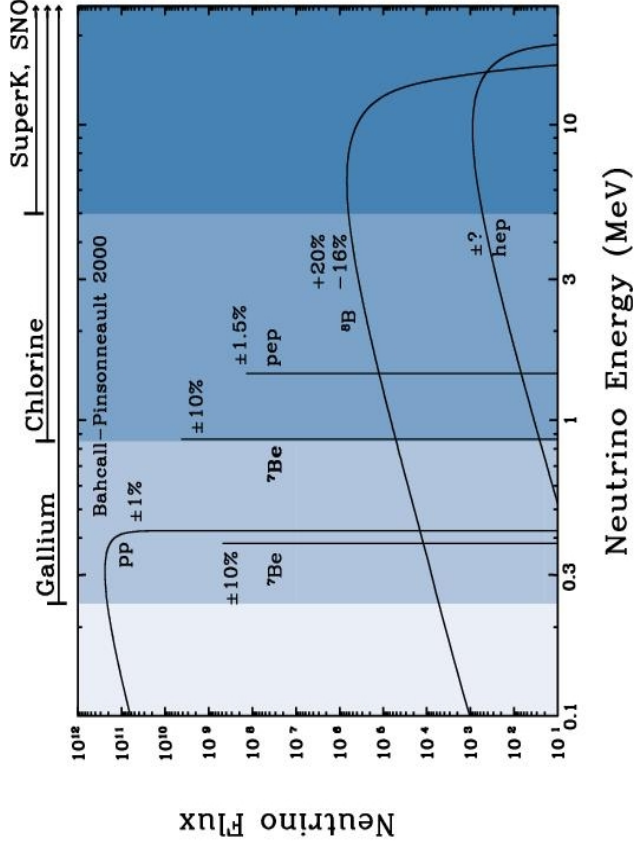
Esempio di rivelatore che  
utilizza luce Cherenkov  
come principio di rivelazione  
e i fotomoltiplicatori come  
rivelatori:  
Super-Kamiokande  
in Giappone.



# Observed Events

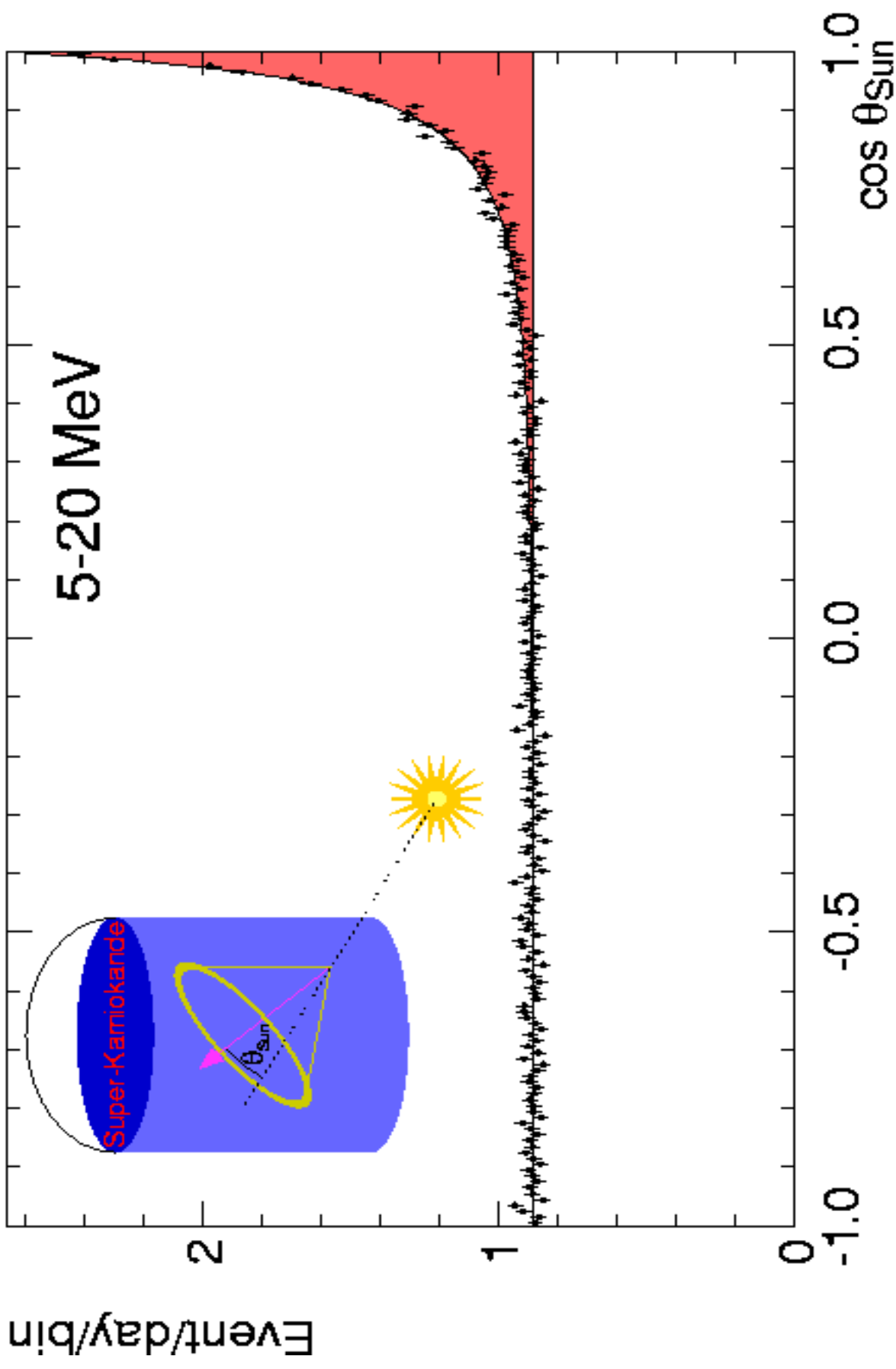


# Flusso di neutrino solari secondo il “Solar Standard Model”



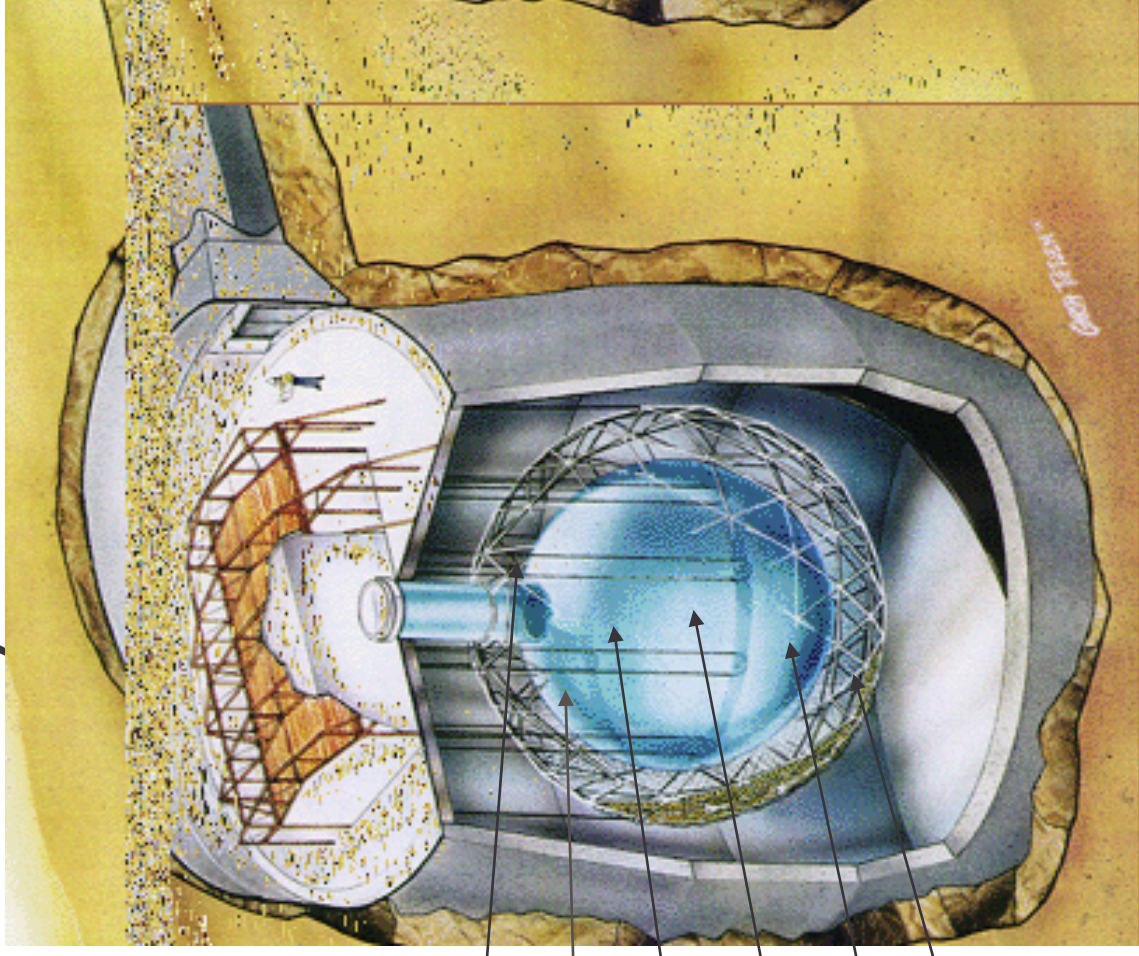
**Solo neutrini elettronici  
sono prodotti nel sole**

# “Telescopio” per neutrini solari



# Sudbury Neutrino Observatory

(G. Beier)



1000 tonnes  $D_2O$

Support Structure for 9500  
PMTs, 60% coverage

12 m Diameter Acrylic Vessel

1700 tonnes Inner Shielding  $H_2O$

5300 tonnes Outer Shield  $H_2O$

Urylon Liner and Radon Seal

# $\nu$ Reactions in SNO

CC



- Fornisce spettro energetico dei  $\nu_e$
- Direzionalità povera  $\propto 1 - 1/3 \cos(\theta)$
- Solo  $\nu_e$

NC

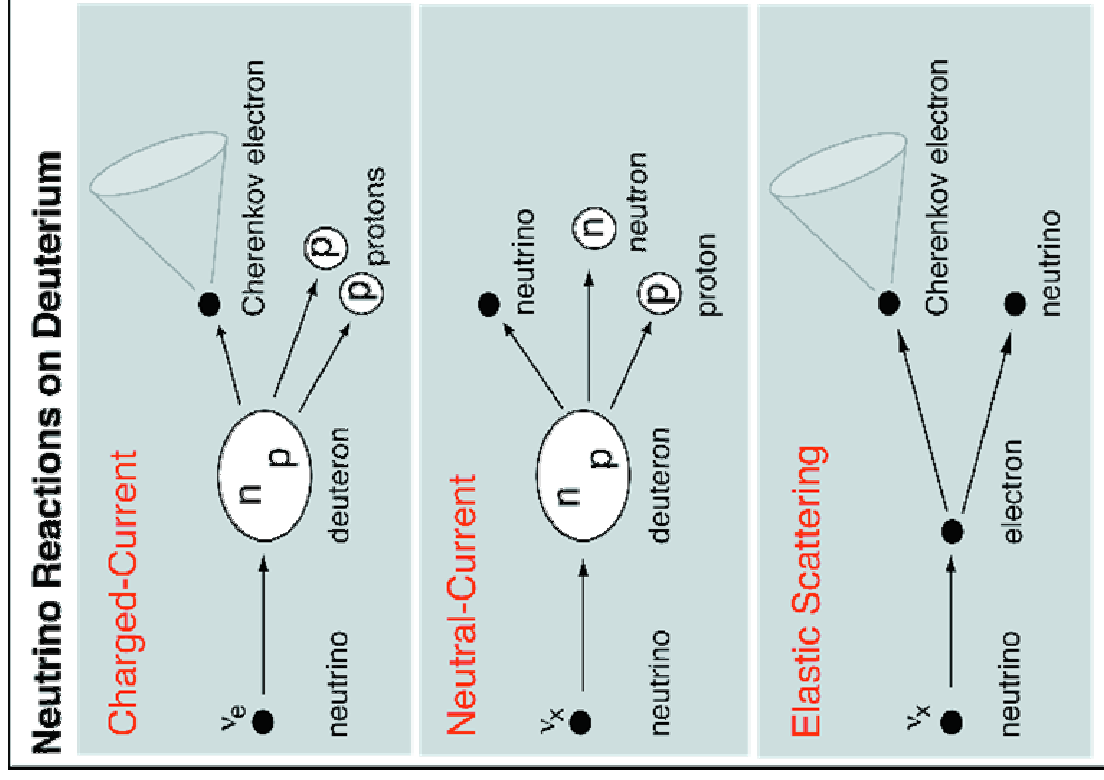


- Misura del flusso totale  ${}^8\text{B}$
- Stessa sezione d'urto per tutti i sapori

ES

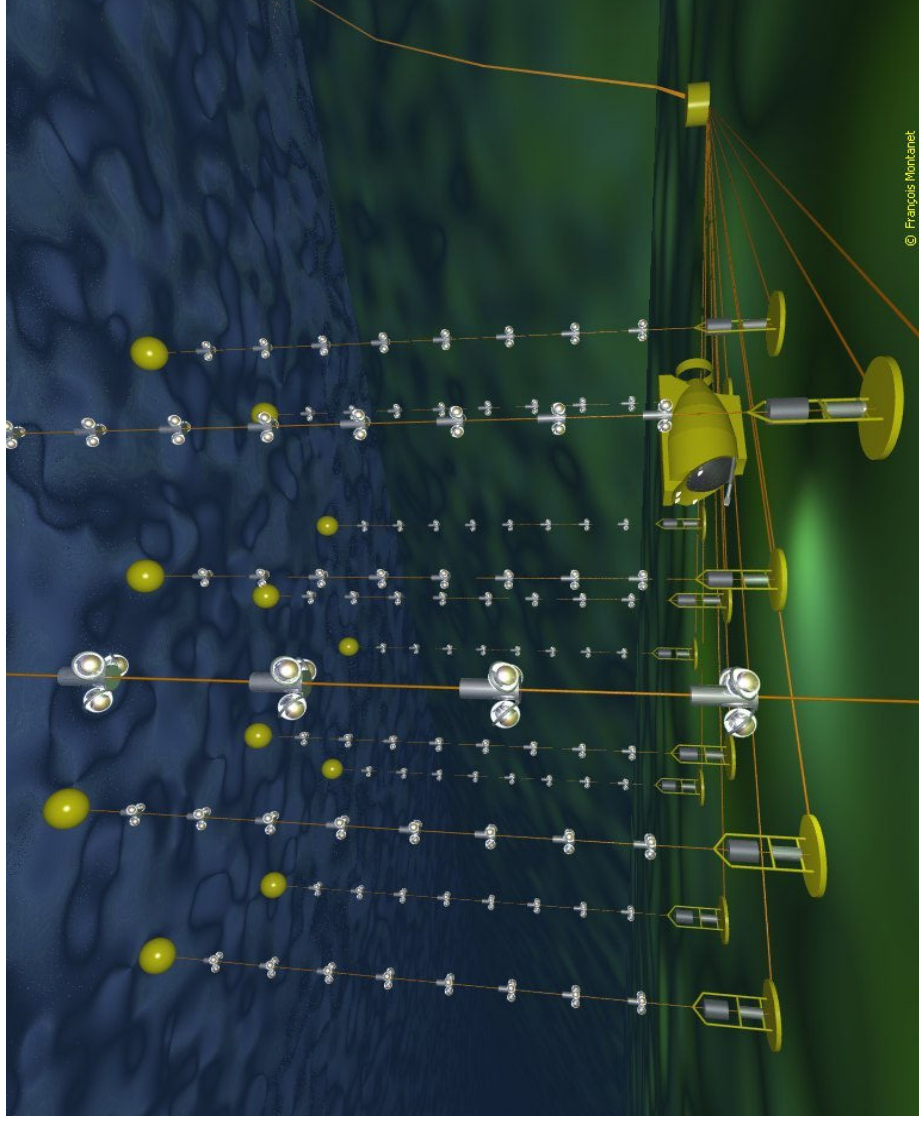


- Bassa statistica
- Principalmente per i  $\nu_e$ 
  - meno per i  $\nu_\mu$  and  $\nu_\tau$
- Forte potere di puntamento



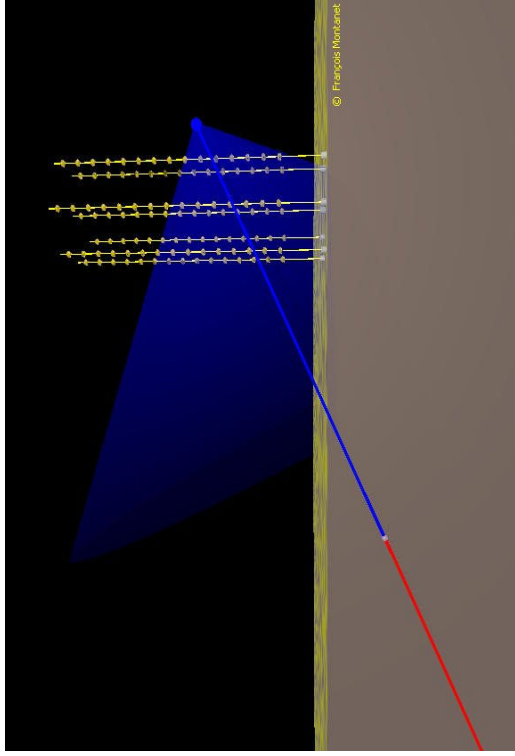
Altro esempio di rivelatore che utilizza luce Cherenkov come principio di rivelazione e i fotomoltiplicatori come rivelatori: Antares, in Europa.

## Rivelatore di neutrini astrofisici (TeV neutrinos)

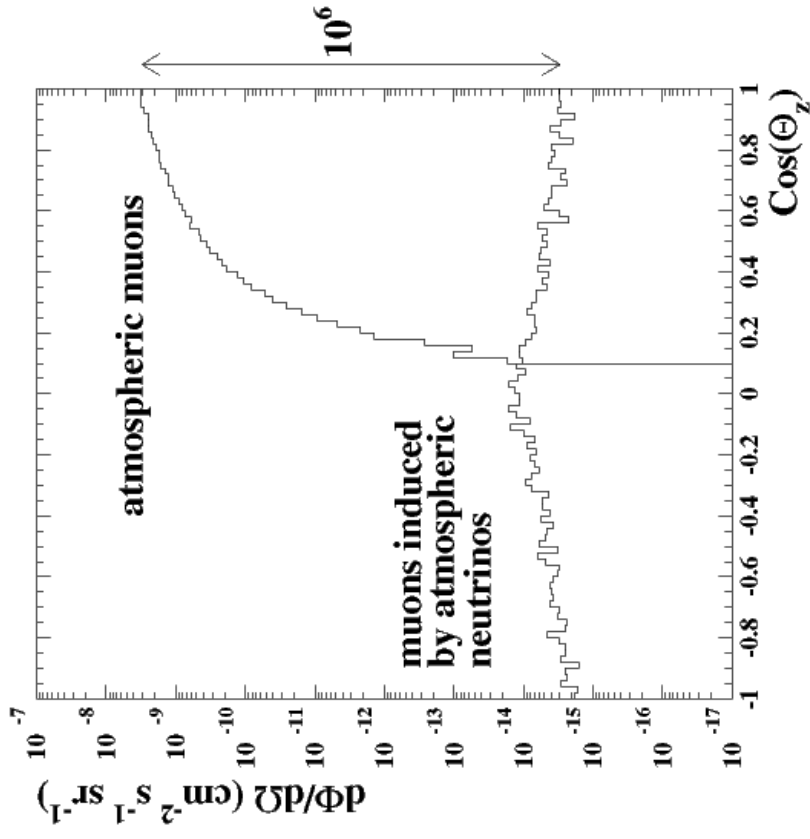


# Luce Cherenkov dai $\mu$ (and $\tau$ ?)

- Evento CC:  $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$



- Background: dei  $\mu$  atmosferici





# Antares: rivelazione di sciami EM ed adronici

$$\nu + N \rightarrow \nu + X \quad (\text{NC})$$

$$\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e \quad (\text{CC, NC})$$

⇒ basso potere di puntamento in questo caso.

## Altri tipi di rivelatori non trattati

- Rivelatori “radiochimici” per i neutrini solari;
- Rivelatori per NDBD (doppio beta senza  $\nu$ )
- Rivelatori “risonanti”