



La Beam-Test Facility: una linea di fascio per molti usi

BTF STAFF

Bruno Buonomo
Claudio Di Giulio
Luca Foggetta
Paolo Valente



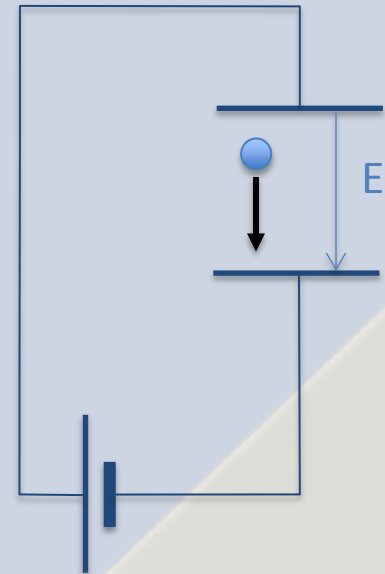
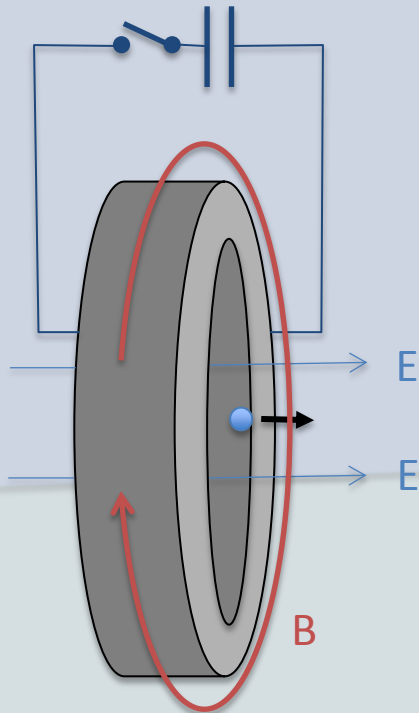
LINAC = accelerazione di particelle

LINAC: tutto comincia da qui



Accelerare le particelle cariche

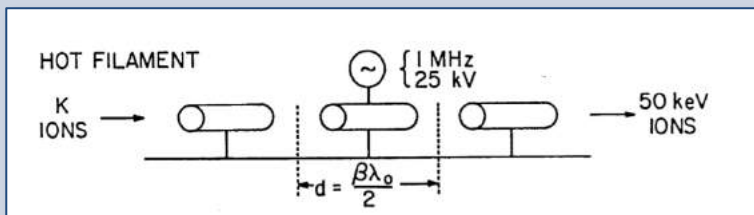
- Acceleratori elettrostatici (Cockroft-Walton, Van de Graaff): limitati dal **breakdown elettrostatico** (poche decine di MeV)
- Acceleratori a induzione



- Acceleratori a **radio-frequenza**: le particelle sono accelerate in modo risonante da un campo elettrico RF

Acceleratore lineare

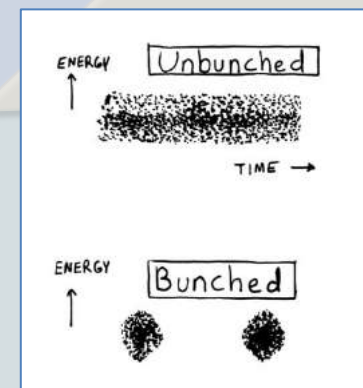
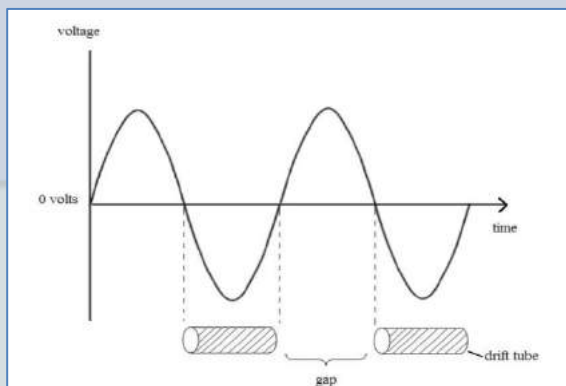
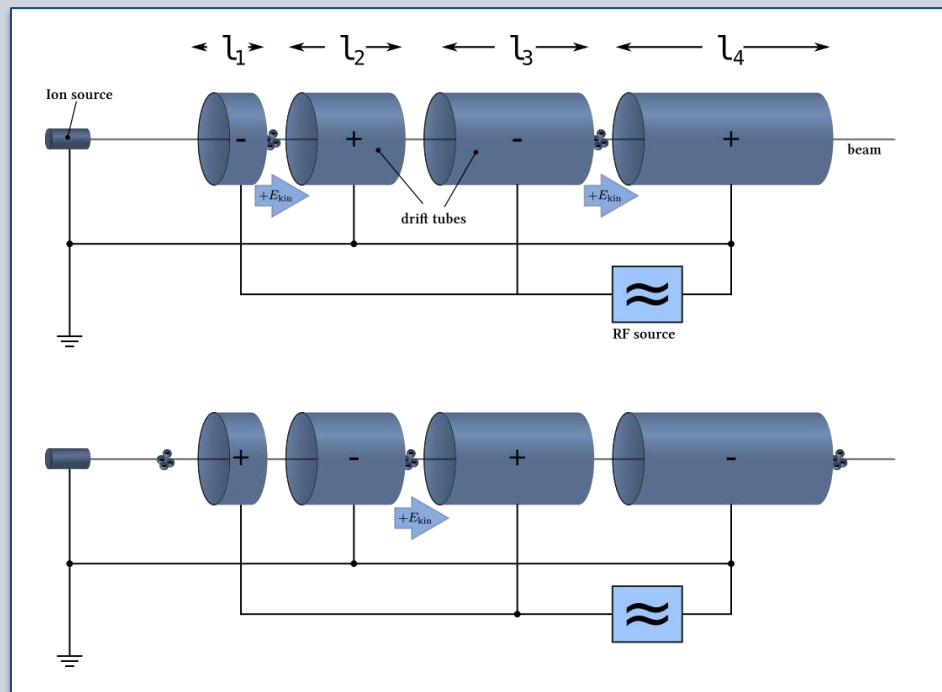
LINAC di Wideroe (1928)



$$\beta = v/c$$

λ = lunghezza d'onda del campo RF

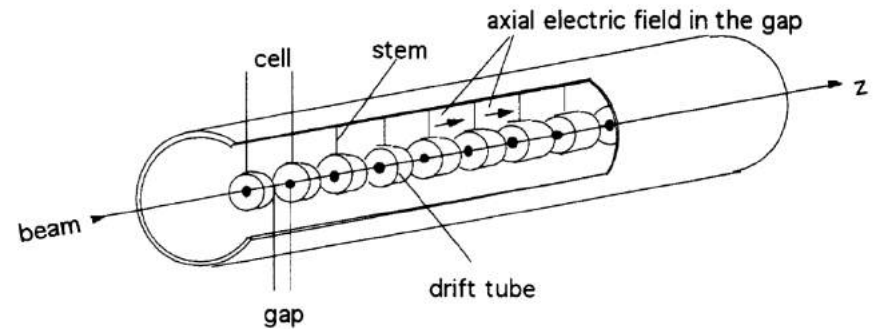
I tubi successivi sono più lunghi per mantenere il sincronismo della fase della tensione alternata



Acceleratore lineare

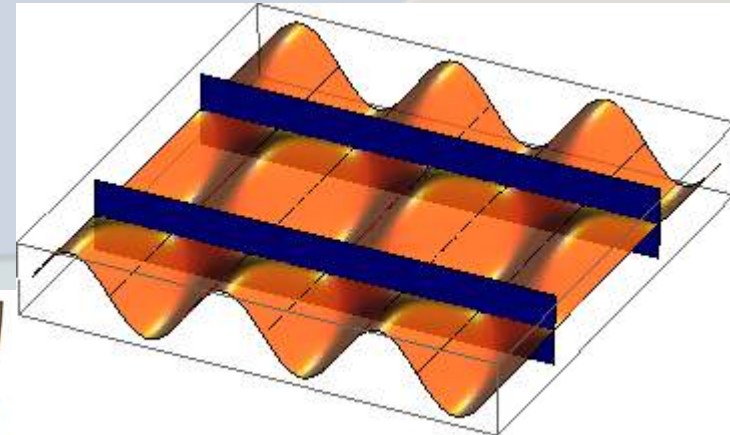
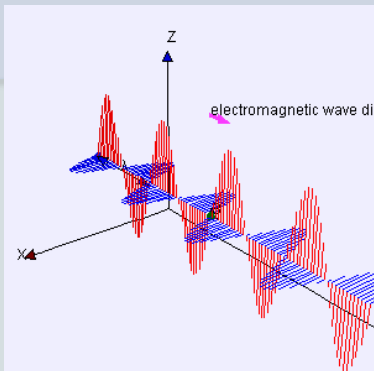
LINAC di Alvarez (1945)

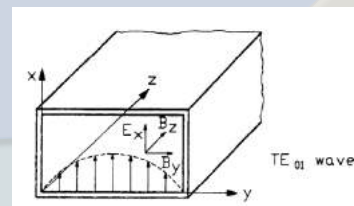
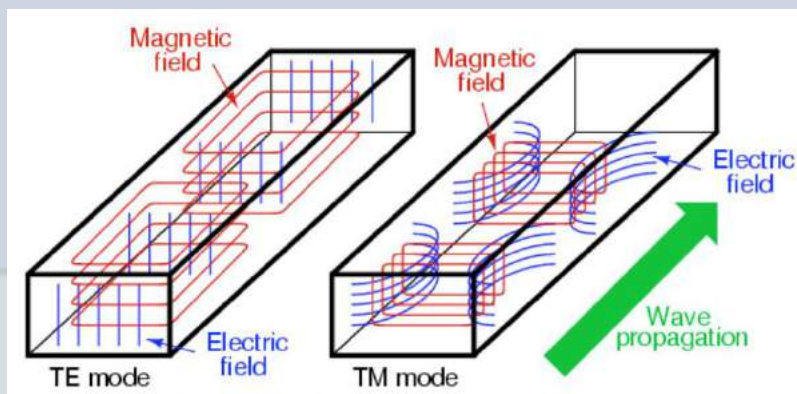
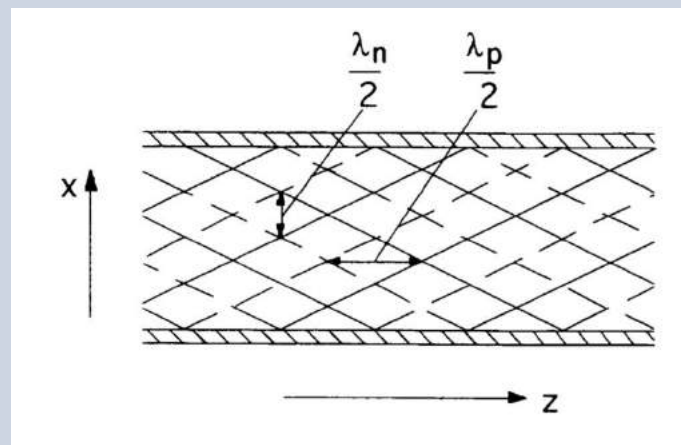
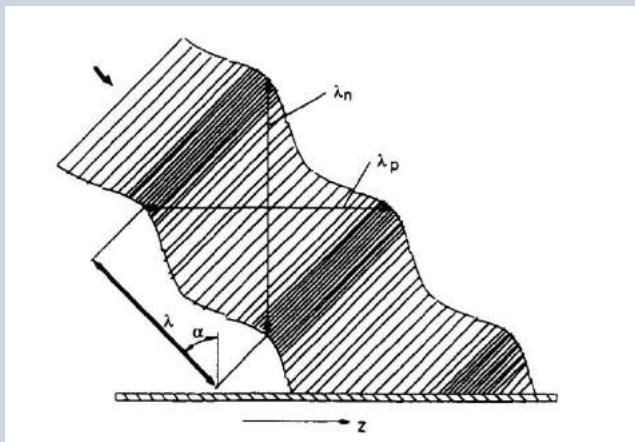
- Spazi tra i tubi racchiusi in cavità metalliche
- Questo riduce significativamente le perdite di radiazione elettromagnetica ad alte frequenze nella struttura di Wideroe



Traveling Wave LINAC

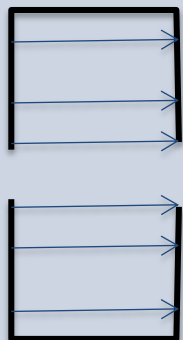
- Onde elettromagnetiche nel vuoto -> in guida e cavità
- Le cavità a radiofrequenza vengono caricate periodicamente
- Accelerazione longitudinale



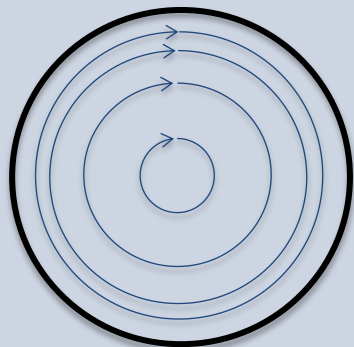


RF – Campi acceleranti

TM_{01}



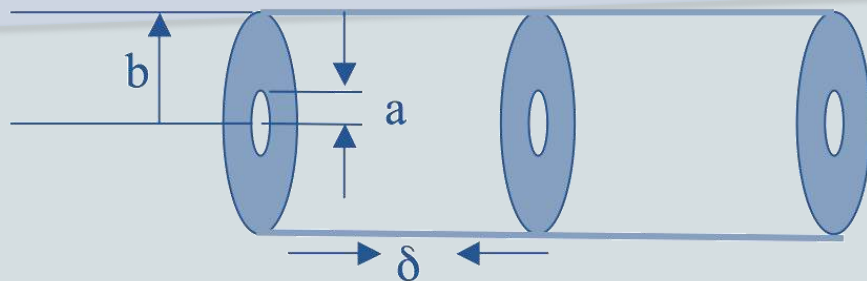
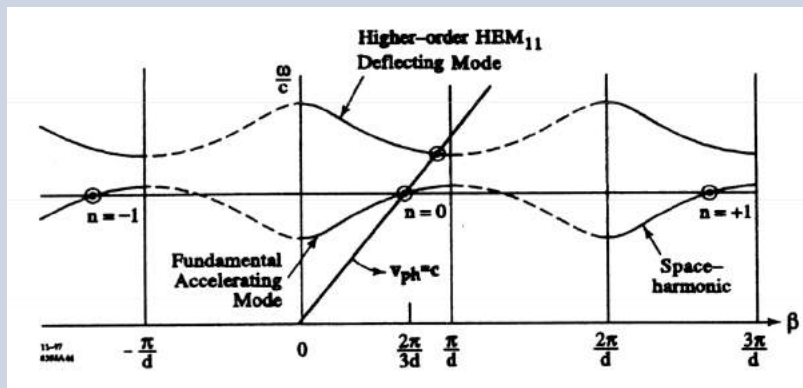
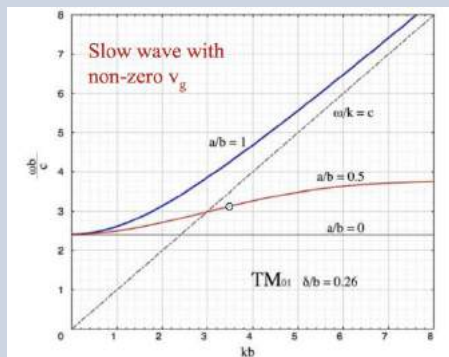
E



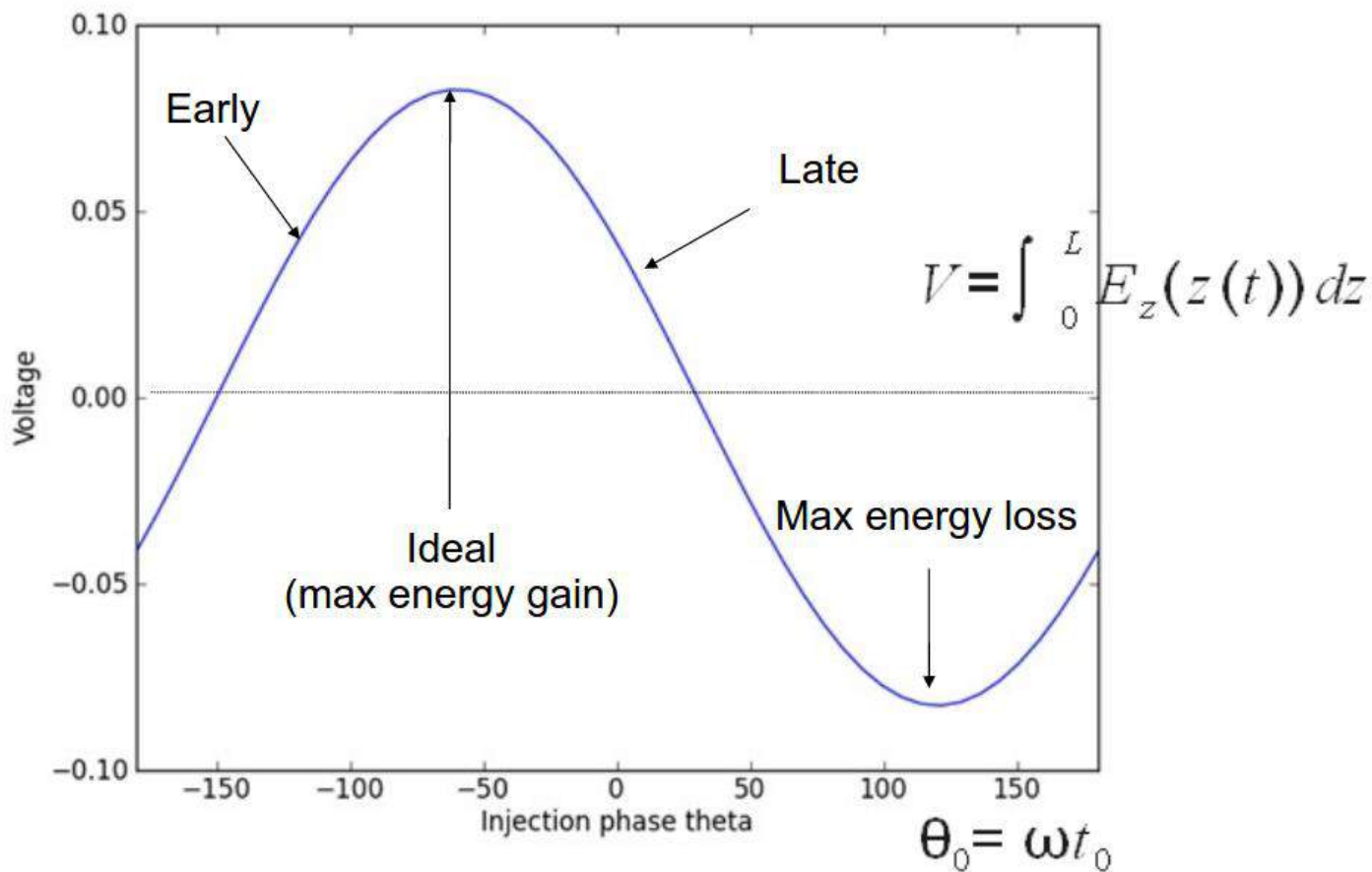
B

- Cavità risonante:
 - Standing wave (SW)
- Guida d'onda:
 - Travelling wave (TW)

- $Q = 2 \pi (E \text{ immagazzinata} / E \text{ dissipata})$
- $R_s = U^2 / P_d$



LINAC - Stabilità di fase



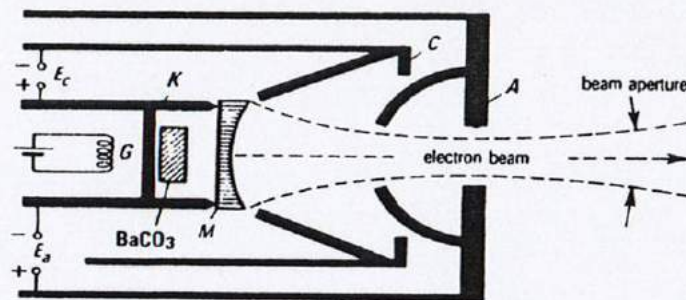
Gun - Funzionamento

- Produrre elettroni
- Pre-accelerare fino al centinaio di keV.
- Produrre un fascio:
 - intenso
 - piccola divergenza angolare (beam-emittance)
 - grande durata e stabilità

Gli elettroni sono prodotti sulla superficie di un catodo caldo che può essere fatto di filamenti di tungsteno. Se un filamento del diametro di 1 mm è riscaldato a 2600 K, è prodotta una corrente di circa 0.8 A su cm². La vita media di tale dispositivo è relativamente lunga ~ 400 h.

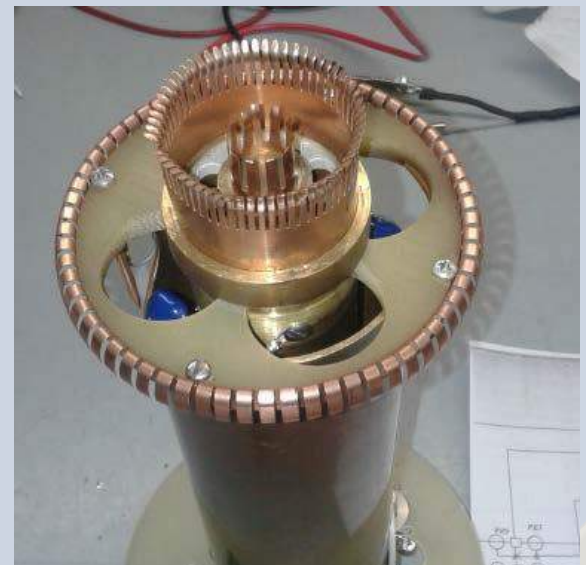
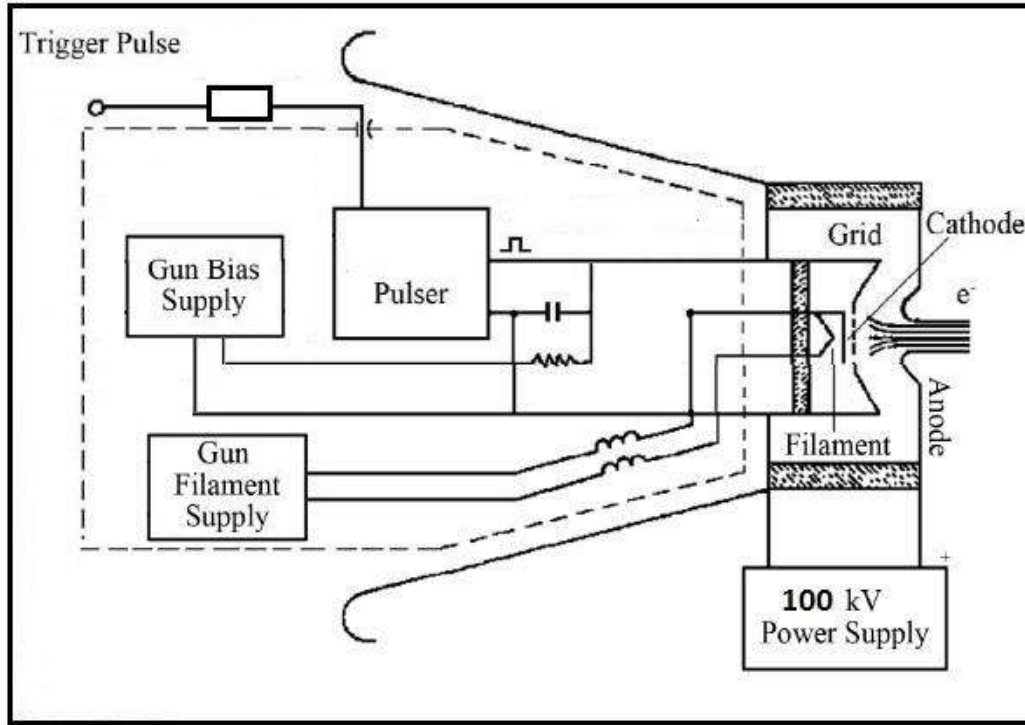
Se la temperatura del medesimo catodo raggiungesse 3000 K, la corrente aumenterebbe di un fattore 20 ma la durata sarebbe appena 20 ore.

Va fatta una scelta di compromesso.



Pierce electron source used in linear accelerators: *H*—cathode heater; *K*—cathode; *A*—anode; *C*—control electrode; *M*—mirror; *E_a*—anode voltage; *E_c*—control voltage

Gun - Layout



DAFNE LINAC – Bassa energia



Buckling coil

Compensa l'effetto delle bobine successive in modo di avere $B=0$ in prossimità del catodo

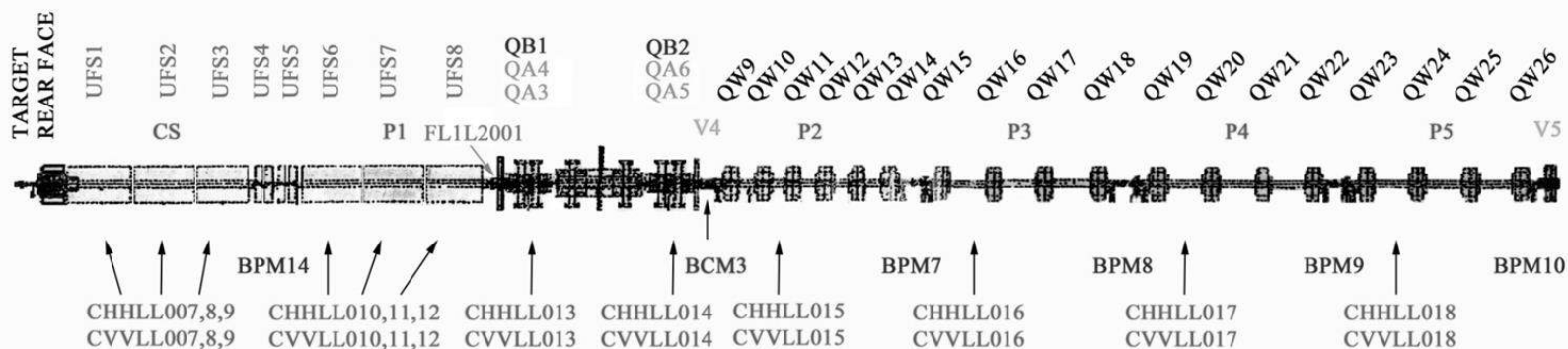
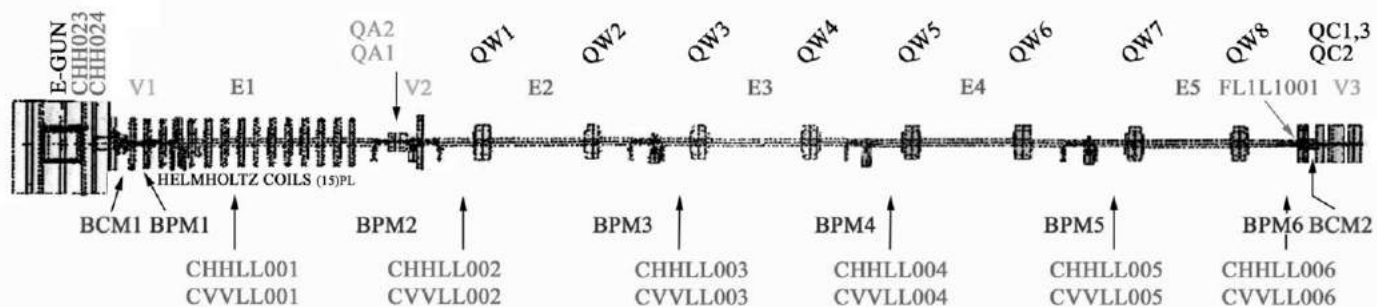
Focusing coil

Helmholtz coil ($\times 14$)

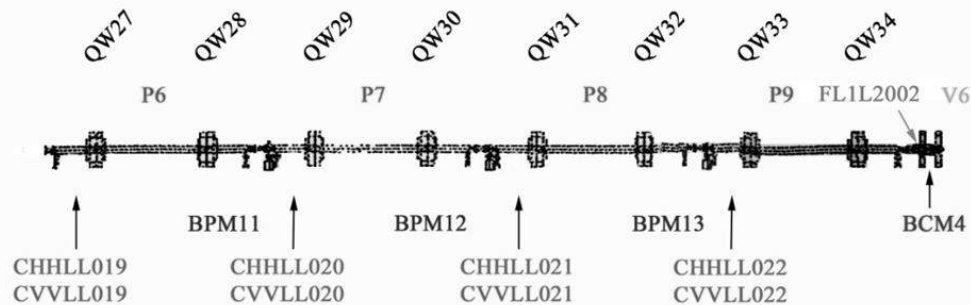
Consentono il trasporto degli elettroni ancora di bassa energia nonostante la forte carica spaziale

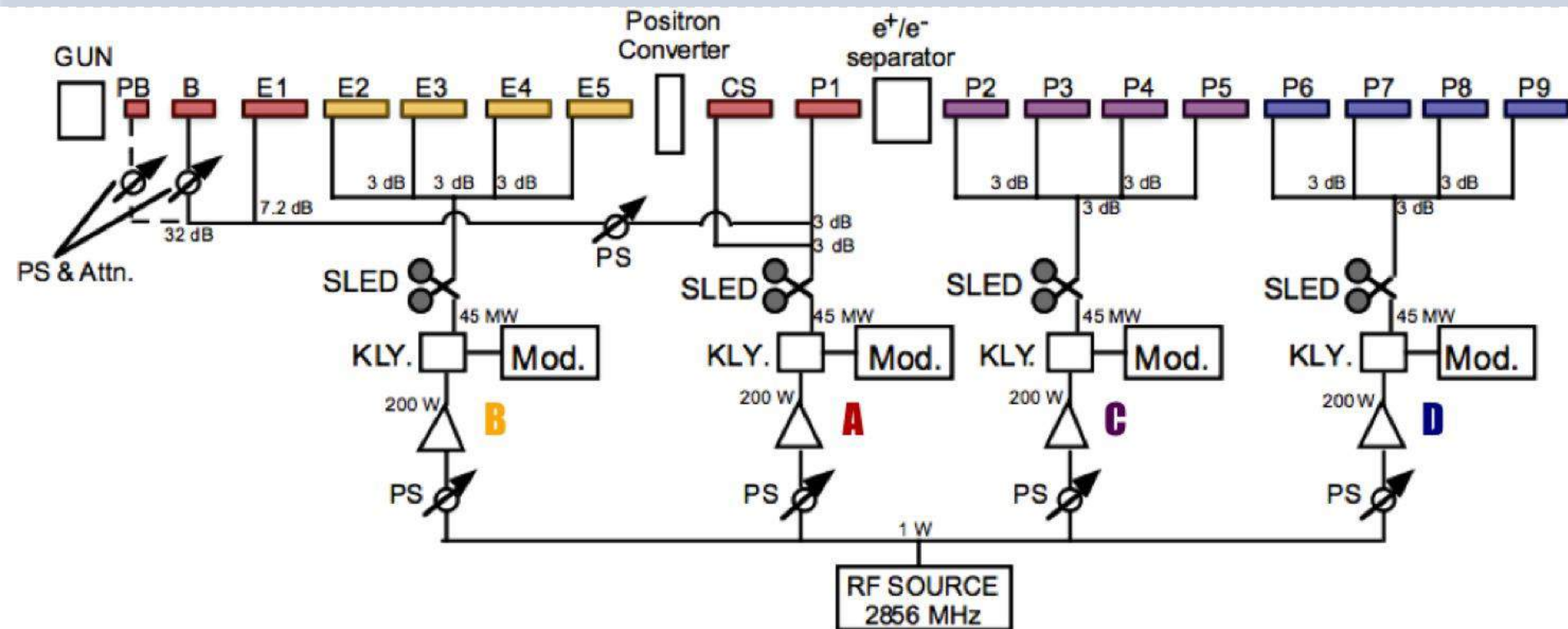
DAFNE LINAC - Schema generale

High current



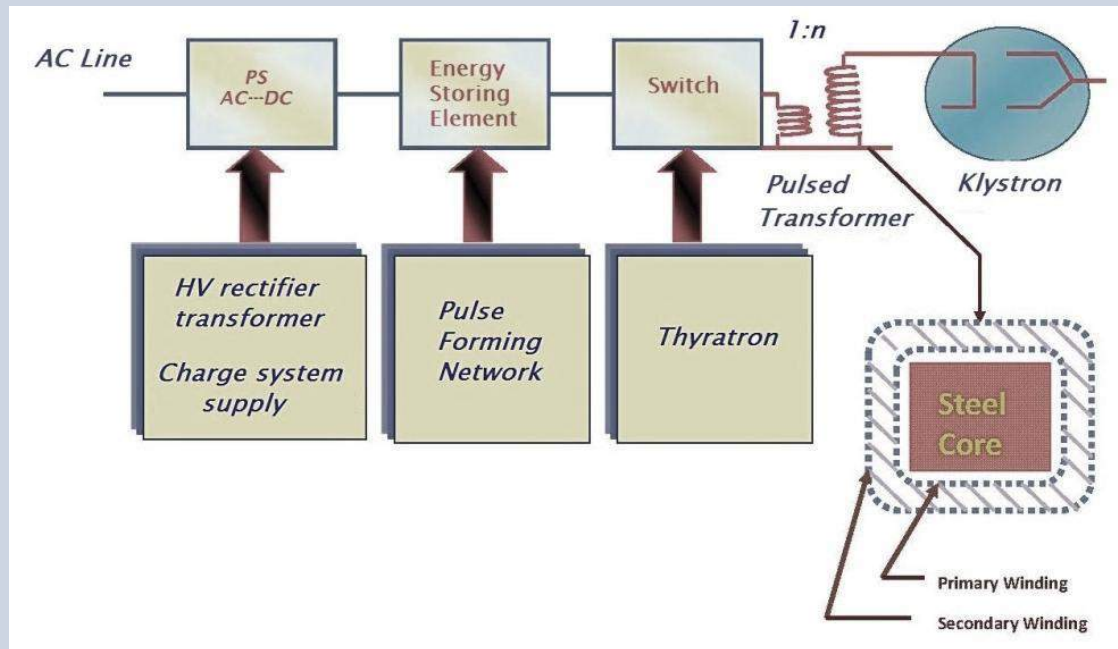
High energy





DAFNE LINAC – Power System layout

The modulator is the DC power supply which drives the klystron beam.



Typically it cannot reach the klystron drive voltage directly. A transformer is needed to reach the desired voltage.

DAFNE LINAC - Modulatori

Klystron	TH2128C
PFN voltage pulse width(μ s)	4,5
PFN Cell capacitance (nF)	68
PFN Cell inductance(μ H)	2
Pulse transformer ratio	1:12
Thyratron peak current (A)	4300
Thyratron Peak voltage (kV)	50
Beam voltage flat top(μ s)	4.5
Pulse rise time (10%-90%) (μ s)	0.4
Pulse fall time (10%-90%) (μ s)	0.5
Pulse voltage variation (%)	± 0.1
Pulse repetition rate (Hz)	50
Modulator charging time (ms)	10

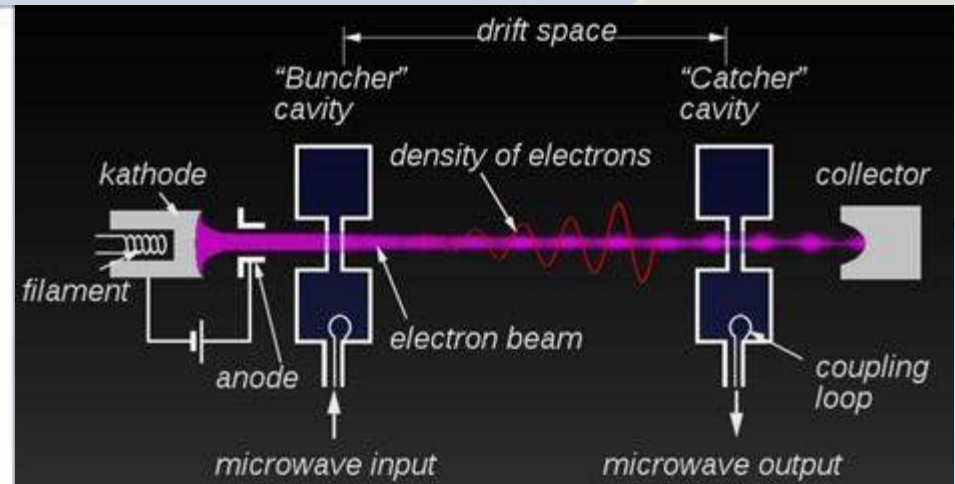
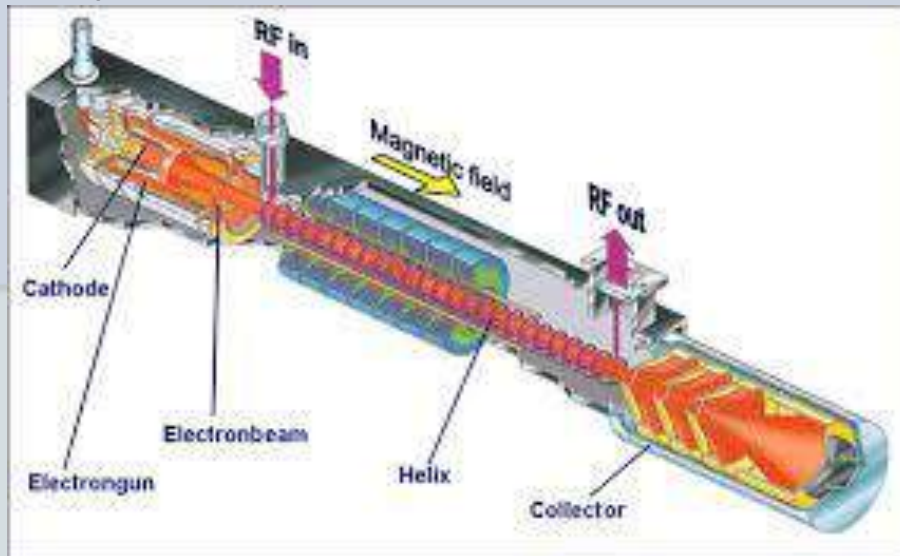


DAFNE LINAC - Klystrons

Klystrons have been the principal source of high-power (>1 MW) RF since the beginning of time, and no alternative technology appears poised to replace them.

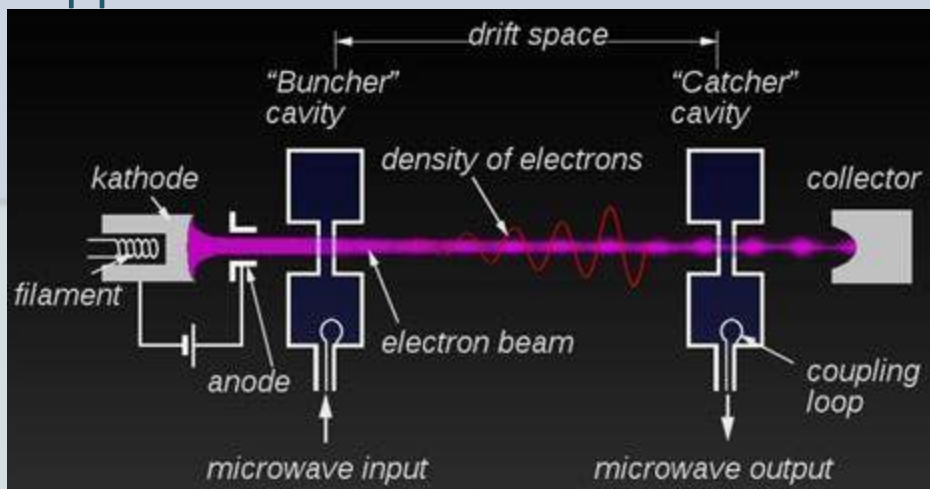
What are klystrons?

A klystron is a narrow-band vacuum-tube amplifier at microwave frequencies (an electron-beam device).



Come funziona un Klystron?

- DC Beam at high voltage (< 500 kV, < 500 A) is emitted from the gun
- A low-power signal at the design frequency excites the input cavity
- Particles are accelerated or decelerated in the input cavity, depending on phase/arrival time
- Velocity modulation becomes time modulation in the long drift tube (beam is bunched at drive frequency)
- Bunched beam excites output cavity at design frequency (beam loading)
- Spent beam is stopped in the collector.



Klystron data sheet



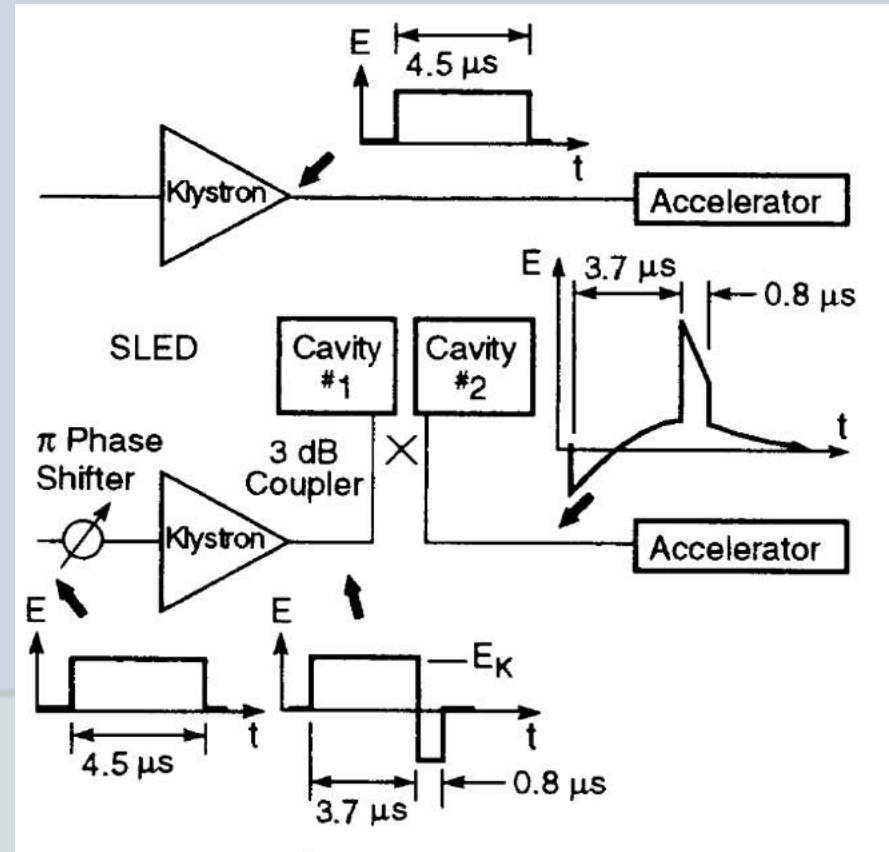
PARAMETER	Unit	TH2128C	5045
Center Frequency	MHz	2856	2856
Peak output power	MW	45	65
Peak average power	KW	10	90
RF pulse width	μs	4.5	3.5
Peak beam voltage	kV	320	350
Peak beam current	A	360	414
Microperveance	$\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$	2.0	2.0
Heater voltage	V	20~30	15
Heater current	A	20~28	35
Focusing currents	A	40	15
Peak driver power	W	200	350
Gain	dB	54	53
Efficiency	%	43	45
Pulse repetition rate	Hz	50	120

LINAC - SLED pulse compression

Power from the klystron goes to 2 resonant cavities for storage because the cavity coupler reflects almost all power, there's a surge of reflected energy which goes to the accelerator.

As the SLED system fills, its emitted power destructively interferes with the klystron reflected power.

At some point in the klystron pulse, the phase of the klystron is reversed so that the stored energy interferes constructively...





DAFNE LINAC - Parametri



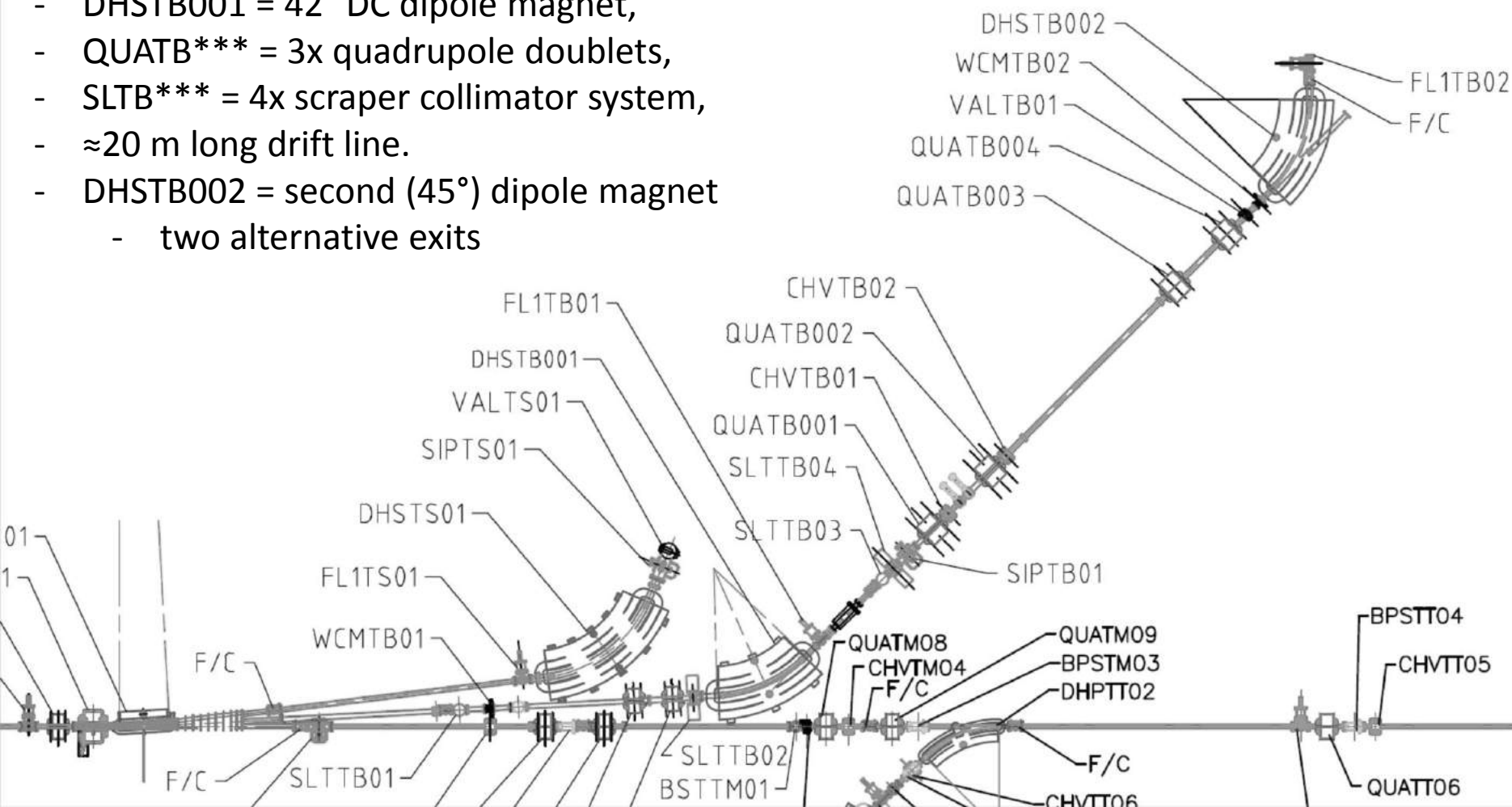
	Design	Operational
Electron beam final energy	800 MeV	510 MeV
Positron beam final energy	550 MeV	510 MeV
RF frequency	2856 MHz	
Positron conversion energy	250 MeV	220 MeV
Beam pulse rep. rate	1 to 50 Hz	1 to 50 Hz
Beam macropulse length	10 nsec	1.4 to 40 nsec
Gun current	8 A	8 A
Beam spot on positron converter	1 mm	1 mm
norm. Emittance (mm. mrad)	1 (electron) 10 (positron)	< 1.5
rms Energy spread	0.5% (electron) 1.0% (positron)	0.5% (electron) 1.0% (positron)
electron current on positron converter	5 A	5.2 A
Max output electron current	>150 mA	500 mA
Max output positron current	36 mA	85 mA
Trasport efficiency from capture section to linac end	90%	90%
Accelerating structure	SLAC-type, CG, $2\pi/3$	
RF source	4 x 45 MWp sledged klystrons TH2128C	



BTF = Negozio di particelle (H24)

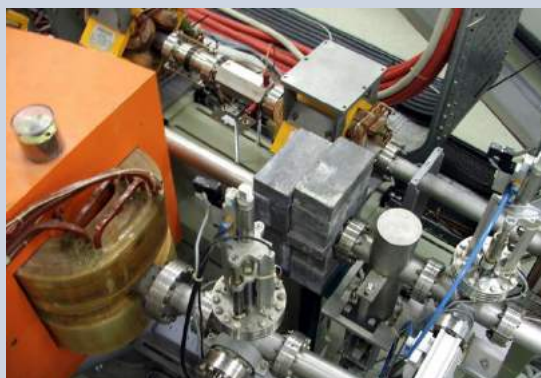
BTF - Layout

- DHPTB101 = 3° pulsed dipole
- DHSTB001 = 42° DC dipole magnet,
- QUATB*** = 3x quadrupole doublets,
- SLTB*** = 4x scraper collimator system,
- ≈20 m long drift line.
- DHSTB002 = second (45°) dipole magnet
 - two alternative exits



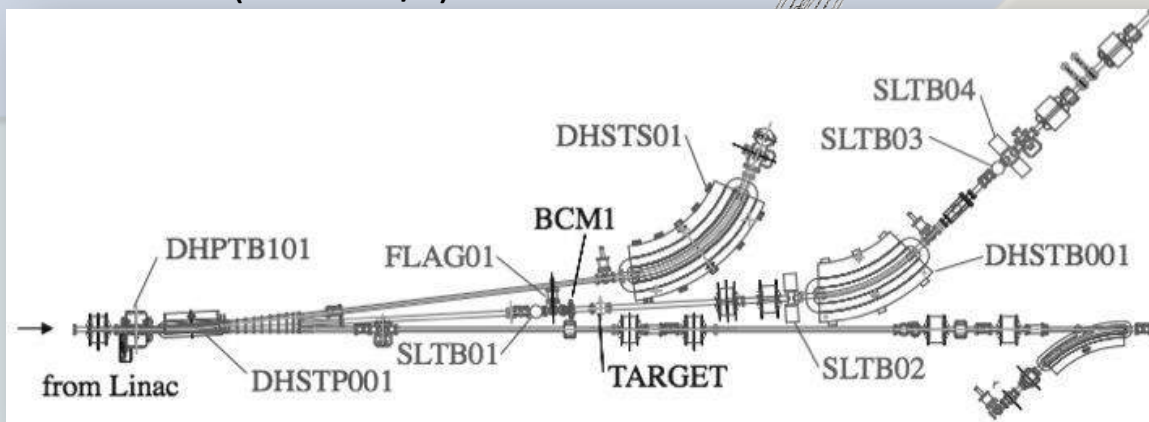
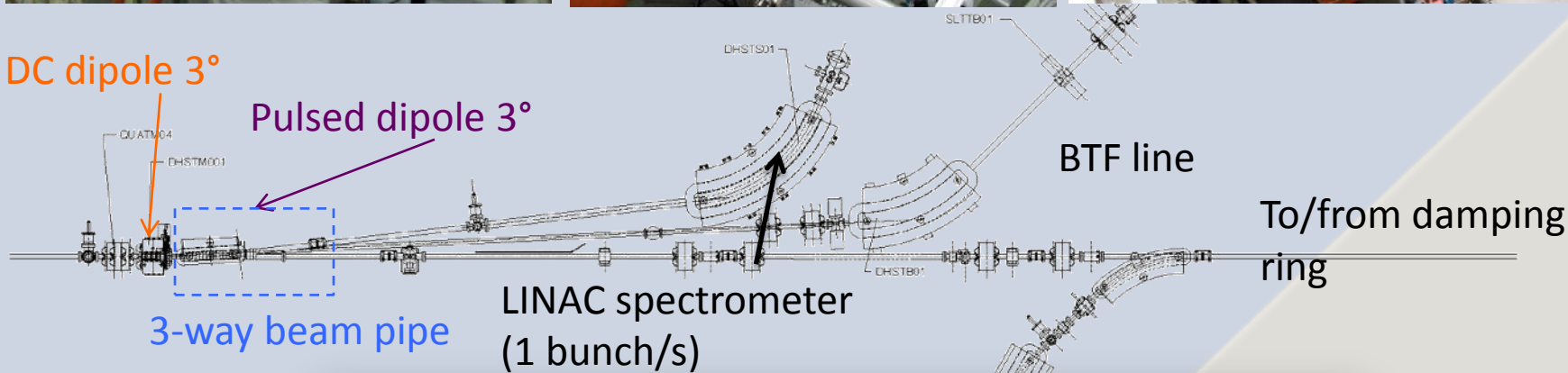


BTF - Layout



DC dipole 3°

Pulsed dipole 3°

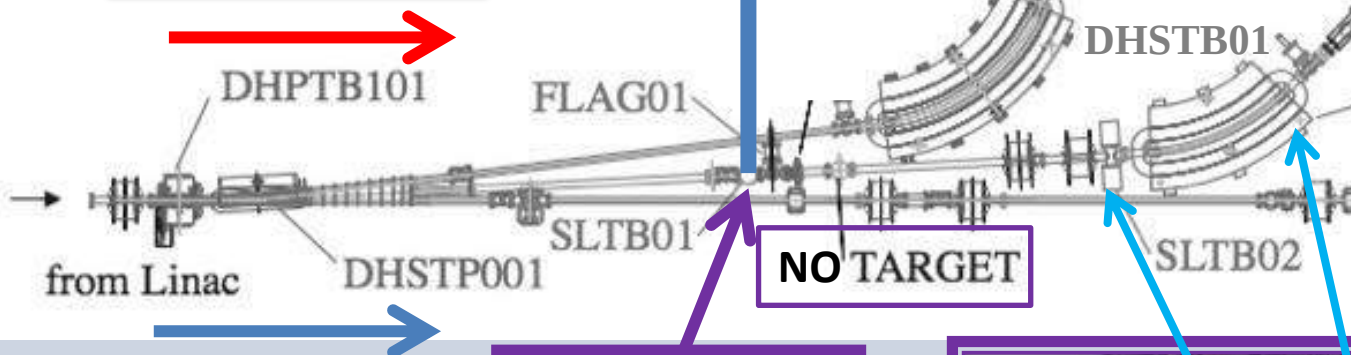


BTF LAYOUT – Fascio Primario

PRIMARY

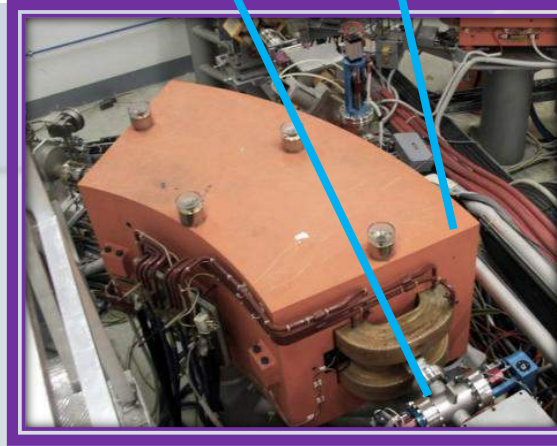
PRIM conditioned

Positron Beam
 $6 \times 10^9 e^+/\text{bunch}$



Electron Beam
 $3 \times 10^{10} e^-/\text{bunch}$

- 4x single-axes SCRAPERS
- LINAC Energy is conserved
- NO TARGET!!!!



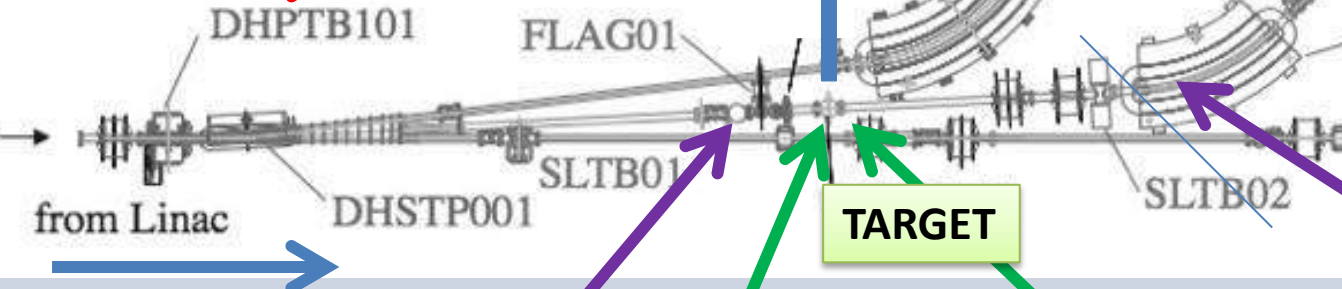
**DHSTB001 steers
 and no more**

BTF LAYOUT - Fascio Secondario

PRIMARY

SECONDARY

Positron Beam
 $6 \times 10^9 e^+/\text{bunch}$



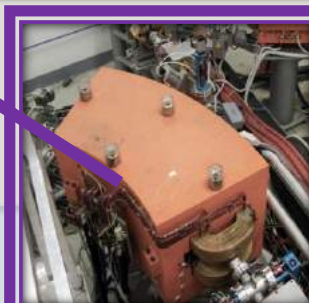
Electron Beam
 $3 \times 10^{10} e^-/\text{bunch}$



TO BTF

- 4x single-axes SCRAPERS
- LINAC Energy is different to BTF energy
- YES, TARGET!!!!

TARGET



DHSTB001

- Selects energy
- Steers

Is a spectrometer!





BTF - Produzione di fasci secondari

LINAC positron converter

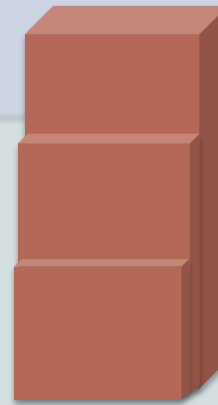
- Target: tungsten (Z=74)-rhenium(Z=75), $L=2 \times x_0$
- Positrons by pairs production
- flux concentrator, jointly with DC solenoid magnets, generate a strong magnetic field (5 T peak) necessary for the positron capture.

BTF target

- Copper (Z=29) variable depth (1.7, 2 or 2.3 radiation lengths)

$$\frac{\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)_{RAD}}{\left(\frac{\partial E}{\partial x}\right)_{ION}} \approx \frac{ZE_0}{800}$$

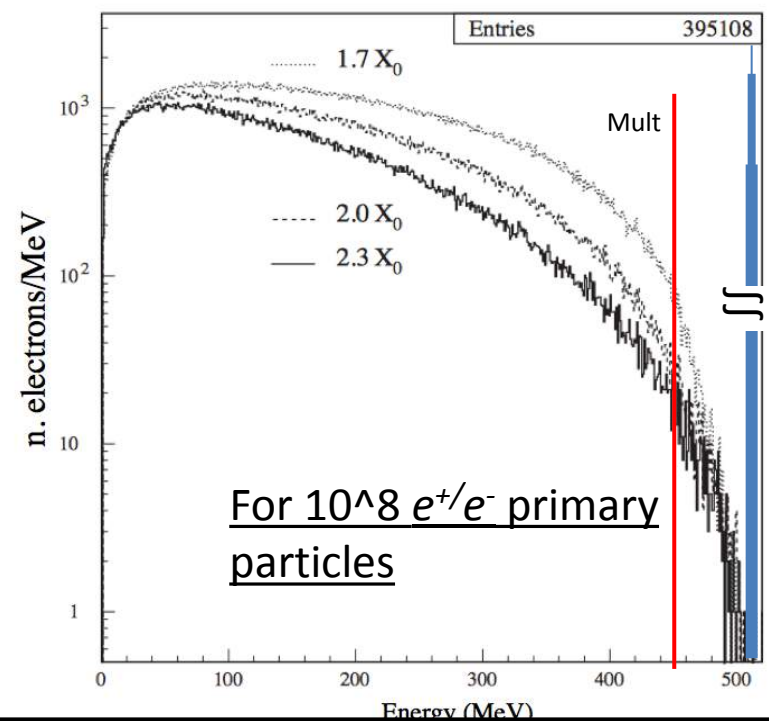
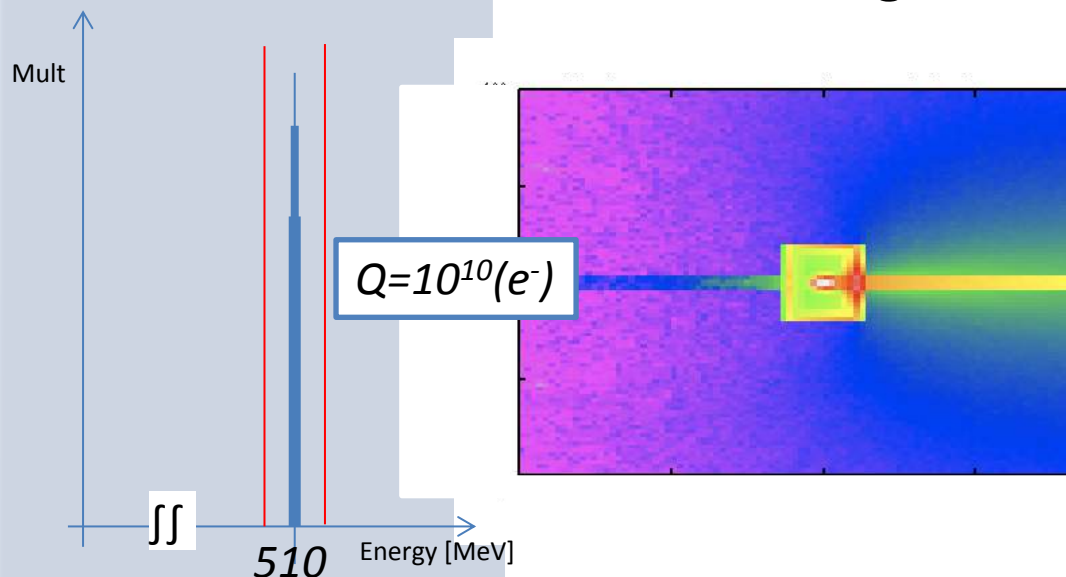
- Copper critical energy at $E_0=0.5$ GeV $\approx$ **18 MeV**
($\approx$ **46 MeV** for W/Re)



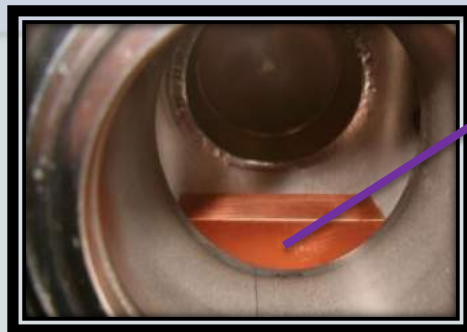
BTF LAYOUT - Targhettone

3-selectable thickness Copper Showering TARGET (Targhettone...)

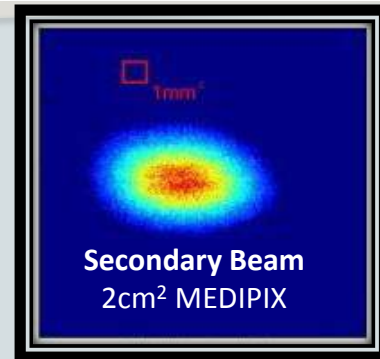
- 1.7, 2.0 or 2.3 radiation lengths



Primary Beam
YAG:Ce FLAG



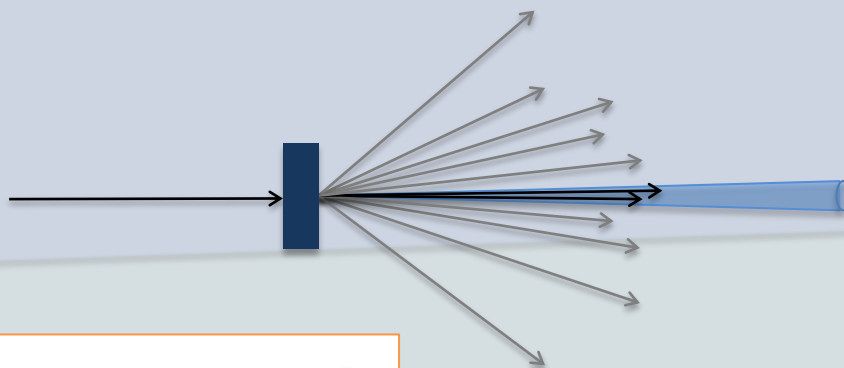
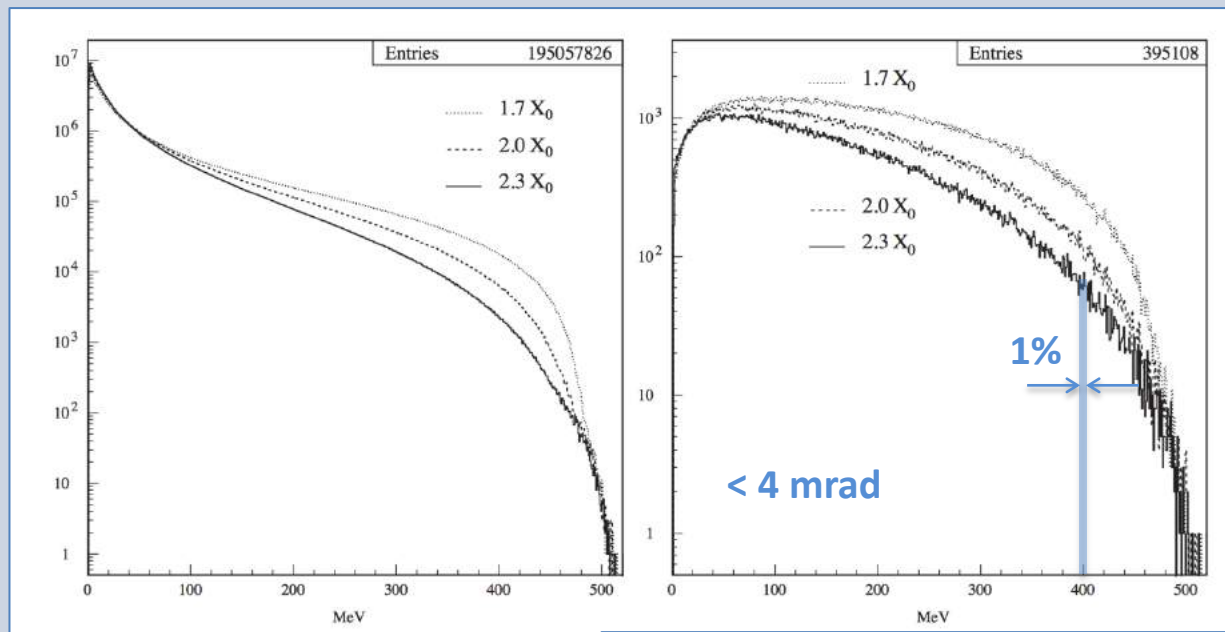
Secondary Beam
2cm² MEDIPIX



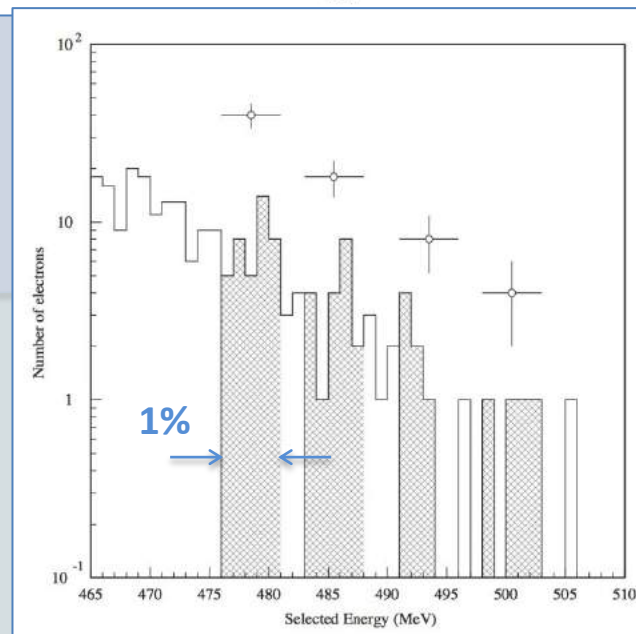
Attenuare fino alla singola particella

B. Rossi model of e.m. shower

$$w(E_o, \alpha, E) = \frac{1}{E_o} \frac{\left[\ln \left(\frac{E_o}{E} \right) \right]^{\frac{\alpha}{\ln 2} - 1}}{\Gamma \left(\frac{\alpha}{\ln 2} \right)}$$



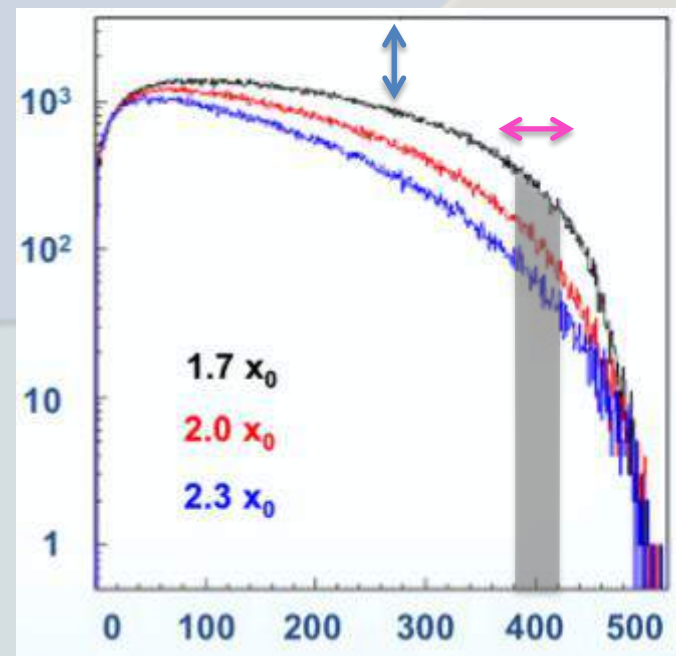
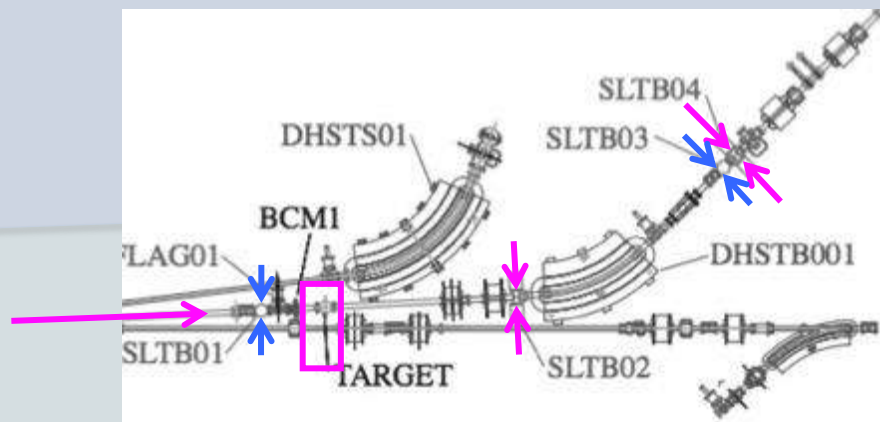
$$P = \frac{1}{2 \Gamma \left(\frac{\alpha}{\ln 2} \right)} \left(\frac{\Delta E}{E_o} \right)^{\frac{\alpha}{\ln 2}}$$



BTF BEAM – Regolazione Intensità

Adjustment of the number of particles can be achieved:

- Without changing the momentum resolution:
 - **Modulating the LINAC current** [not possible in 'parasitic mode', very rough]
 - Act on transport optics or modulators power/phase
 - Choosing another **target depth** [step change but reproducible] → **Secondary beam**
 - Closing/Opening the **down-stream vertical collimators** [fine but small range]
 - Closing/Opening the **up-stream vertical collimators**
- Also changing the momentum resolution:
 - Closing/Opening the **horizontal collimators**



BTF LAYOUT - Fascio Secondario

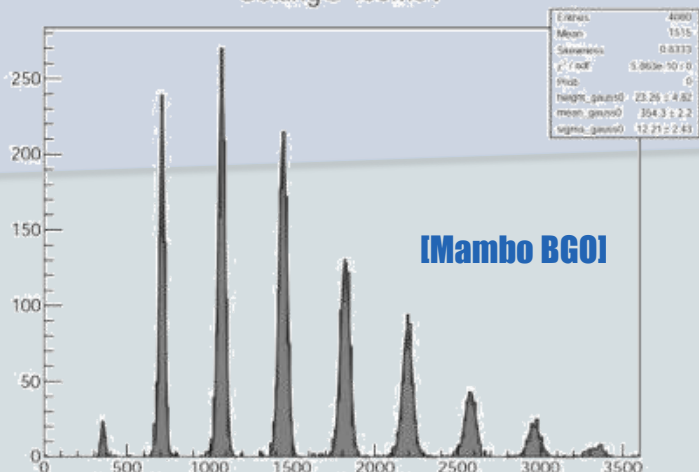
Secondary beam, single particle

- The primary beam is attenuated by the copper target
- Starting from primary beam energy down to 50 MeV
- Multiplicity as Poissonian distribution with a given average multiplicity is selectable
- Selectable positrons or electrons , independently from LINAC phase

Secondary beam, intermediate intensity

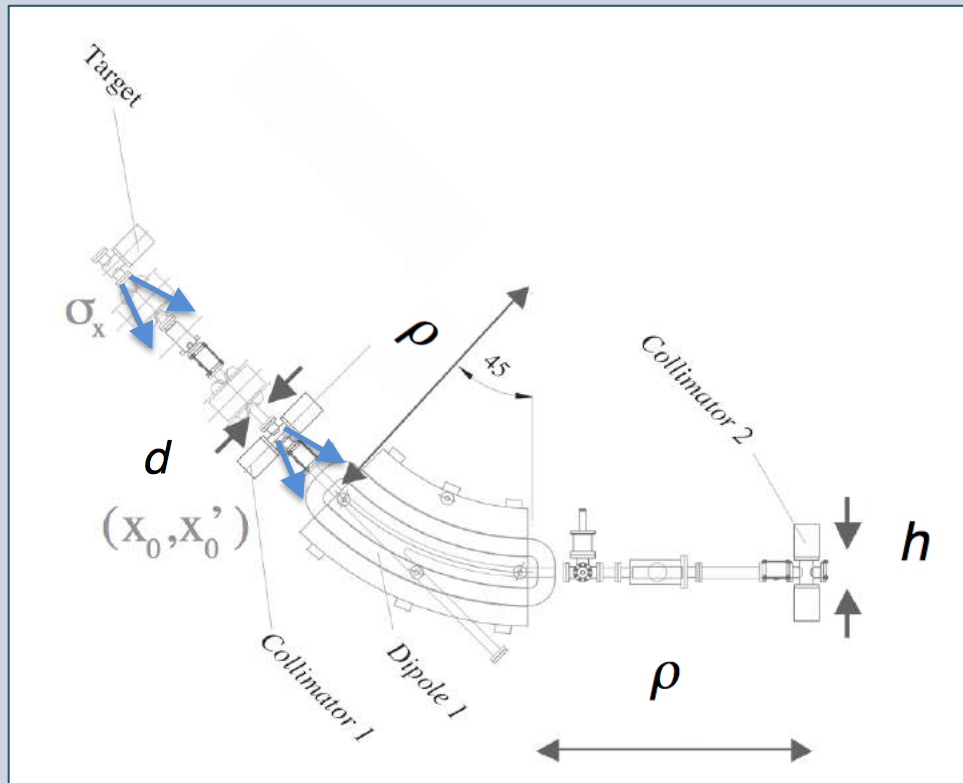
- The primary beam is attenuated by the copper target
- ranging from ten to hundred thousand particles per bunch
- selecting at least 10MeV energy lower than the primary one
- Multiplicity is directly related to the secondary energy spectrum accepted by the line
- Selectable positrons or electrons , independently from LINAC phase

Setting@400MeV



→ thus allowing a very fine tuning of the beam intensity and energy

Risoluzione in impulso



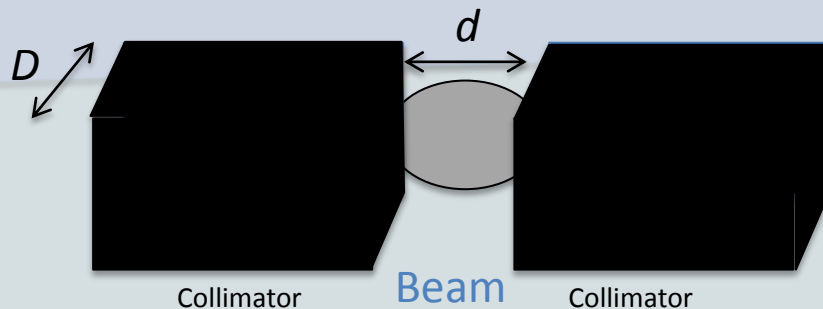
Energy resolution:

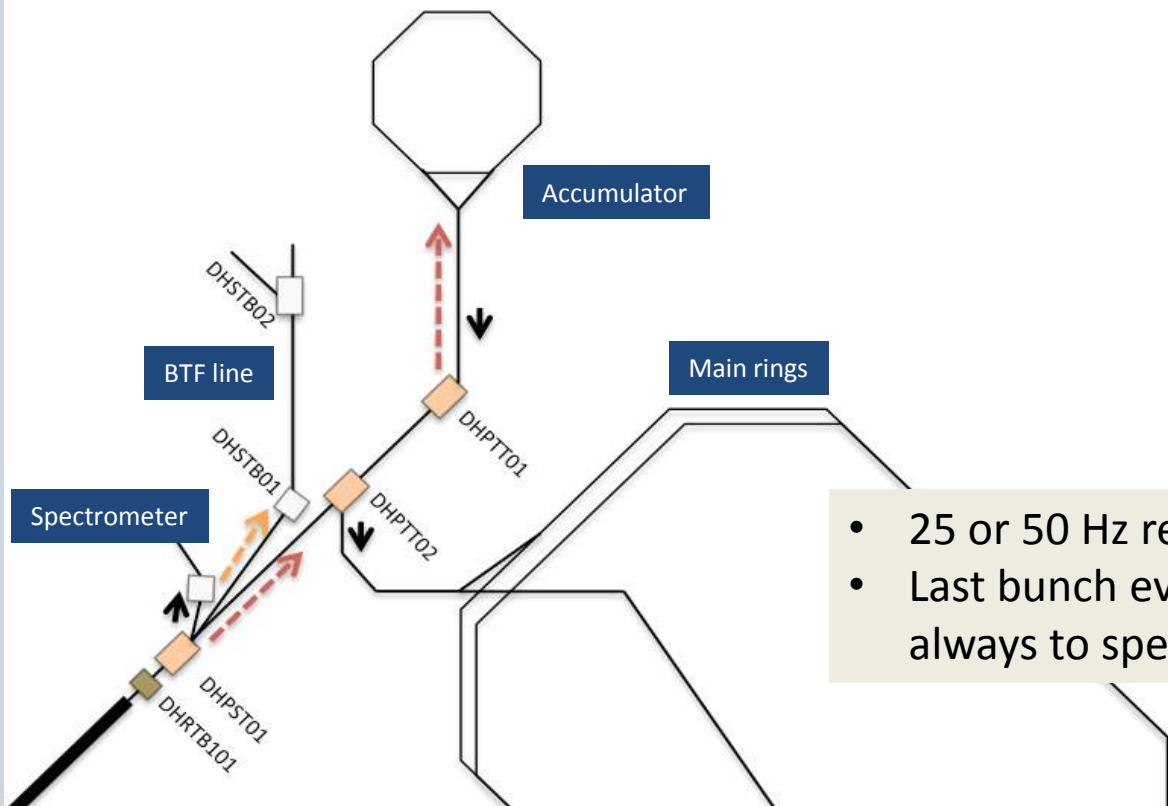
$$\left| \frac{\Delta E}{E} \right| = \frac{h}{2\rho} + \sqrt{2} \left| x'_0 \right|_{MAX}$$

Maximum input divergence:

$$\left| x'_0 \right|_{MAX} = \frac{d}{D}$$

Aperture d , Thickness D



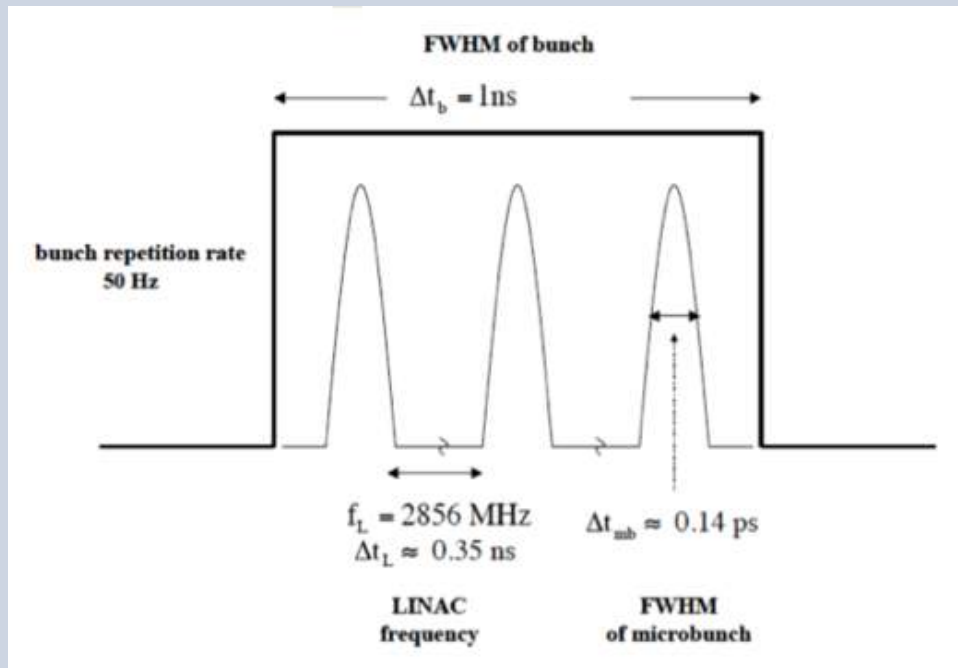


- 25 or 50 Hz repetition rate
- Last bunch every second always to spectrometer line

DAΦNE phases of the complex LINAC, BTF and DAΦNE:

- **LINAC** = LINAC shots are delivered at 25(50) pulse per second and dumped at the end of TL
- **LINAC+BTF** = LINAC shots are delivered with a selectable duty cycle to BTF from 1 to 24(49) pulse per second. The remaining are dumped at the end of the TL
- **GLOBAL** = LINAC shots are delivered with a variable duty cycle to BTF in dependance of the injection parameter in ACCUMULATOR
 - NO INJECTION => SELECTABLE from 1 to 24(49) pulse per second
 - INJECTION => the injection needs are DAΦNE CR controlled. Typically an injection sequence pulses at 2Hz, taking from 1 up to 7 LINAC bunches per sequence. BTF delivers 22 down to 10 bunches per second

Fascio dal LINAC



Parameter	Value
Maximum rep. rate	1-25 Hz [50 Hz]
Pulse duration	1.4 → 40 ns
Linac frequency	2,856 GHz
Microbunching period	~350 ps
Nominal energy	510 MeV

Electron phase par	Value
Tunable Energy	300->750 MeV
Nominal charge	$3 \times 10^{10} \text{ e}^-/\text{bunch}$
Nominal current	500mA

Positron phase par	Value
Tunable Energy	300->550 MeV
Nominal charge	$5.5 \times 10^9 \text{ e}^+/\text{bunch}$
Nominal current	85mA



BTF line experimental hall

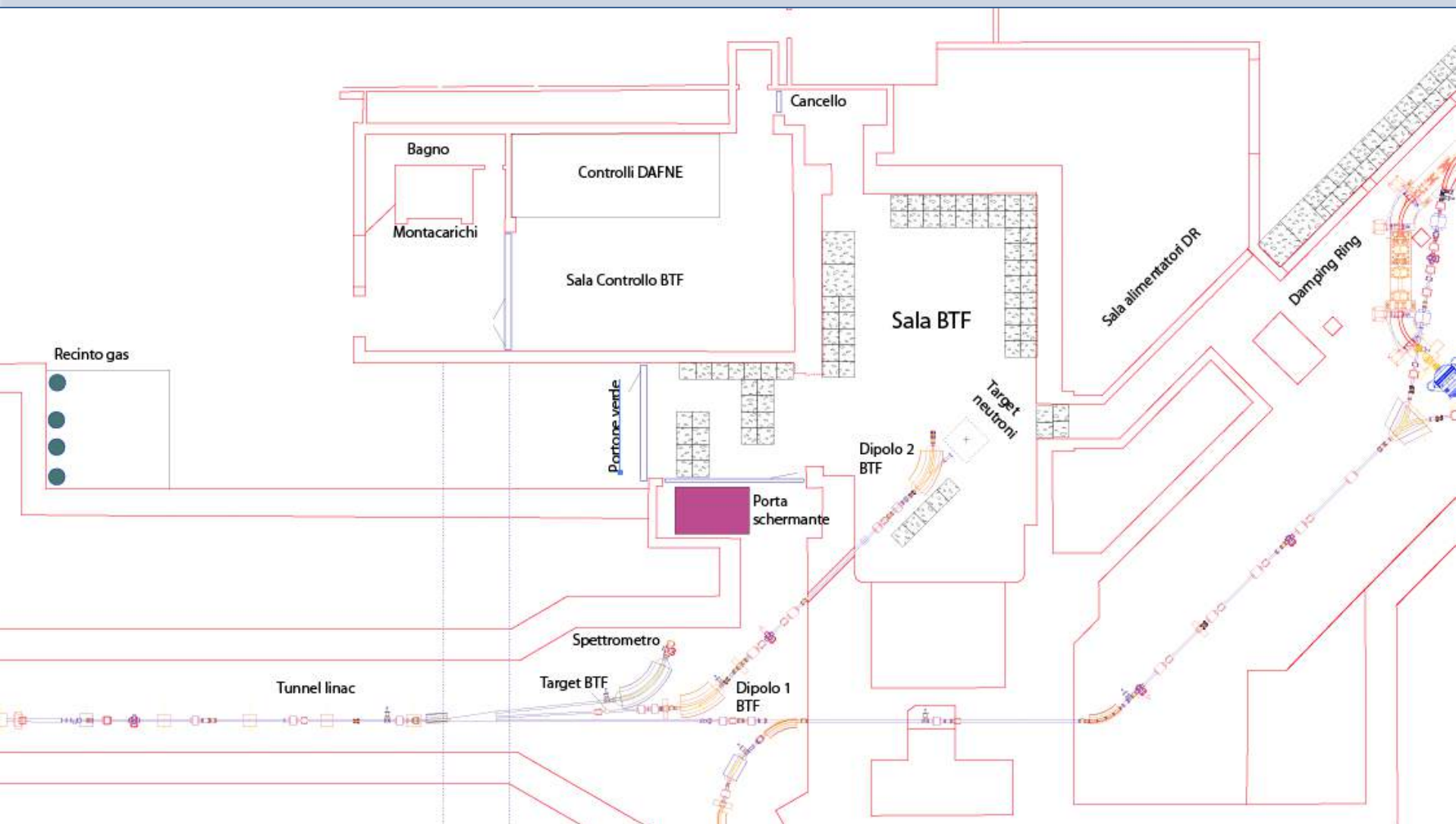


45° line

- Equipped with detector testing gadgets:
 - Remote-control table
 - Beam spot and intensity diagnostic for medium and low intensity beams

Straight line

- Slightly more background
- Used for neutron photoproduction or high-intensity tests
- Equipped with fluorescence flag





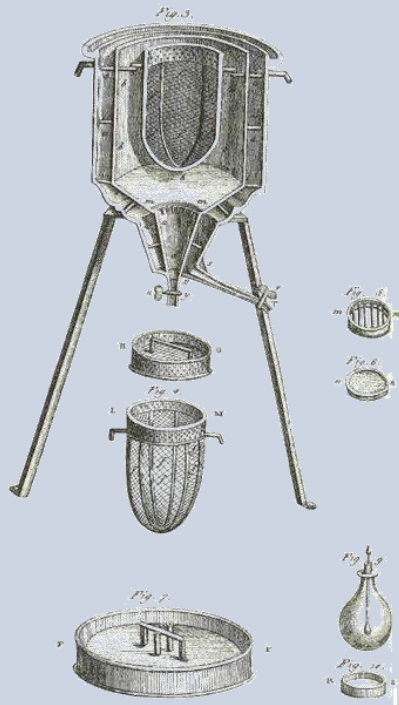
Calorimetria

Paolo Valente

paolo.valente@roma1.infn.it



- *Introduzione*
- *Lo sciame elettromagnetico*
- *I calorimetri*
 - *Risoluzione energetica*
 - *Contenimento longitudinale e trasversale*
 - *Tipologie di calorimetri*
 - *Calorimetri omogenei e a campionamento*
 - *Segnale di un calorimetro*
 - *Effetto Cerenkov*
 - *Calibrazione e mip*
- *Lo sciame adronico*
- *I calorimetri adronici*
- ***Esempi di calorimetri***



Un **calorimetro** è un dispositivo utilizzato in **calorimetria** per misurare il flusso di **calore** durante una **trasformazione**, come **calori specifici**, **calori latenti** di **fusione/ebollizione** e **calori di reazione**. Se il calorimetro è formato da una miscela di due **fasi** di una stessa sostanza, esso è detto **isotermico**.

■ Calorimetro delle mescolanze (o ad acqua, o di Regnault)

È costituito da un **vaso di Dewar** in cui viene versata dell'acqua e, successivamente, la sostanza in esame; all'interno del calorimetro è posto un **termometro** e un **agitatore**. Il calore specifico della sostanza viene dedotta dalla variazione di temperatura dell'acqua: a causa della non nulla capacità termica del calorimetro è necessario introdurre un *equivalente in acqua* del calorimetro, che tenga conto del calore assorbito o ceduto da esso durante la misura.

■ Calorimetro a ghiaccio (o di Lavoisier e Laplace)

Il calorimetro a ghiaccio è un calorimetro isotermico formato da tre recipienti concentrici: nel più interno si colloca il corpo in esame; in quello intermedio il ghiaccio; in quello più esterno si colloca dell'altro ghiaccio che ha la funzione di **isolante**, evitando che il calore dell'ambiente esterno sciogla il ghiaccio del recipiente intermedio. In base alla quantità d'acqua che fuoriesce dal recipiente intermedio mediante un apposito condotto si può misurare il calore fornito dal corpo nel contenitore più interno, ed eventualmente calcolarne il calore specifico.

■ Calorimetro di Bunsen

In **fisica delle particelle** un calorimetro è un rivelatore di particelle, delle quali misura l'energia.



Introduzione (2)

Un calorimetro, in fisica delle alte energie, è uno strumento che **misura l'energia delle particelle**.

Alcuni **aspetti salienti** sono:

- Ha una risposta **proporzionale** all'energia della particella
- Effettua una misura **distruttiva** [assorbe completamente la particella]
- La risoluzione **migliora** al crescere dell'energia; questo al contrario, ad esempio, della misura dell'impulso con uno spettrometro
- Può essere l'unico rivelatore di cui si compone un esperimento
- A volte fornisce un'informazione che altri rivelatori non possono dare, per esempio:
 - **rivela particelle neutre**
 - **misura l'energia mancante E_T**

(continua...)

(... *continua*)

- Spesso, in congiunzione con altri rivelatori o da solo, permette di **identificare** il tipo di particella [esempio: misura di E/p]
- Spesso contribuisce alla formazione del **trigger** dell'esperimento
- Spesso svolge anche altre funzioni [**assorbitore** per rivelazione dei muoni, **magnete**, ecc.]
- Oltre alla **risoluzione in energia** sono importanti anche altri aspetti:
 - la **risoluzione temporale** e la **velocità** dei segnali
 - la **linearità dell'energia** e la sua **calibrazione**
 - la **granularità** [risoluzione in posizione, PID]



Introduzione (4)

Considerando un calorimetro “classico”, la variazione di temperatura è data da:

$$\Delta T = E/(cM)$$

*Quindi, se **tutta** l'energia viene trasformata in **calore**, per una particella di **1 GeV** in **1 litro** di **acqua** ($c=1$, $M=1$ Kg) la temperatura si alza di $\Delta T=3.8 \times 10^{-14}$ K.*

Ci deve essere qualche altro meccanismo all'opera...

Interazione radiazione/materia

Interazioni
elettromagnetiche

[Interazioni
adroniche]

Fotoni

Particelle cariche

Effetto foto-elettrico

Ionizzazione

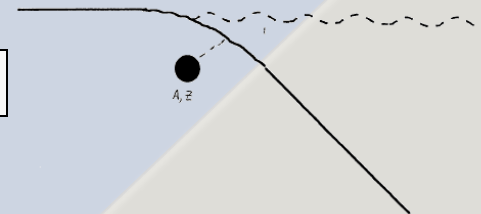
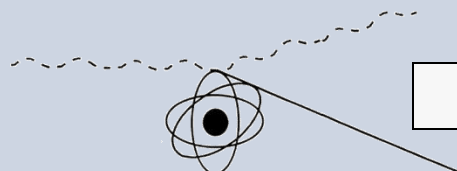
Diffusione Compton

Bremsstrahlung

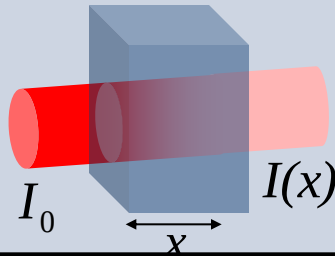
Produzione coppie

Effetto Cherenkov

Da vedere a parte...

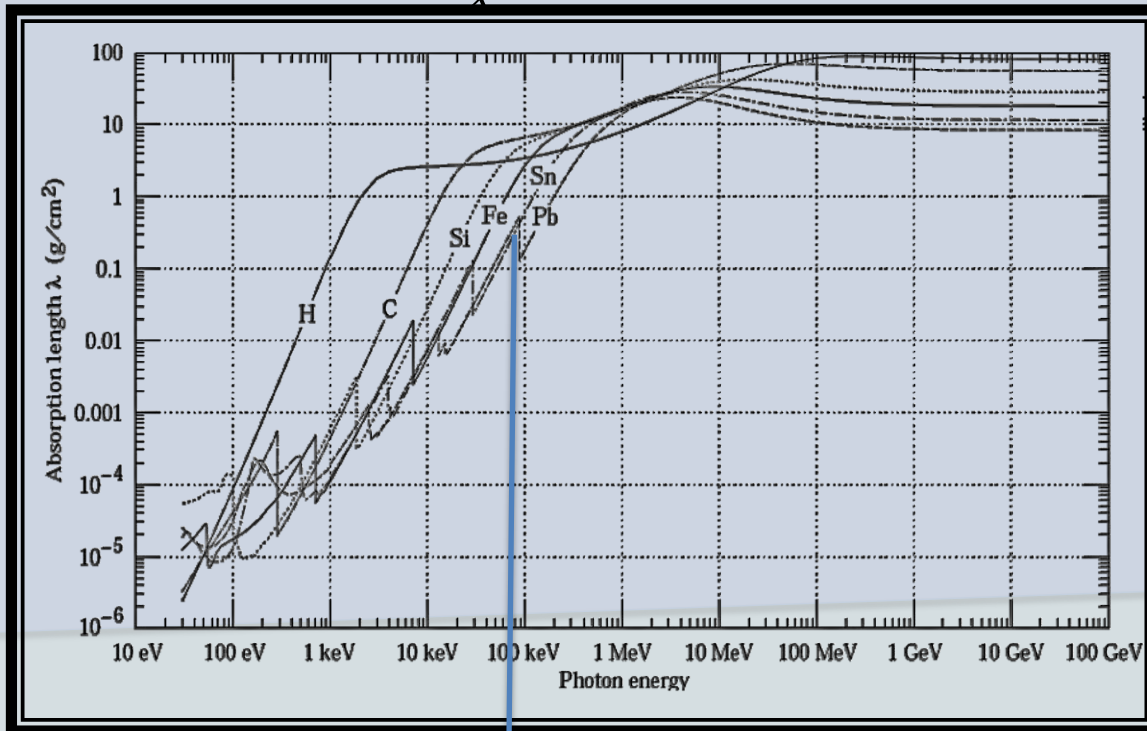


Interazione radiazione/materia (γ)



$$I(x) = I_0 e^{-(\mu/\rho)x} = I_0 e^{-x/\lambda}$$

μ/ρ = coeff. di attenuazione
 λ = lunghezza di attenuazione



Shell elettroniche più interne

Per materiali diversi, si hanno diversi andamenti di λ in funzione dell'energia del fotone.

La sezione d'urto totale può essere espressa in termini di λ :

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \frac{A}{N_A}$$

A = massa atomica
 N_A = numero di Avogrado

Interazione radiazione/materia (γ)

Fotoni

Effetto foto-elettrico

$$\sigma \propto Z^5, E^{-3}$$

Domina a bassa E (<MeV)

Distribuzione angolare ~isotropa

Diffusione Compton

$$\sigma \propto Z, E^{-1}$$

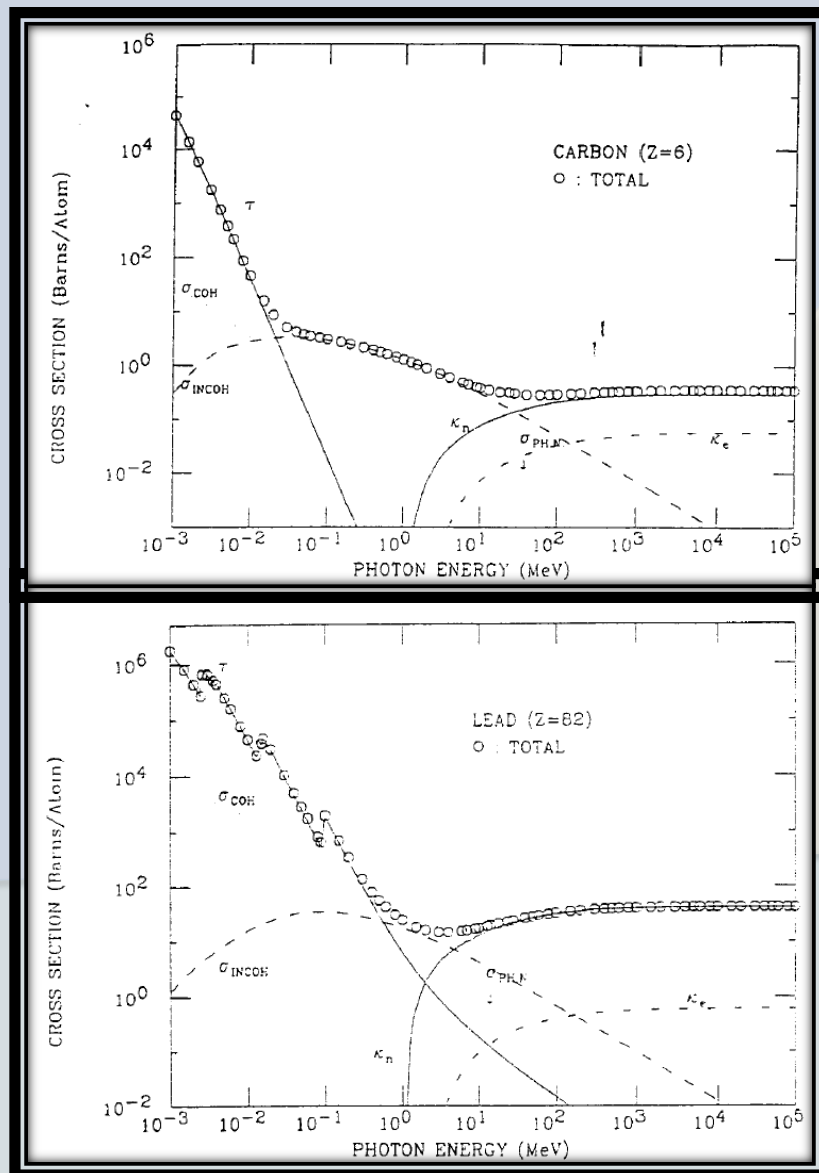
Distribuzione angolare ~isotropa

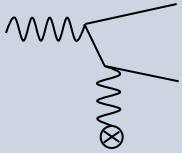
Produzione coppie

$\sigma \propto Z^2$, praticamente
indipendente da E

Domina a alta E (>MeV)

Distribuzione angolare ~1/ γ





$$-\left(\frac{dE}{dX}\right)_{\text{coppie}} \approx r_e^2 4\alpha Z^2 \left[\frac{7}{9} \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \right]$$

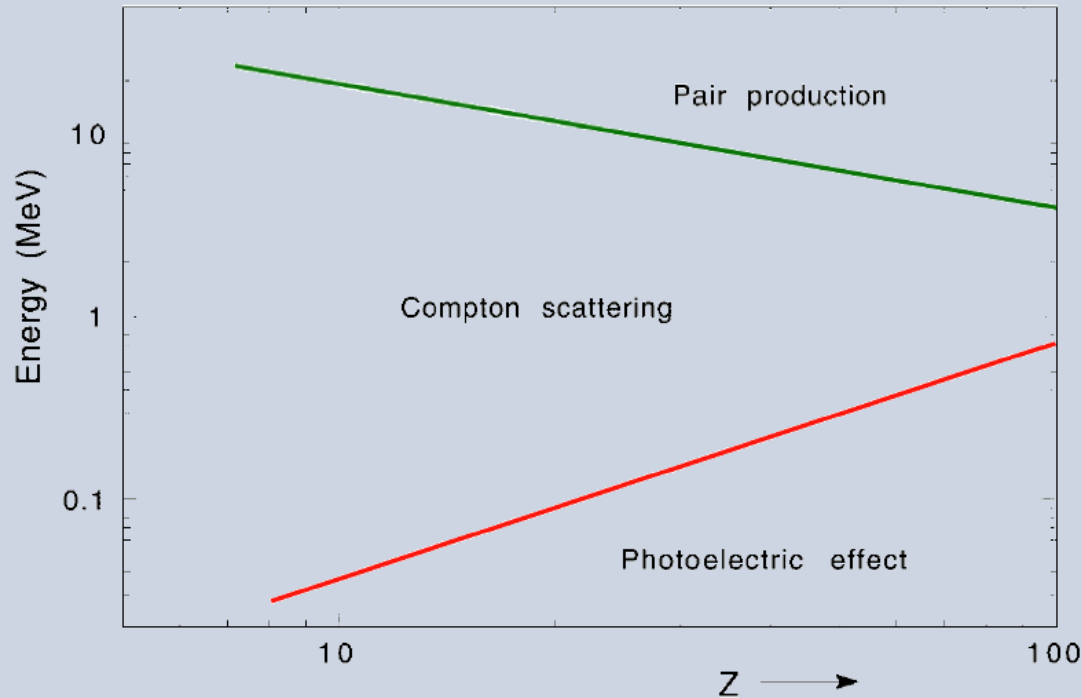
Per “alte” energie: $E \gg 137/Z^{1/3}$

Diagramma di Feynman

Possiamo definire λ_{coppie} , la **lunghezza di attenuazione** (ovvero quella per cui l'elettrone perde $(1 - e^{-1}) \sim 68\%$ della sua energia iniziale) **per produzione di coppie**:

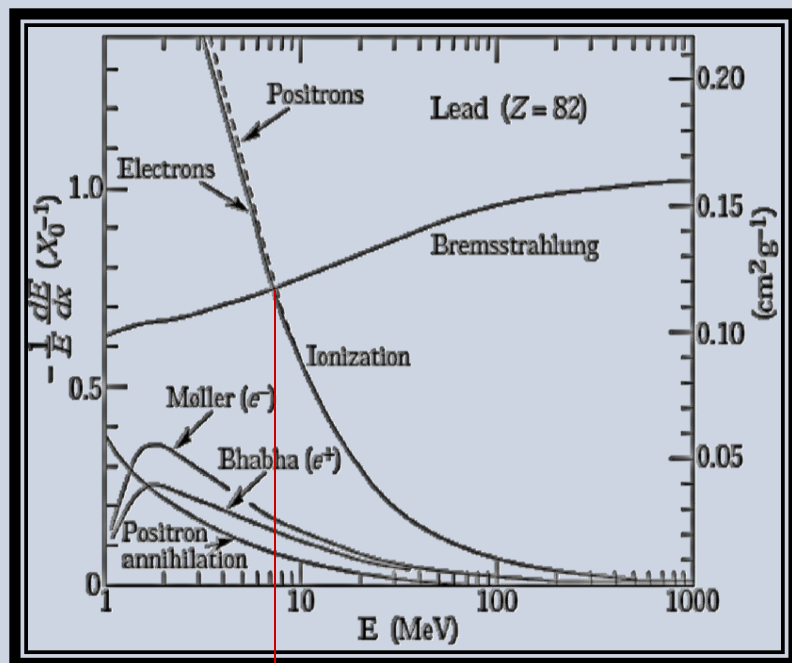
$$\lambda_{\text{coppie}} = \frac{9}{7} \frac{A}{N_A} \frac{1}{r_e^2 4\alpha Z^2 \ln\left(183/Z^{1/3}\right)}$$

Interazione radiazione/materia (γ)



Domini di energia in cui sono dominanti i diversi processi in funzione del numero atomico Z del materiale assorbitore

Interazione radiazione/materia ($e^\pm$)



L'energia critica, E_C è quella per cui:

$$(dE/dx)_{ion} = (dE/dx)_{rad}$$

$$E_C \sim 610 \text{ MeV}/(Z+1.24)$$

Particelle cariche

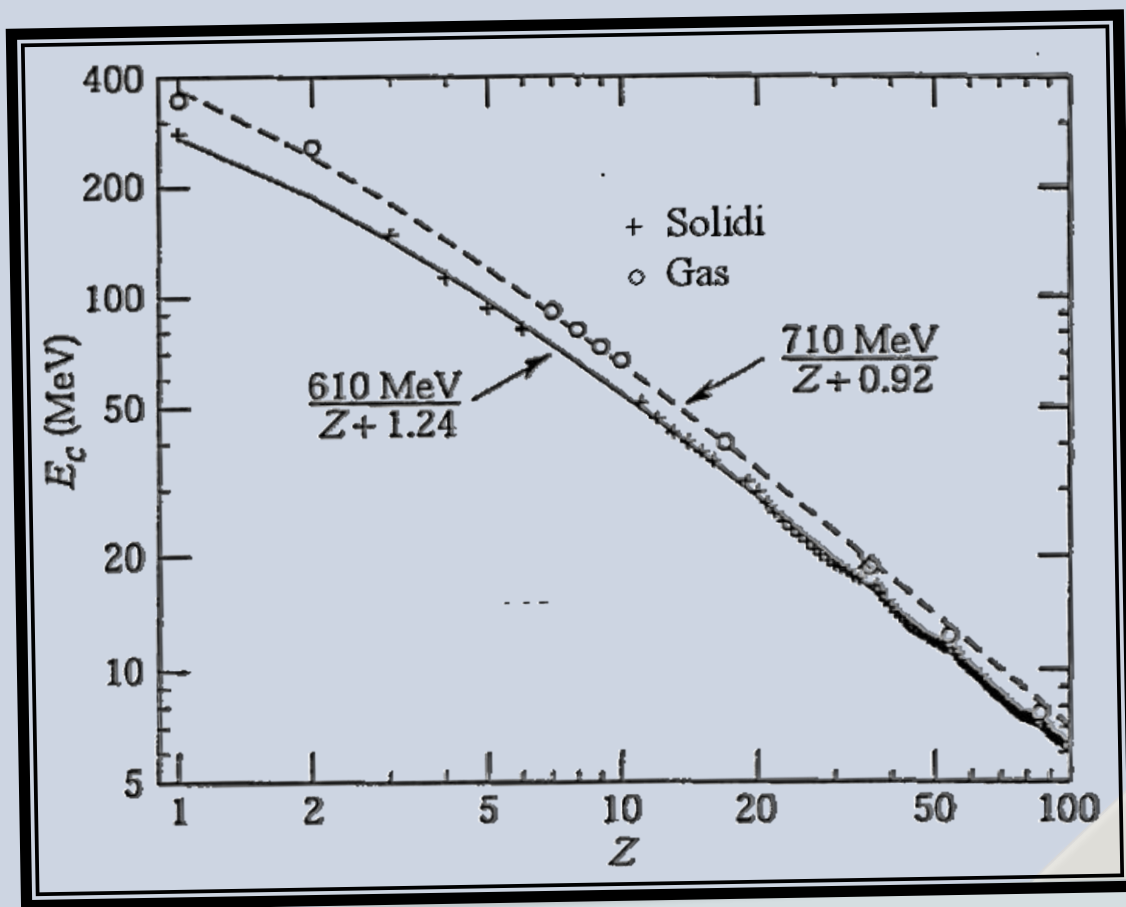
Ionizzazione

Domina a bassa E

Bremsstrahlung

Domina ad alta E

Effetto Cherenkov



there is a substantial difference in ionization at the relevant energy because of the density effect.



Bremsstrahlung

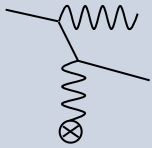


Diagramma di Feynman

$$-\left(\frac{dE}{dX}\right)_{rad} \approx r_e^2 4\alpha Z^2 \left[\ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \right]$$

Possiamo definire x_0 , la **lunghezza di attenuazione per radiazione**:

$$x_0 = \frac{A}{N_A} \frac{1}{r_e^2 4\alpha Z^2 \ln\left(183/Z^{1/3}\right)}$$

Possiamo allora notare come la produzione di coppie e la Bremsstrahlung siano intimamente legate [basta in effetti guardare i diagrammi di Feynman] e dunque come ad alte energie siano descritte da due lunghezze di attenuazione molto simili:

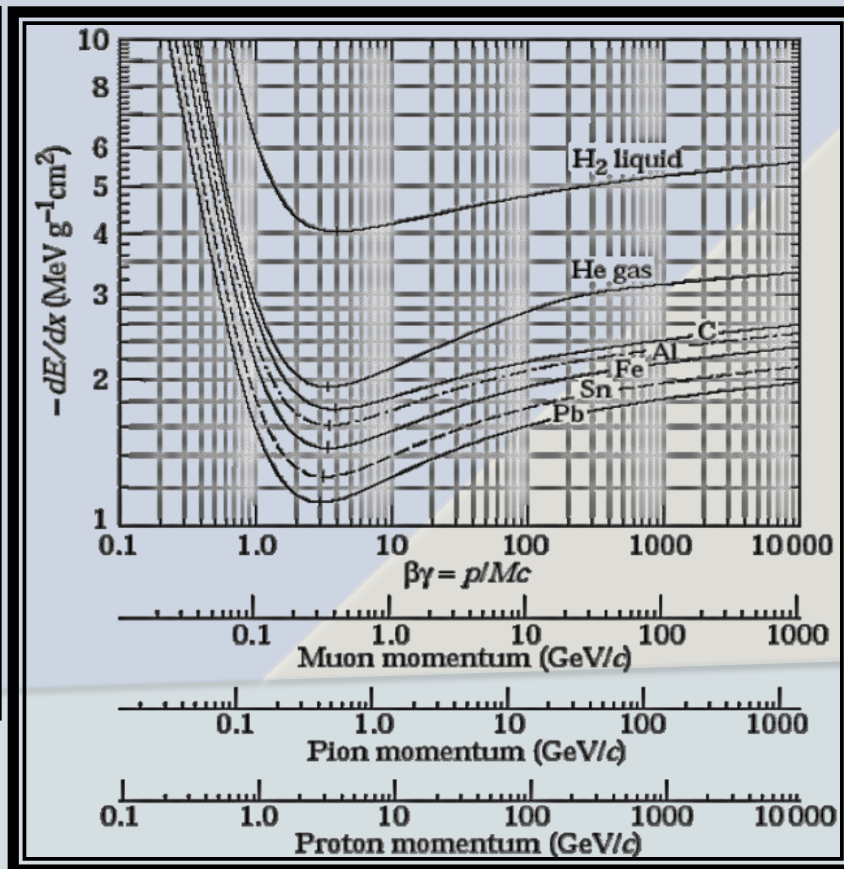
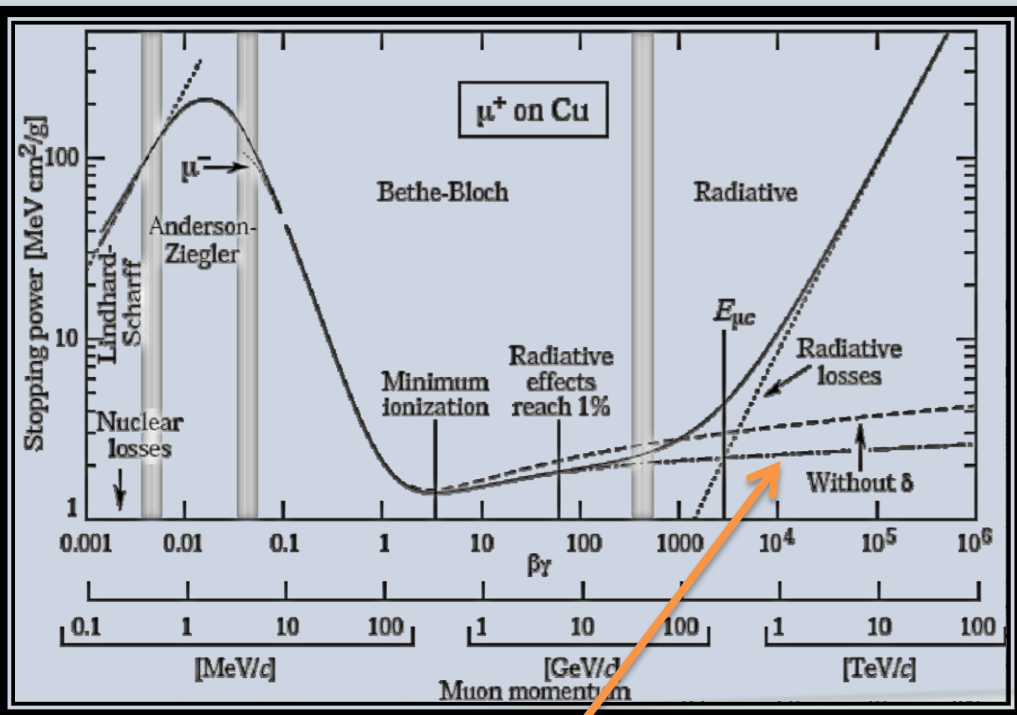
$$\lambda_{coppie} = 9/7 x_0$$

Ovvero la probabilità di irraggiare per un elettrone è $\approx$ alla probabilità che un fotone converta.

Questo conduce immediatamente a concepire, ad alta energia, un processo a cascata: lo sciame elettromagnetico...

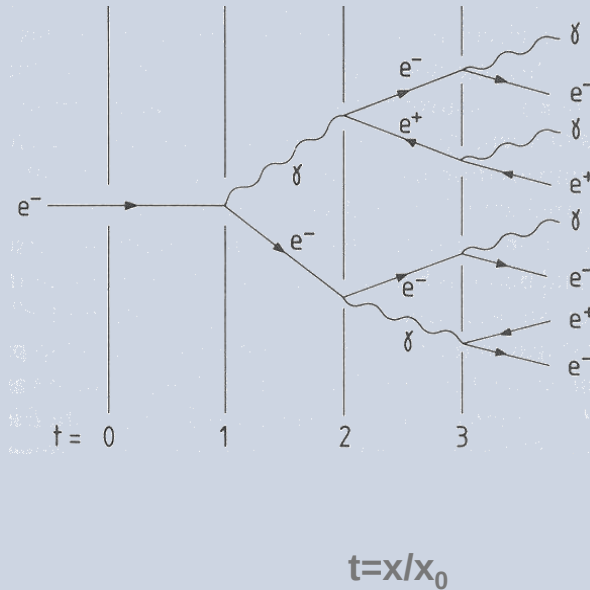
Dipendenza dall'impulso [velocità] della particella

Dipendenza [debole] dal materiale



Tcut – massimo momento trasferito
Energia depositata vs Energia persa
Energetic knock-on electrons (δ rays)

Lo sciame elettromagnetico



In media, attraversato uno spessore $\approx$ pari a x_0 un elettrone produce un γ per Bremsstrahlung

il quale a sua volta in $9/7 x_0$ mediamente converte in una coppia e^+e^- ,

i quali a loro volta irraggiano altri fotoni...

...e così via, almeno fino a quando l'energia delle singole particelle resta "alta"

*Il parametro per definire se l'energia è abbastanza alta da far dominare i processi radiativi come abbiamo visto è l'**energia critica**.*

*In realtà si fanno una serie di **approssimazioni** per arrivare ad un **modello dello sciame elettromagnetico**...*

Assunzioni/semplicizzazioni:

- $\lambda_{\text{coppie}} \approx X_0$
- e^+ ed e^- si comportano allo stesso modo
- Si trascura la perdita di energia per ionizzazione o eccitazione per $E > E_c$
- Ciascun elettrone di energia $E > E_c$ cede $\frac{1}{2}$ della sua energia per Bremsstrahlung a un fotone dopo $1 X_0$
- Ciascun γ di energia $E > E_c$ produce una coppia dopo $1 X_0$; ciascuno dei e^+/e^- prende $\frac{1}{2} E$
- Elettroni di energia $E < E_c$ non irradiano **e perdono l'energia residua per collisione**

- Il numero di particelle cresce esponenzialmente con $t = x/X_0$
- C'è un ugual numero di elettroni, positroni e fotoni

$$N(t) = 2^t = e^{t \ln 2}$$

$$E(t) = \frac{E_0}{2^t}$$

*per il momento non consideriamo i meccanismi che trasformano questa energia in un segnale misurabile

- L'energia E' viene raggiunta dopo uno spessore: $t(E') = \ln(E_0/E') / \ln 2$
- Numero di particelle con energia almeno E' : $N(E > E') = 1 / \ln 2 \cdot E_0 / E'$

- Lo sviluppo dello sciame è massimo per $E = E_c$

$$t_{\text{max}} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}$$

$$N_{\text{max}} = e^{t_{\text{max}} \ln 2} = E_0 / E_c$$

Lo sciame elettromagnetico

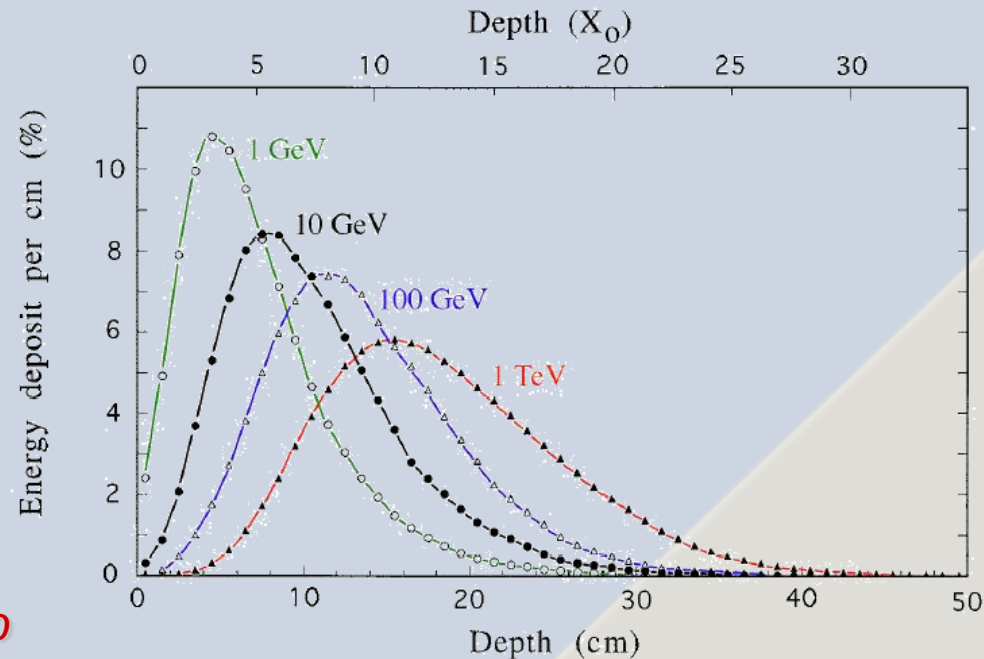
Il modello di Rossi è molto semplificato, ma permette comunque di fare alcune interessanti osservazioni

- Il massimo dello sviluppo dello sciame avviene ad una profondità che cresce solo con il logaritmo dell'energia $t_{max} \sim \ln(E_0)$

- Questo permette di realizzare rivelatori compatti ovvero di assorbire gli sciame originati da particelle anche di energia molto elevata

- Il numero di particelle nello sciame è proporzionale all'energia E_0 (in particolare il numero di e^+/e^- che per $E < E_c$ perdono la loro energia residua per ionizzazione): l'energia misurata è proporzionale a E_0 .

$$N_{e^+e^-} = \frac{2}{3} \times 2 \frac{E_0}{E_c} = \frac{4}{3} \frac{E_0}{E_c}$$





Risoluzione energetica

Alla fine dello sciame, l'energia della particella incidente E_0 , viene ceduta alle particelle secondarie che alla fine la cederanno al materiale di cui è costituito il calorimetro per collisione/ionizzazione.

*Supponendo che questa energia possa essere convertita in un segnale misurabile con dei meccanismi **proporzionali**, l'energia misurata sarà proporzionale a E_0*

Assumendo la statistica di Poisson per le fluttuazioni del numero di particelle nello sciame, si ottiene che il risultato che la **risoluzione migliora in ragione della radice quadrata dell'energia**

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{1}{\sqrt{N_{e^+e^-}}} = \frac{\sqrt{3E_c}/2}{\sqrt{E}}$$

$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

Più **in generale**, occorre considerare anche termini che invece:

- non dipendono dall'energia [dovuti per es. al rumore elettronico]
- dipendono linearmente dall'energia [risposta non lineare, calibrazione]

Contributi alla risoluzione

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{a}{\sqrt{E}} \oplus b \oplus \frac{c}{E}$$

Termine stocastico

Termine costante

Termine di rumore

- Fluttuazioni del numero di particelle nello sciame

→ Si traduce nelle fluttuazioni del numero di quanta che costituiscono il segnale rivelabile, tipicamente foto-elettroni

- Fluttuazioni del sampling

- Non totale contenimento dello sciame [**leakage**]

- Non uniformità della risposta

- Errori di calibrazione

- Rumore elettronico, fluttuazioni del piedistallo

Verifica in
BTF!!!

*Il termine stocastico è determinato dalle fluttuazioni del numero di quanta che costituiscono il segnale, tipicamente **fotoelettroni***

Le fluttuazioni del numero di fotoelettroni può essere messa in relazione alla risposta del calorimetro espressa come numero di fotoelettroni per GeV: n_{pe}

$$\left(\frac{\sigma(E)}{E} \right)_{pe} = \sqrt{\frac{1}{\langle n_{pe} \rangle}}$$

Per comprendere i dettagli dello sviluppo dello sciame, tuttavia, il modello di Rossi è troppo semplificato...

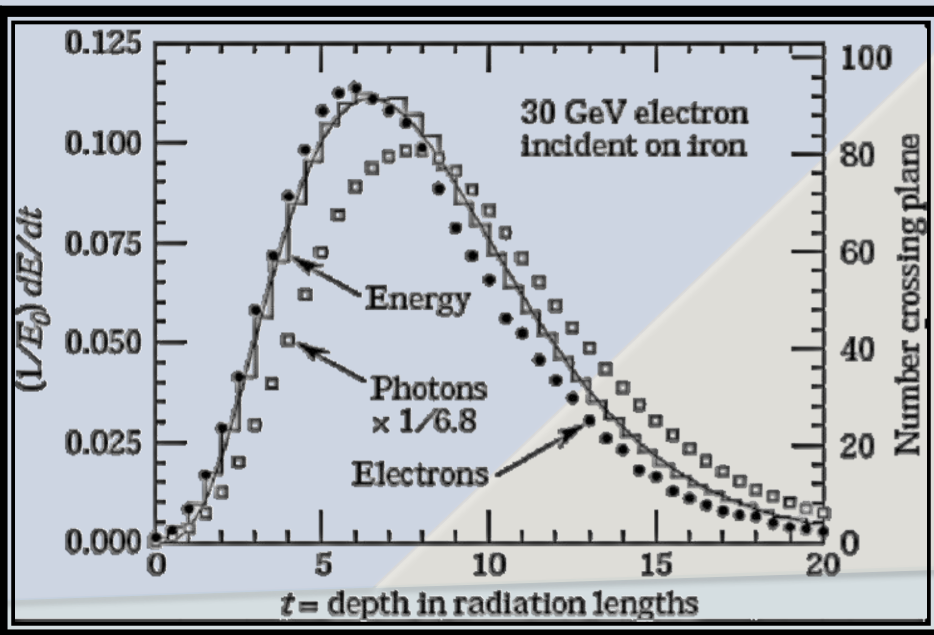
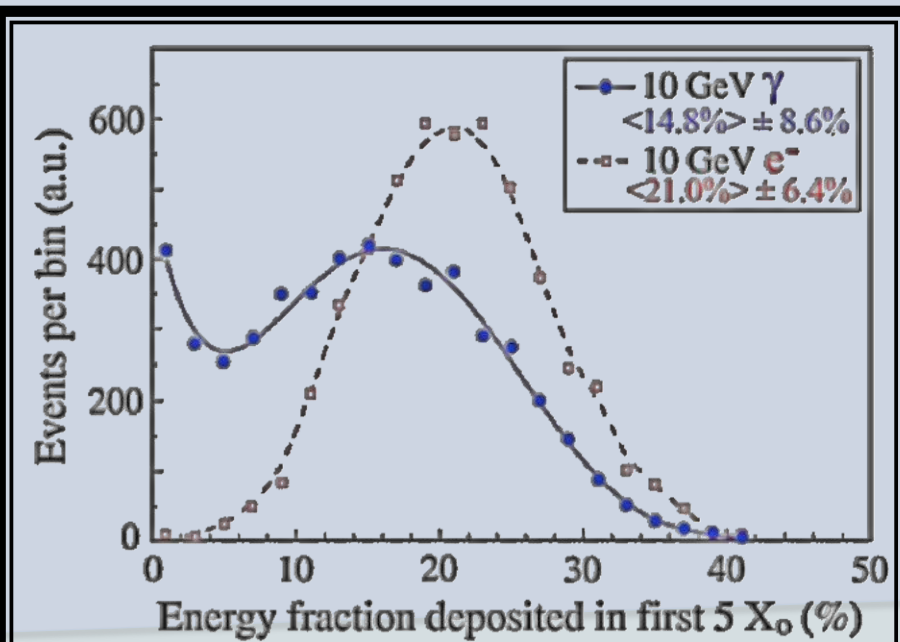
Una possibilità, dal momento che le sezioni d'urto – ovvero le probabilità in funzione dell'energia per le diverse particelle [e e γ] – per i vari fenomeni sono ben note, è quella di realizzare una simulazione con metodi Monte Carlo dello sciame elettromagnetico, “seguendo” ciascuna particella secondaria nelle sue interazioni con il materiale.

Diversi software dedicati sono stati sviluppati nel corso degli anni, prima per la sola parte e.m. [EGS, GEANT], poi anche per quella adronica [CORSIKA, FLUKA]

Ovviamente un'altra possibilità è quella di seguire lo sviluppo del deposito di energia sperimentalmente, grazie alla segmentazione del calorimetro [possibile ad esempio con calorimetri a sampling con rivelatori traccianti o a fibre scintillanti lette individualmente...]

Contenimento longitudinale

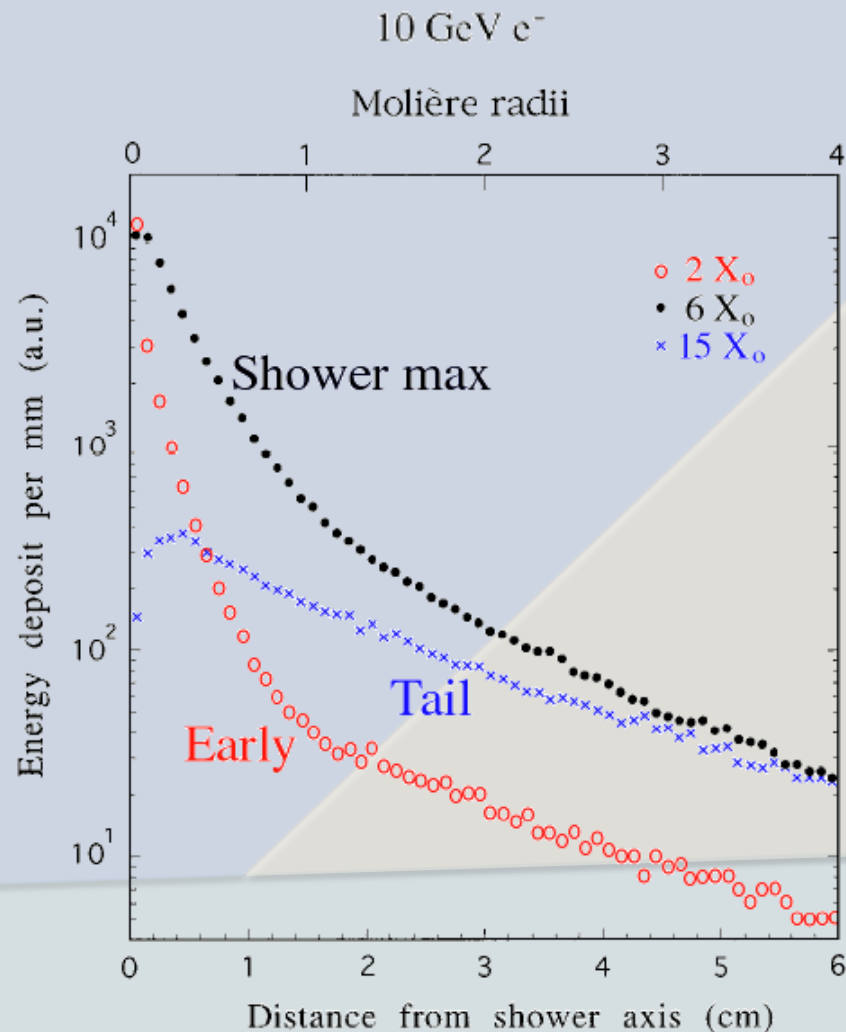
- Ci sono, intanto, importanti differenze nello sviluppo dello sciame iniziato da un **fotone** rispetto a quello iniziato da un **elettrone**: lo sciame si svilupperà più in profondità;



L'allargamento nel piano trasverso o laterale dello sciame è causato principalmente da due fenomeni:

- *la **diffusione Coulombiana multipla** [multiple scattering] delle particelle secondarie cariche (e^+/e^-). Questo effetto domina nelle prime x_0 [componente "Early"]*

- *I fotoni uscenti dalla **diffusione Compton** che si allontanano dall'asse dello sciame. Questa componente è più importante in profondità [componente della coda o "Tail"]*



Le dimensioni laterali dello sciame sono descritte dal **raggio di Molière**, ρ_M :
entro $2 \rho_M$ è contenuto il **95% delle particelle** [cilindro infinitamente lungo]

Il raggio di Molière è proporzionale a x_0/E_C , quindi poiché $x_0 \propto A/Z^2$ e per l'energia critica $E_C \propto Z^{-1}$, vale:

$$\rho_M \propto A/Z$$

In particolare:

$$\rho_M = x_0 \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} \quad [g/cm^2]$$

*Fin qui abbiamo considerato l'interazione di una particella ionizzante con un generico **blocco di materiale**, senza considerare i meccanismi che trasformano l'energia persa dalle particelle secondarie dello sciame [in particolare e^+ ed e^-] in un **segnale misurabile***

[Inoltre, per semplicità, abbiamo considerato solo l'interazione elettromagnetica, quindi per il momento ci siamo ristretti ai soli elettroni e fotoni]

Possiamo considerare due principali tipologie di calorimetri:

Omogenei

*Sono costituiti da un unico materiale che al tempo stesso è sia il mezzo “denso” o **passivo** – nel quale si sviluppa e viene contenuto lo sciame – sia il mezzo **attivo**, ovvero nel quale avvengono i fenomeni fisici che danno un segnale.*

[Esempio classico: cristalli]

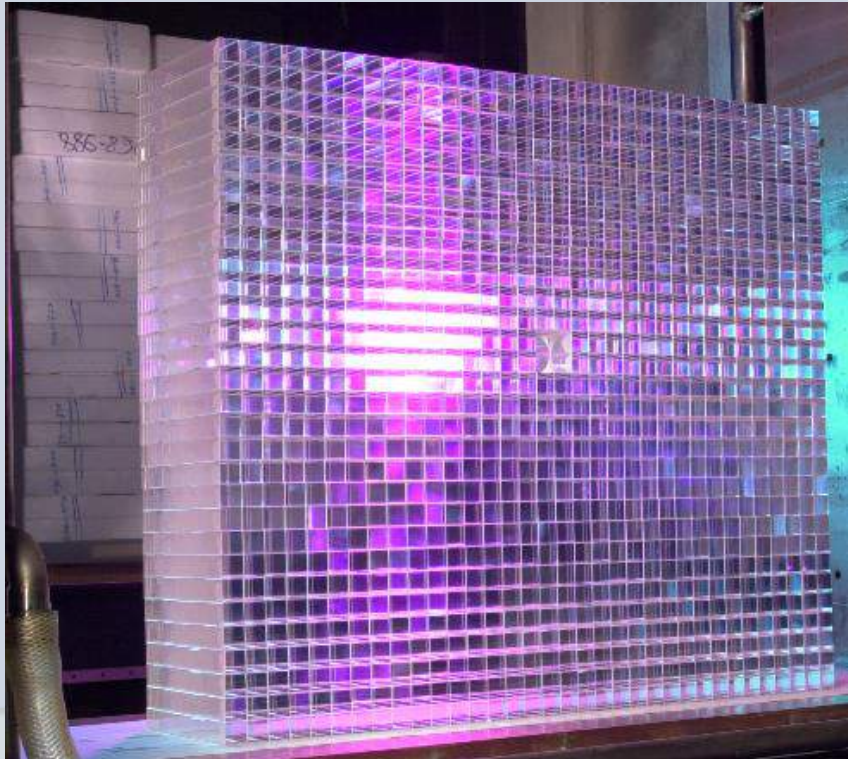
A campionamento [sampling]

*Sono costituiti da due (o più) materiali, uno **passivo** – tipicamente ad alta densità ed alto Z – e uno **attivo**, tipicamente con una configurazione **a strati alternati***

*[Esempio classico: calorimetri a **sandwich** o “tile”]*

*I fenomeni che nel materiale attivo convertono l'energia persa dalle particelle secondarie cariche dello sciame possono essere i più diversi: luce di **scintillazione**, emissione di fotoni **Cerenkov**, **ionizzazione**, bolometria, ecc.*

Omogenei



A campionamento [sampling]



Omogenei

Vantaggi:

- *Migliore risoluzione: tutto lo sciame viene rivelato*

Svantaggi:

- *In generale più costosi*
- *Per evitare spazi morti, generalmente minor granularità*

A campionamento [sampling]

Vantaggi:

- *Generalmente più semplici da realizzare, più facilmente segmentabili, meno costosi*

Svantaggi:

- *Peggior risoluzione: si rinuncia a rivelare parte dello sciame con un ulteriore contributo alle fluttuazioni [fluttuazioni del campionamento]*

L'energia persa per collisione/ionizzazione alla fine del range delle particelle cariche nello sciame deve essere in qualche modo convertita in un segnale, possibilmente mantenendo la proporzionalità con il numero di particelle secondarie [che è proporzionale ad E].

Scintillazione

*Alcuni materiali hanno proprietà note come **luminescenza**: assorbono energia e la riemettono sotto forma di luce visibile.*

- Se l'emissione avviene subito dopo l'assorbimento (10^{-8} s) il processo è chiamato **fluorescenza**.*
- Se invece l'emissione è ritardata (lo stato eccitato è metastabile) il processo si chiama **fosforescenza**. In questo caso il tempo fra l'assorbimento e la ri-emissione può durare dai μ s alle ore (dipende dal materiale).*

In prima approssimazione l'evoluzione temporale del processo di riemissione può essere descritto da una semplice legge esponenziale con un tempo tipico di decadimento.

Il tempo di assorbimento dell'energia (eccitazione degli atomi e delle molecole) è in generale molto più breve del tempo di ri-emissione.

*Quasi i materiali utilizzati come **scintillatori** hanno 2 componenti di ri-emissione, una veloce ed una lenta (fluorescenza e fosforescenza). Generalmente la componente veloce è quella che domina (e che ci interessa)*

$$N = Ae^{-t/\tau_f} + Be^{-t/\tau_s}$$

Sebbene esistano molti materiali scintillanti non tutti sono adatti per un rivelatore.

Un materiale per essere utilizzabile come scintillatore deve avere:

- 1.alta efficienza per convertire l'energia di eccitazione in fluorescenza*
- 2.trasparenza alla luce di fluorescenza in modo da poterla trasmettere*
- 3.emissione sulla lunghezza d'onda in cui funzionano i rivelatori di luce (generalmente luce visibile)*
- 4.una costante di tempo di decadimento t breve*

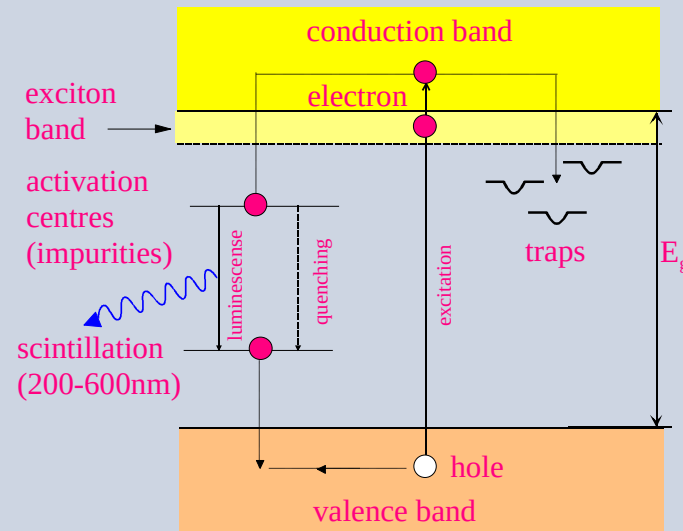
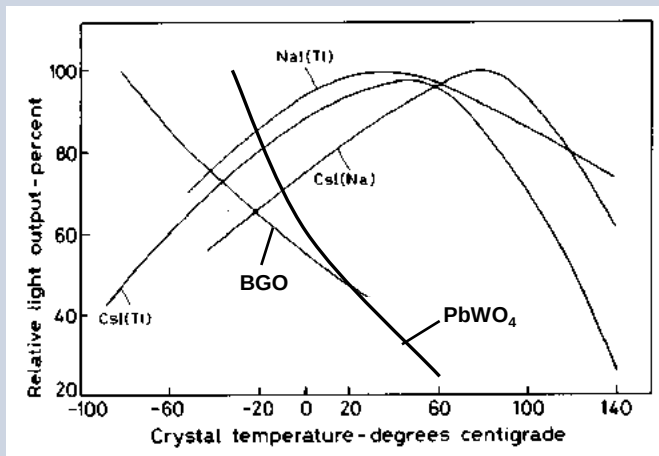
Esistono due grosse famiglie di scintillatori:

- quelli ottenuti da materiali **organici** [poca luce, ma veloci]*
- quelli da materiali **inorganici** [generalmente lenti ma con alta resa di luce]*

Scintillatori inorganici

Scintillatori inorganici cristallini:

NaI, CsI, BGO, PbWO₄, BaF₂, SF₆,...

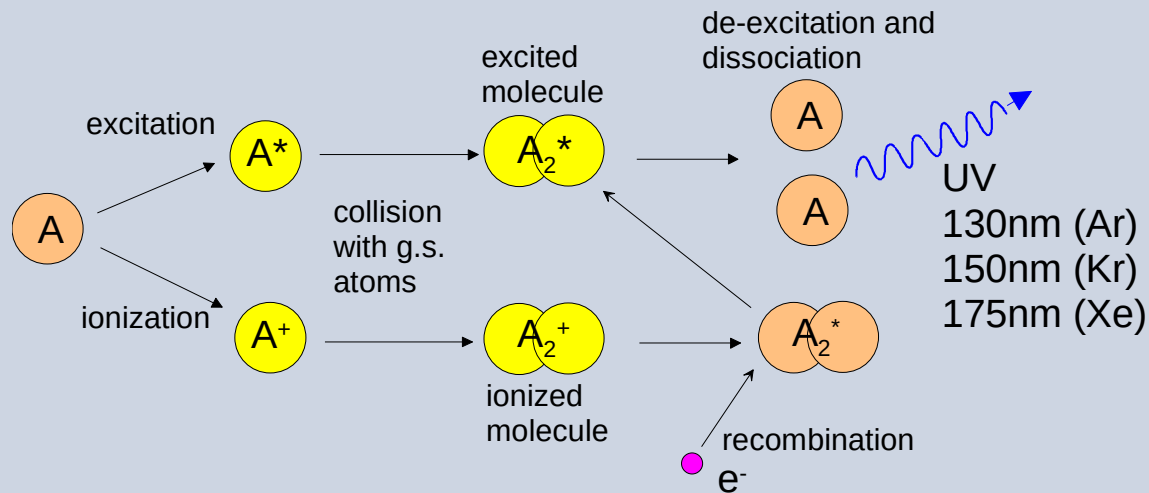


Generalmente sensibili all'umidità, forte dipendenza della resa di luce dalla temperatura, fragili, ecc.

*Ma possono essere densi e ad alto Z → **calorimetri omogenei***

Gas nobili liquidi:

Argon, Xenon, Krypton, ...



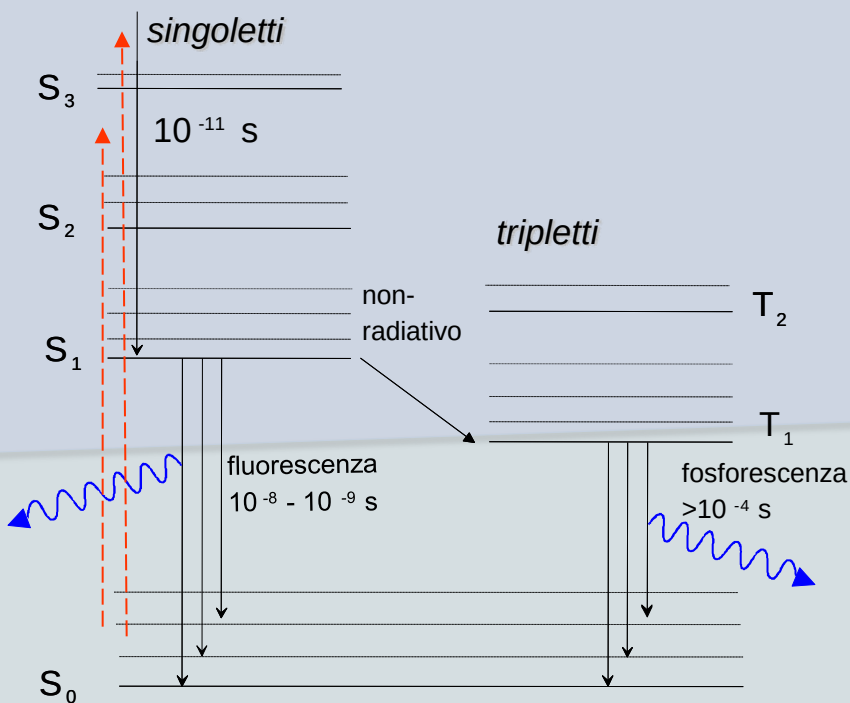
scintillatore	densità (g/cm ³)	indice rifrazione	lunghezza d'onda (nm)	costante di tempo (μs)	scintillaz. (relativa a NaI(Tl))	note	fotoni/MeV
NaI	3.67	1.78	303	0.06	190		
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	0.25	100	a 80 K	4x10 ⁴
CsI	4.51	1.80	310	0.01	6	a 80 K	
CsI(Tl)	4.51	1.80	565	1.0	45	a 80 K	1.1x10 ⁴
⁶ LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1.4	35	a 80 K	1.4x10 ⁴
BaF ₂	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		6.5x10 ³ 2x10 ³
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.13	2.15	480	0.30	10		2.8x10 ³
PbWO ₄	8.28	1.82	440,530				100
LAr	1.4	1.29	120-170	0.005/0.860		a 170 nm	
LKr	2.41	1.40	120-170	0.002/0.085		a 170 nm	
LXe	3.06	1.60	120-170	0.003/0.022		a 170 nm	4x10 ⁴

Gli scintillatori organici sono dei composti di idrocarburi che contengono delle strutture ad anello di benzene. In questi composti la luce di scintillazione deriva da transizioni degli elettroni di valenza liberi delle molecole.

Questi elettroni non sono associati ad un atomo particolare nella molecola ed occupano gli orbitali molecolari π .

Possono essere sotto forma di cristalli organici [antracene], liquidi o plastici [più usati] nel qual caso sono necessari dei solventi organici, per esempio polistirene

Stati molecolari



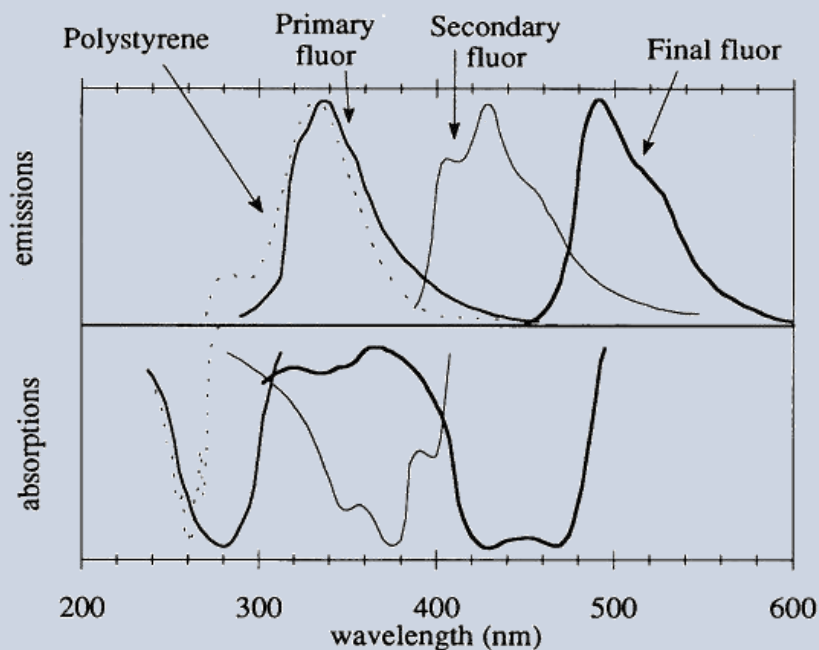
L'energia rilasciata dalla particella eccita sia i livelli elettronici che vibrazionali. (Linee rosse tratteggiate)

Le eccitazioni dello stato di singoletto decadono in ≤ 10 ps senza emettere radiazione (degradazione interna).

Dallo stato S_1 è facile decadere nello stato fondamentale S_0 con emissione di luce di fluorescenza in $1 \div 10$ ns.

Analogamente dallo stato di tripletto si arriva tramite degradazione interna allo stato T_1 e poi si scende a T_0 in maniera complessa con emissione di luce di fosforescenza (lenta $> 10^{-4}$ s)

<i>materiale</i>	<i>densità (g/cm³)</i>	<i>n</i>	<i>λ (nm)</i>	<i>τ (ns)</i>	<i>scint. rel antr</i>	<i>H/C</i>	<i>note</i>	<i>yeild/ NaI</i>
<i>naphthalene</i>	<i>1.15</i>	<i>1.58</i>	<i>348</i>	<i>11</i>	<i>11</i>	<i>0.800</i>	<i>monocrist.</i>	
<i>anthracene</i>	<i>1.25</i>	<i>1.59</i>	<i>448</i>	<i>30-32</i>	<i>100</i>	<i>0.714</i>	<i>monocrist.</i>	<i>0.5</i>
<i>NE 102 A</i>	<i>1.032</i>	<i>1.58</i>	<i>425</i>	<i>2.5</i>	<i>65</i>	<i>1.105</i>	<i>Nucl. Ent.</i>	
<i>NE 104</i>	<i>1.032</i>	<i>1.58</i>	<i>405</i>	<i>1.8</i>	<i>68</i>	<i>1.100</i>	<i>Nucl. Ent.</i>	
<i>NE 110</i>	<i>1.032</i>	<i>1.58</i>	<i>437</i>	<i>3.3</i>	<i>60</i>	<i>1.105</i>	<i>Nucl. Ent.</i>	
<i>BC 412</i>	<i>1.032</i>	<i>1.58</i>	<i>434</i>	<i>3.3</i>	<i>60</i>	<i>1.104</i>	<i>Bicron</i>	
<i>BC 414</i>	<i>1.032</i>	<i>1.58</i>	<i>392</i>	<i>1.8</i>	<i>68</i>	<i>1.110</i>	<i>Bicron</i>	
<i>BC 416</i>	<i>1.032</i>	<i>1.58</i>	<i>434</i>	<i>4.0</i>	<i>50</i>	<i>1.110</i>	<i>Bicron</i>	

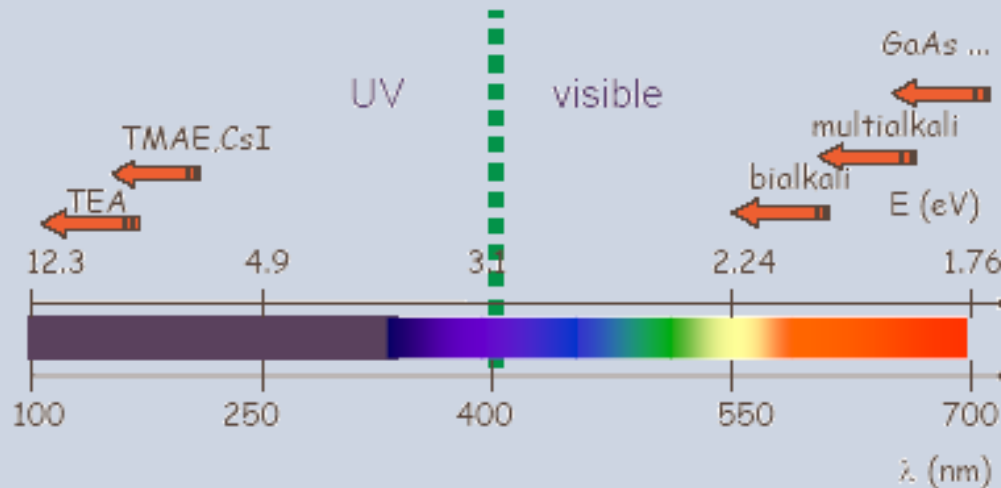


Wave-Length Shifting [WLS]

- *Scintillatore con diverso drogaggio...*
- *Assorbe la luce di una data lunghezza d'onda e la riemette a una lunghezza d'onda maggiore.*
- *Permette di raccogliere la luce da un rivelatore a scintillazione di grandi dimensioni mantenendo una risposta abbastanza omogenea.*

Esempio tipico: lastra di scintillatore letta da fibre WLS

Scopo dei vari fotorelevatori è quello di convertire la luce in segnali elettrici rivelabili. Lo spettro che ci interessa va normalmente dall'ultravioletto al visibile.



Ne esistono di diversi tipi: sottovuoto, come l'universale fotomoltiplicatore [PM], a gas, a stato solido [diodi, Silicon PM]

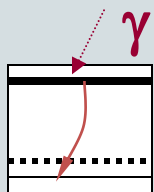
Il fotomoltiplicatore (PM) consiste in un catodo di materiale fotosensibile seguito da un sistema di raccolta degli elettroni, una sezione di moltiplicazione degli elettroni (dinodi) ed infine da un anodo dal quale si preleva il segnale elettrico. Tutto il sistema sta in un tubo di vetro sotto vuoto.

Quando è in funzione si alimenta con una tensione negativa il catodo (a massa l'anodo) ed i dinodi ad una tensione degradante dal valore catodico a quello dell'anodo, come si può ottenere da un partitore di tensione.

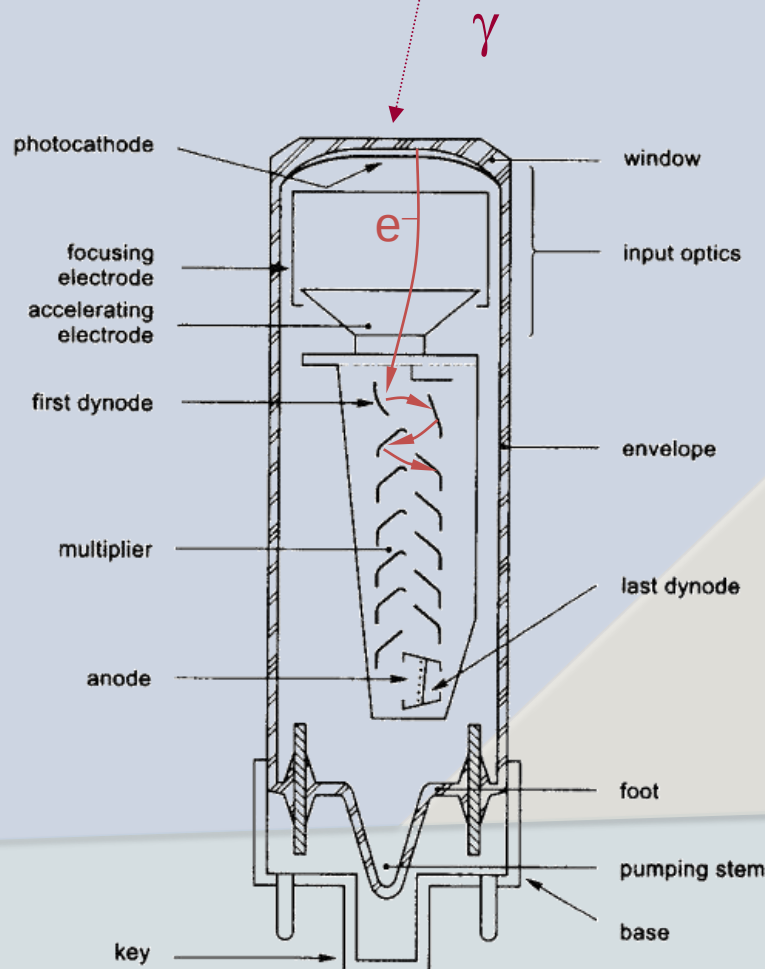
Quando un fotone urta il fotocatodo viene emesso un elettrone per effetto fotoelettrico. A causa della d.d.p. applicata viene focalizzato ed accelerato sul primo dinodo e, colpendolo, si ha emissione secondaria di elettroni.

I nuovi elettroni vengono accelerati dal campo elettrico sul secondo, terzo ... dinodo, producendo un fascio di elettroni diretti verso l'anodo.

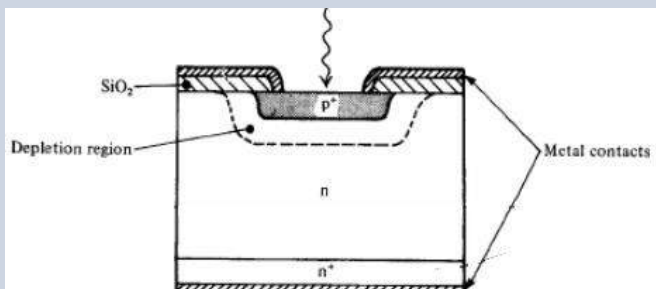
All'anodo questo sciame di elettroni viene raccolto e fornisce un segnale di corrente che può essere ulteriormente amplificato e analizzato.



Variante a 1 solo dinodo: fototriodo



Fotorivelatori a stato solido

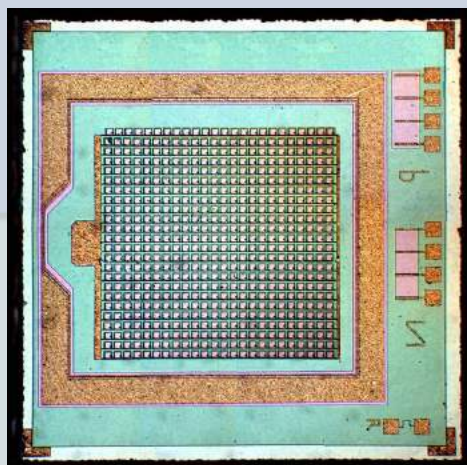
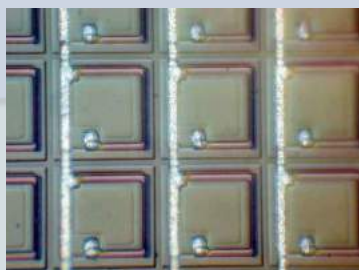
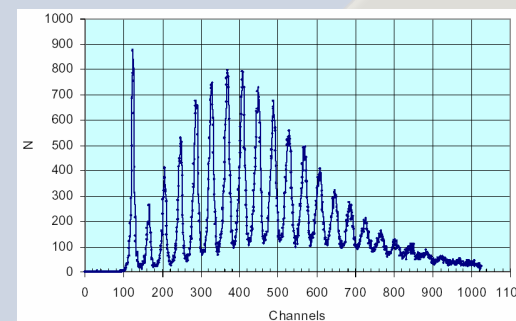
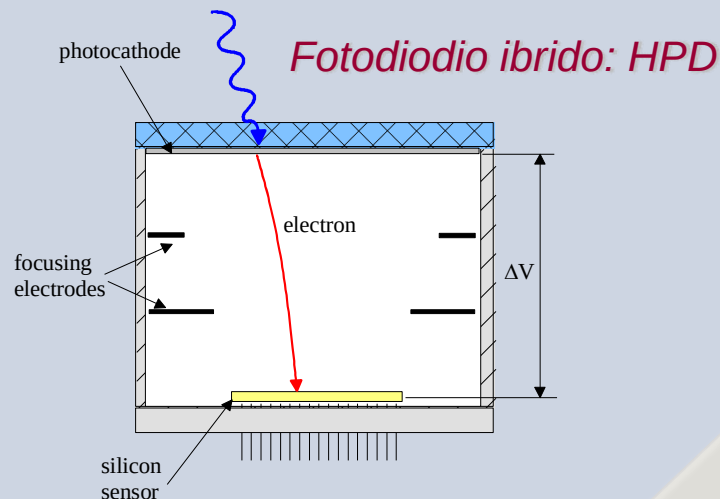


Fotodiode

Se γ ha energia superiore alla g_a : coppia e^-/h

Fotodiode a valanga [APD]

Campo elettrico elevato, altre coppie e^-/h dissociate



Silicon PM

Matrice quadrata di fotodiode

Ogni pixel (se colpito) produce lo stesso segnale

L' unica uscita somma tutti i pixel

Segnale = N di celle colpite

Segnale proporzionale al N . di fotoni (in assenza di saturazione)

Cherenkov Radiation

- **1888** predicted by O. Heaviside: Deformation of the electromagnetic field of a charged, moving particle
- **1901** predicted by Kelvin
- **1904** predicted by Sommerfeld
- **1934** Cherenkov: experimentally observed
- **1937** Frank & Tamm theoretical explanation
- **1958** Nobel price

The Nobel Prize in Physics 1958



Pavel Alekseyevich
Cherenkov
Prize share: 1/3



Il'ja Mikhailovich
Frank
Prize share: 1/3



Igor Yevgenyevich
Tamm
Prize share: 1/3

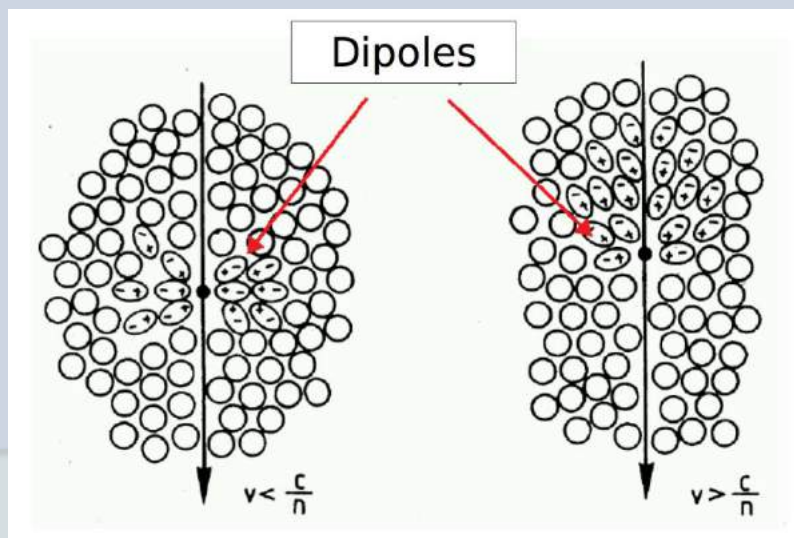
The Nobel Prize in Physics 1958 was awarded jointly to Pavel Alekseyevich Cherenkov, Il'ja Mikhailovich Frank and Igor Yevgenyevich Tamm *"for the discovery and the interpretation of the Cherenkov effect"*.

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

Cherenkov Radiation

density correction due to polarisation of the material

$$\frac{-dE}{dX} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2 m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 \left(\frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z} \right) \right]$$



charged particles polarise material
time dependent dipole field → dipole radiation

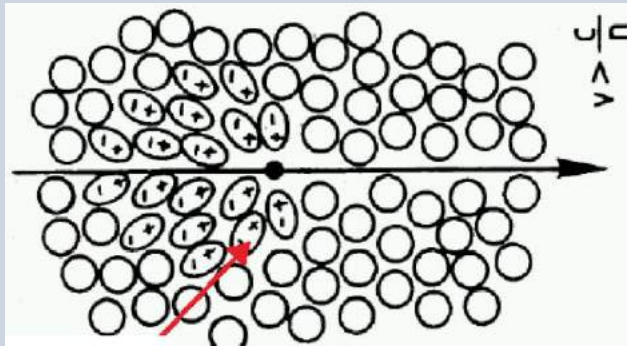
$v < c/n$ dipoles symmetric → no net radiation
 $v > c/n$ asymmetric → Cherenkov radiation

Energy loss due to Cherenkov radiation small 1-5% of dE/dX (MIP)

c/n light velocity in material
 n : refraction index

σ_{coherent} = Coherent scattering (Rayleigh scattering—atom neither ionized nor excited)

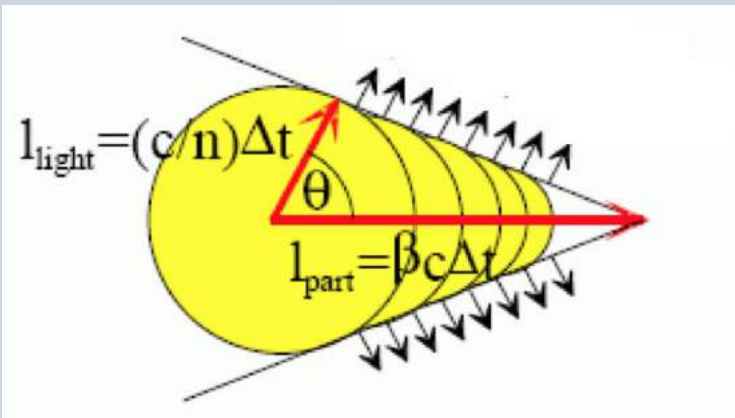
Cherenkov Radiation



Angle between Cherenkov photons
and track of particle $\rightarrow$ velocity of particle

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

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n \beta} + \frac{\hbar k}{2p} \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$



- p : momentum of particle, $\hbar k$ momentum of photon ($k = 2\pi/\lambda$)
- $\hbar k \ll p \rightarrow$ correction for recoil usually not needed
- $\beta_s = 1/n$ emission forward direction $\theta_c = 0$

maximum for $\beta=1$, Cherenkov angle $\theta_c = \arccos 1/n$

$\rightarrow$ Cherenkov radiation occurs only in media and for frequencies with $n(\beta) > 1$

particle	$l_{\text{part}} = t \beta c$
photons	$l_{\text{light}} = t c/n$

Threshold: Cherenkov emission only for $\beta > 1/n$

$$\gamma_s = \frac{E_s}{m_0 c^2} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta_s^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 1/n^2}}$$

Measurement of γ_s allows mass determination if energy is known

Cherenkov Radiation - Spettro

Intensity of the Cherenkov radiation:

γ per unit length of particle path and per unit of wave length depends on charge and velocity of particle

$$\frac{dN}{dx} = 2\pi\alpha z^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(1 - \frac{1}{n^2(\lambda)\beta^2}\right) \frac{d\lambda}{\lambda^2} \approx 2\pi\alpha z^2 \sin^2\theta_c \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_2 \lambda_1} = 490 \sin^2\theta_c [cm^{-1}] \quad 400 - 700 \text{ nm}$$

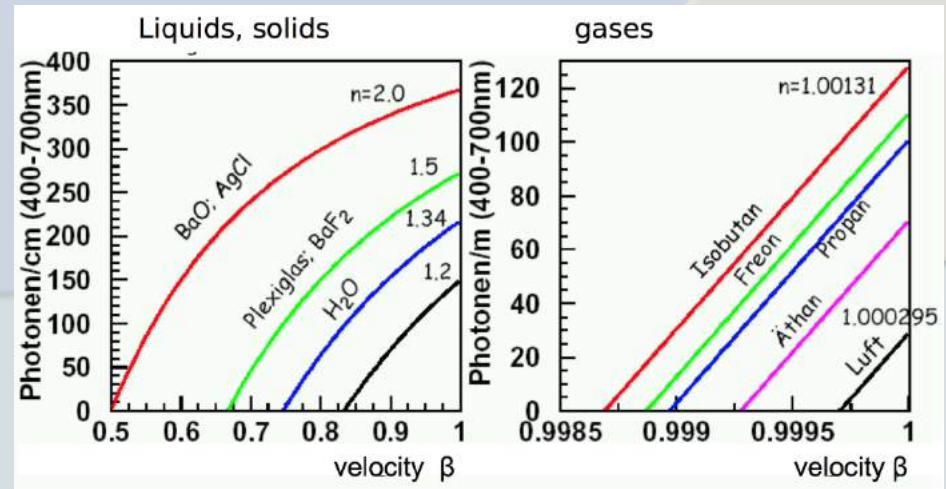
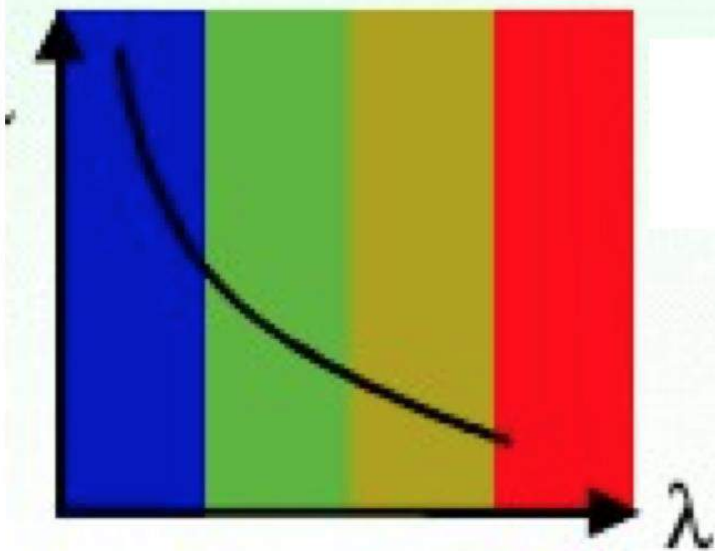
1150 $\sin^2\theta_c [cm^{-1}]$ incl. UV 200-700nm

blue!

Energy loss very small (1% dE/dX (MIP))

Number of emitted photons $\sim 1/\lambda^2$: detect visible and UV light

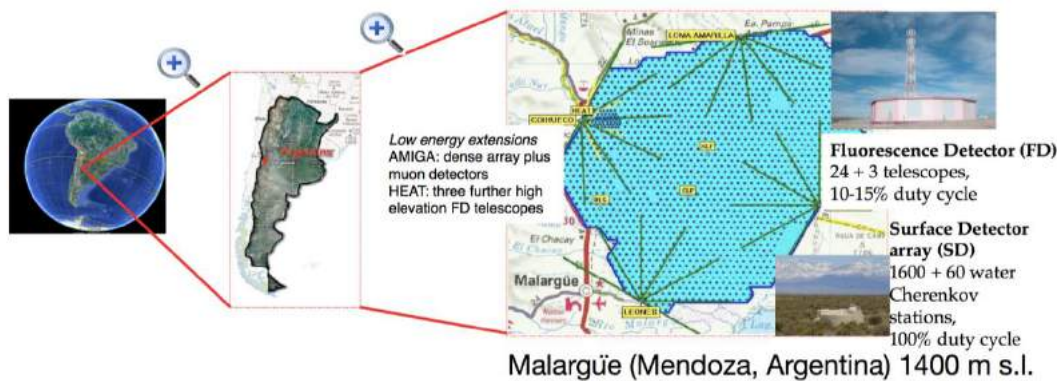
$dN/d\lambda$



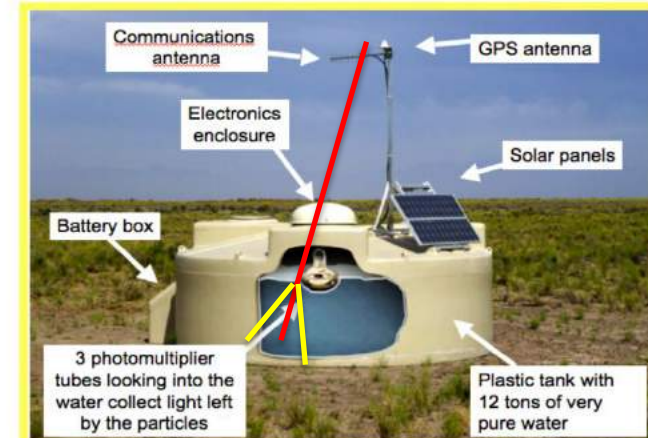
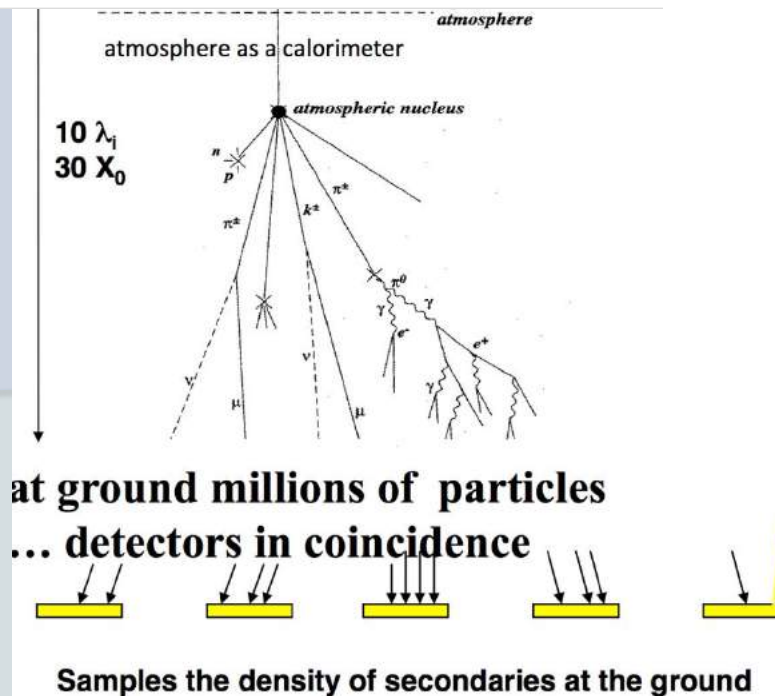
→ if any light is emitted, then the particle β exceeds $1/n$

Yield increased by factor 2-3 if UV light detected

Cherenkov Radiation – AUGER



Consist of a surface array of 1600 water Cherenkov detectors on about 3000 km² on a triangular grid of 1.5 km spacing, overlooked by 27 air fluorescence telescopes grouped in 4 sites.

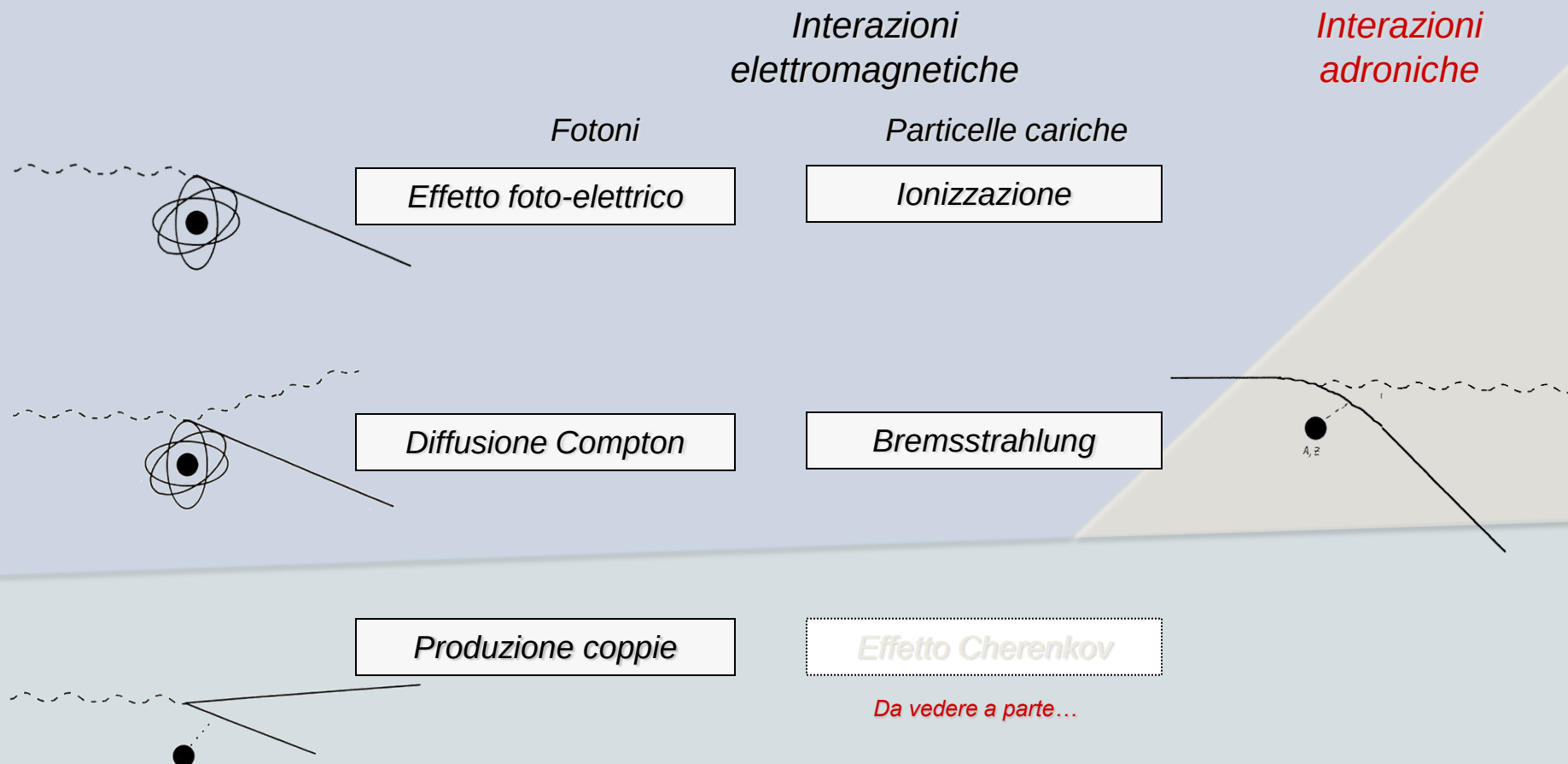


Surface Detector

- Shower size $\approx E$
- Time $\approx$ direction
- 100% duty cycle

Lo sciame adronico (1)

Come ulteriore complicazione allo schema visto per elettroni o fotoni, quando la particella incidente è un adrone, occorre considerare le **interazioni forti**





Lo sciame adronico (2)

Produzione di altre particelle, oltre che $e^\pm$ e γ , ovvero **adroni**

In particolare vengono prodotti in abbondanza gli adroni a più lunga vita media e di minore massa... i **pioni**:

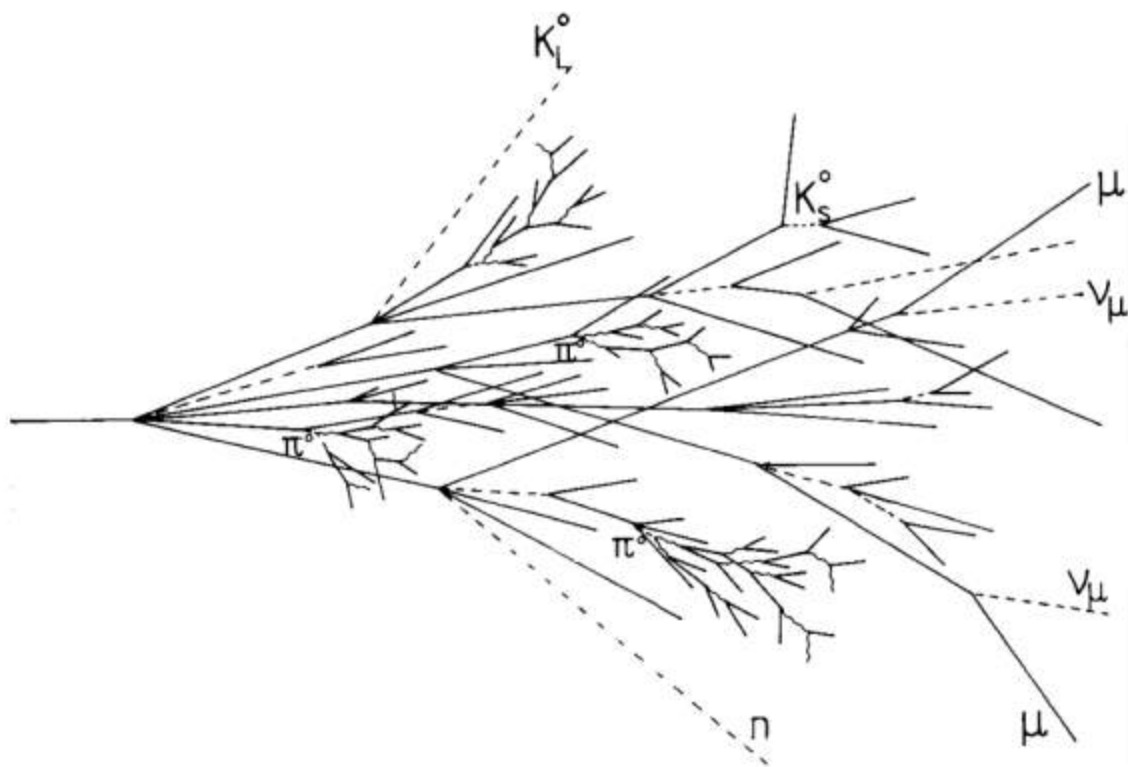
- $\pi^\pm$ si comportano sostanzialmente come i muoni [particelle cariche ionizzanti pesanti]
- π^0 [come anche le η] decadono “immediatamente” [10^{-16} s] in 2 γ , dando luogo ad una **componente elettromagnetica** dello sciame adronico

Interazioni
adroniche

Inoltre avverranno delle reazioni nucleari, con emissioni di **protoni di spallazione** [fortemente ionizzanti con un piccolo range] e **neutroni**

Ci saranno sia rilasci di

- **energia “non elettro-magnetica”** [ovvero non costituita da elettroni e fotoni]
- **energia non rivelabile o energia invisibile**, come
 - energia di legame dei nuclei, persa per fissione o per emissione di protoni e neutroni
 - energia rinculo dei nuclei
 - particelle non rivelate [adroni neutri, neutrini]



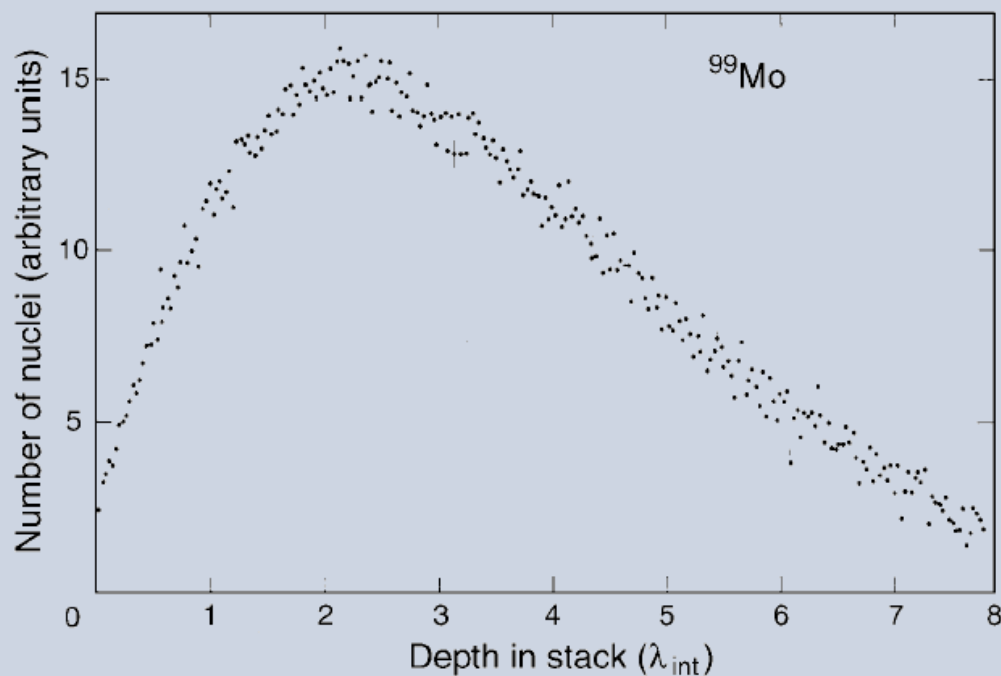
*In analogia a quanto fatto per i fotoni e l'interazione elettromagnetica, possiamo definire la distanza media che può compiere un adrone prima di avere un'interazione nucleare con il materiale: la **lunghezza di interazione** λ_{int}*

$$I(x) = I_0 e^{-x/\lambda_{int}}$$

che sarà inversamente proporzionale alla sezione d'urto totale

$$\sigma_{tot} = \frac{A}{N_A \lambda_{int}}$$

Da semplici considerazioni dimensionali, $\lambda_{int} \sim A^{1/3}$



$$t_{\max}(\lambda_{\text{int}}) \approx 0.2 \ln\left(\frac{E}{1\text{GeV}}\right) + 0.7$$

$$L_{95\%}(\lambda_{\text{int}}) \approx t_{\max} + 2.5\lambda_{\text{att}}$$

$$\lambda_{\text{att}} \approx \lambda_{\text{int}} \left(\frac{E}{1\text{GeV}}\right)^{0.13}$$

descrive la discesa esponenziale dopo $t_{\max}$

Il profilo longitudinale, in questo caso, è stato “fotografato” misurando i decadimenti di un nuclide radioattivo (^{99}Mo) prodotto nell’interazione tra π da 300 GeV/c con un blocco di uranio.

Lo sciame è contenuto al 95% in circa $8 \lambda_{\text{int}}$ [85 cm di uranio, per confronto occorre ricordare che la lunghezza di radiazione dell’uranio è $x_0=0.32$ cm]

Energia non elettro-magnetica nello sciame:

- Particelle **ionizzanti**

[~1/3 pioni e ~2/3 protoni di spallazione, energia tipica ~100 MeV]

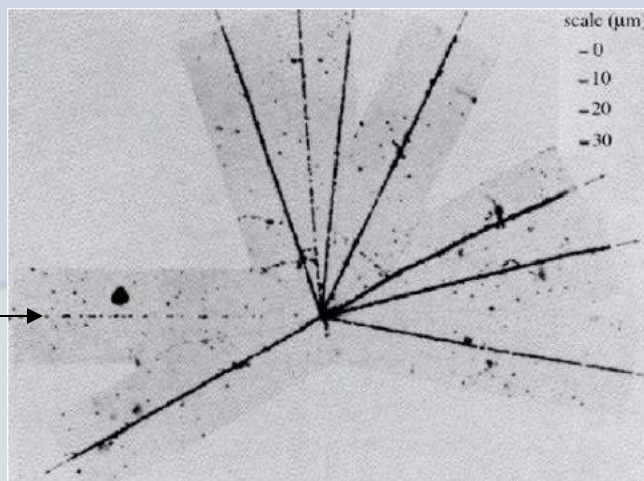
- **Neutroni** di evaporazione

*[~37 neutroni/GeV, energia **media** tipica ~3 MeV]*

- Energia **invisibile**

protone da 0.57 GeV/c

[emulsione nucleare]



Scattering elastico

Di gran lungo dominante da pochi eV fino a ~ 1 MeV, la frazione di energia ceduta nell'urto f varia da 0 a $4A(A+1)^2$ [collisioni centrali] per cui sono molto più efficienti le collisioni con nuclei leggeri

Materiale <f>

Idrogeno 50%

Ferro 3.4%

Piombo 1%

Cattura neutronica

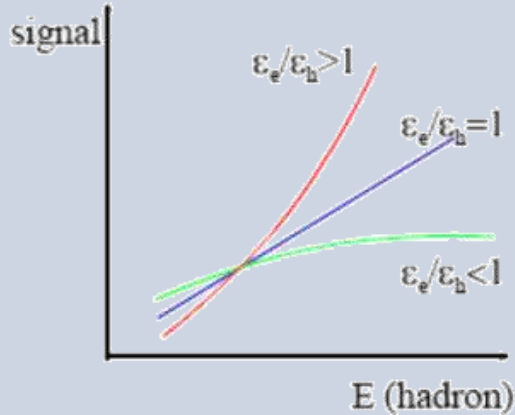
A causa della lunga vita media, è più probabile che un neutrone di bassa energia cinetica venga ri-catturato da un nucleo, al quale cede l'energia di legame eccitandolo. La diseccitazione avviene per emissione di fotoni [o α per nuclei come ^6Li e ^{10}B]

Produzione di α

Nel range di energia tra 3 e 20 MeV dominano le reazioni (n, α) , specialmente con nuclei come il ^{12}C .

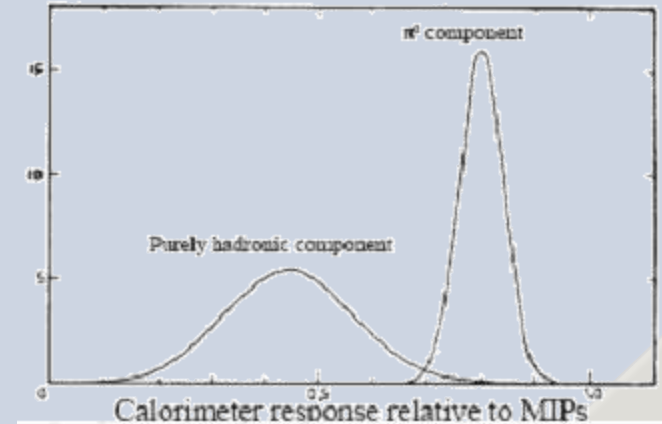
Scattering anelastico

Dipende fortemente dal tipo di materiale, ovvero dai livelli che possono essere eccitati e dalla sezione d'urto della reazione $(n, n' \gamma)$ [molto alta per esempio per il ^{56}Fe , $\Delta E = 0.85$ MeV]



$$\pi^\pm = f_{em}e + f_h h$$

$$f_h = 1 - f_{em}$$



$$\frac{e}{h} \neq 1 \longrightarrow \frac{\sigma(E)}{E} \text{ non proporzionale a } \frac{1}{\sqrt{E}}$$

risposta agli adroni non lineare

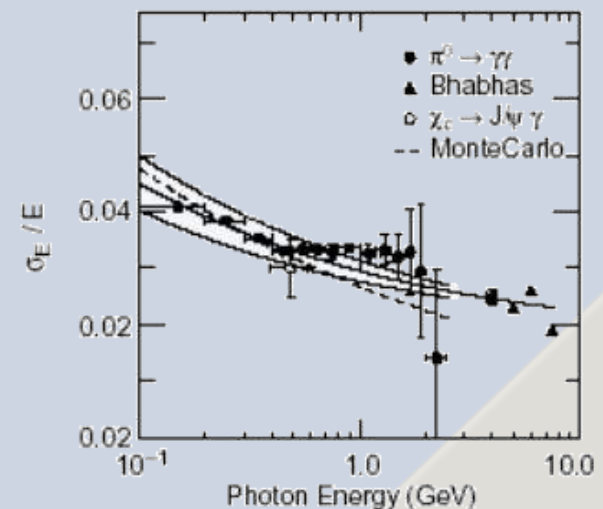
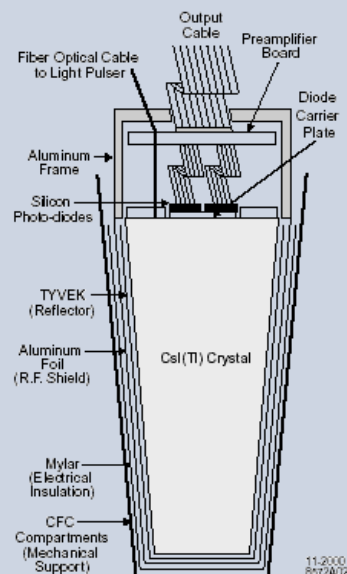
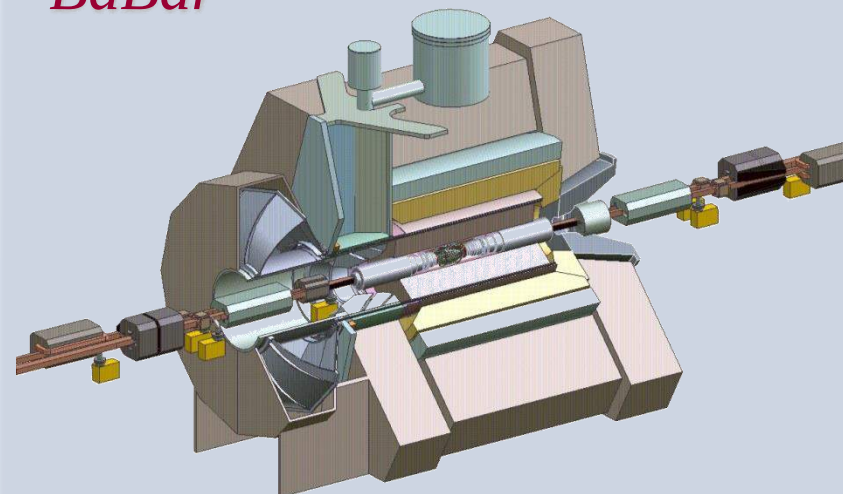
Distribuzione del deposito di E non Poissoniana

Technology (Experiment)	Depth	Energy resolution	Date
NaI(Tl) (Crystal Ball)	$20X_0$	$2.7\%/E^{1/4}$	1983
$\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) (L3)	$22X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$	1993
CsI (KTeV)	$27X_0$	$2\%/\sqrt{E} \oplus 0.45\%$	1996
CsI(Tl) (BaBar)	$16-18X_0$	$2.3\%/E^{1/4} \oplus 1.4\%$	1999
CsI(Tl) (BELLE)	$16X_0$	1.7% for $E_\gamma > 3.5 \text{ GeV}$	1998
PbWO_4 (PWO) (CMS)	$25X_0$	$3\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.2/E$	1997
Lead glass (OPAL)	$20.5X_0$	$5\%/\sqrt{E}$	1990
Liquid Kr (NA48)	$27X_0$	$3.2\%/\sqrt{E} \oplus 0.42\% \oplus 0.09/E$	1998
Scintillator/depleted U (ZEUS)	$20-30X_0$	$18\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator/Pb (CDF)	$18X_0$	$13.5\%/\sqrt{E}$	1988
Scintillator fiber/Pb spaghetti (KLOE)	$15X_0$	$5.7\%/\sqrt{E} \oplus 0.6\%$	1995
Liquid Ar/Pb (NA31)	$27X_0$	$7.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.5\% \oplus 0.1/E$	1988
Liquid Ar/Pb (SLD)	$21X_0$	$8\%/\sqrt{E}$	1993
Liquid Ar/Pb (H1)	$20-30X_0$	$12\%/\sqrt{E} \oplus 1\%$	1998
Liquid Ar/depl. U (DØ)	$20.5X_0$	$16\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\% \oplus 0.3/E$	1993
Liquid Ar/Pb accordion (ATLAS)	$25X_0$	$10\%/\sqrt{E} \oplus 0.4\% \oplus 0.3/E$	1996

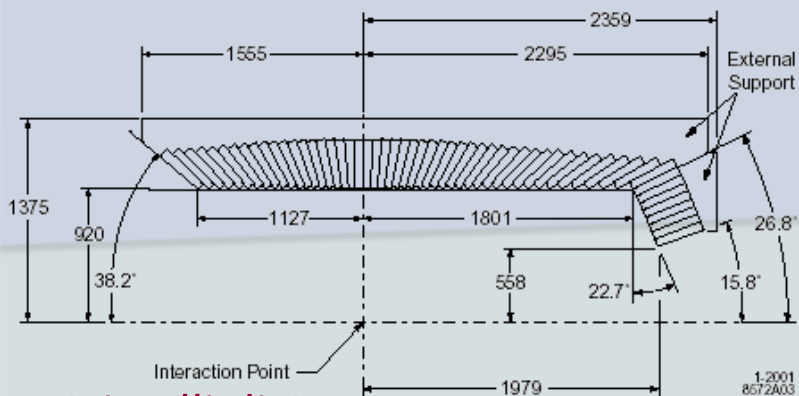
PDG

Calorimetri omogenei

BaBar

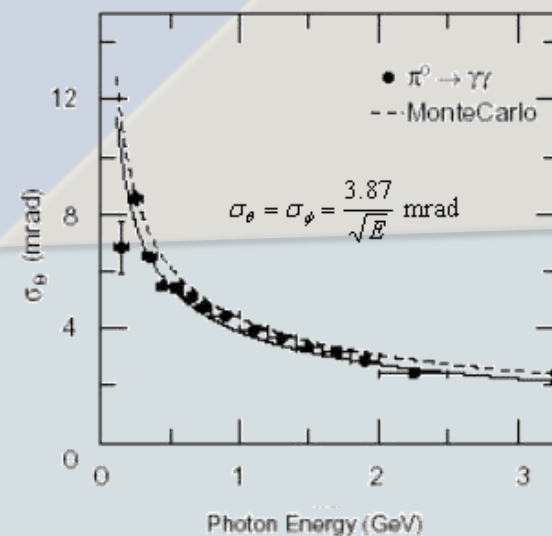


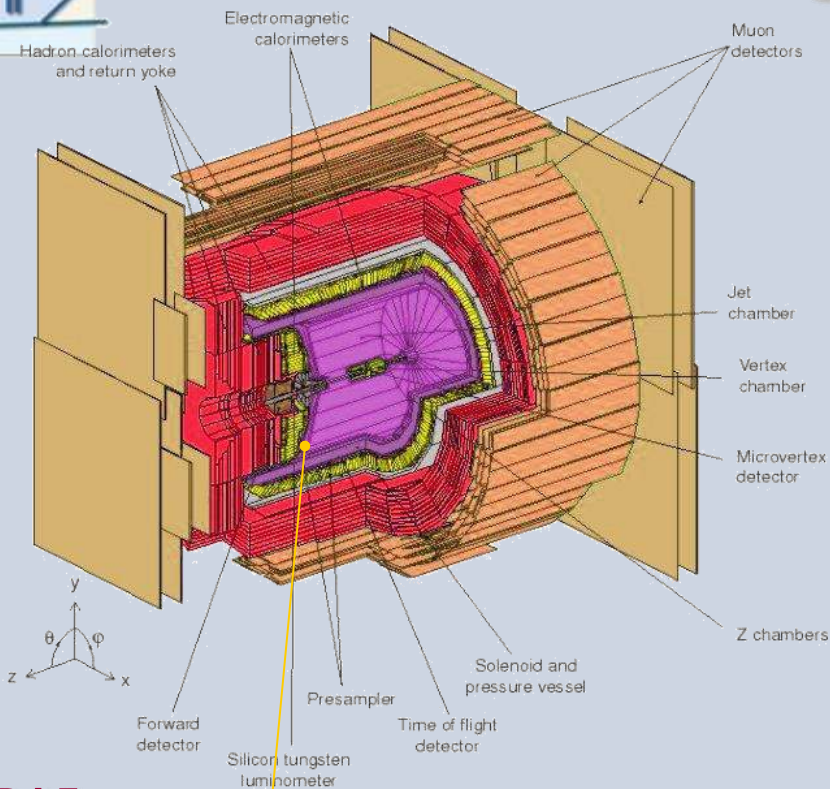
$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(2.32 \pm 0.30)\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus (1.85 \pm 0.12)\%$$



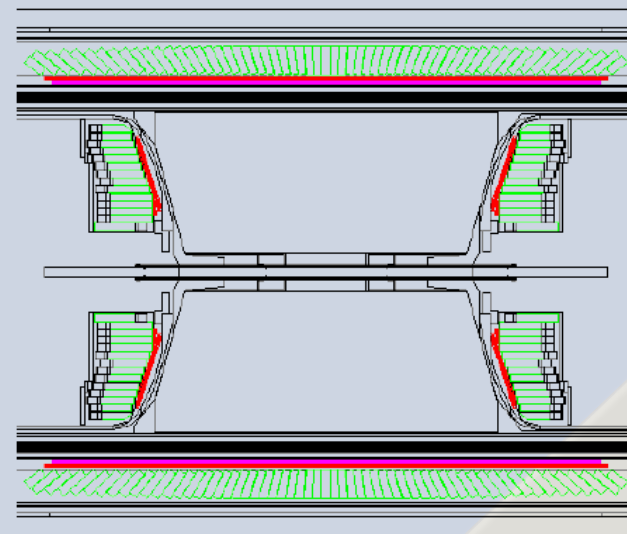
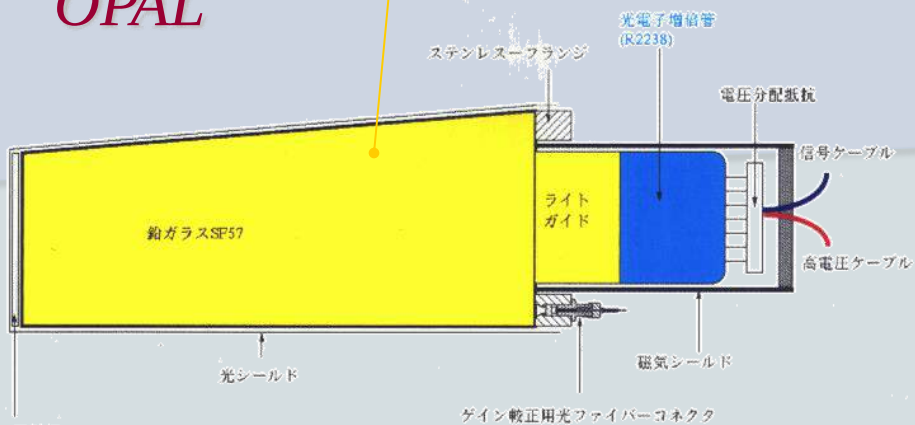
Cristalli di CsI

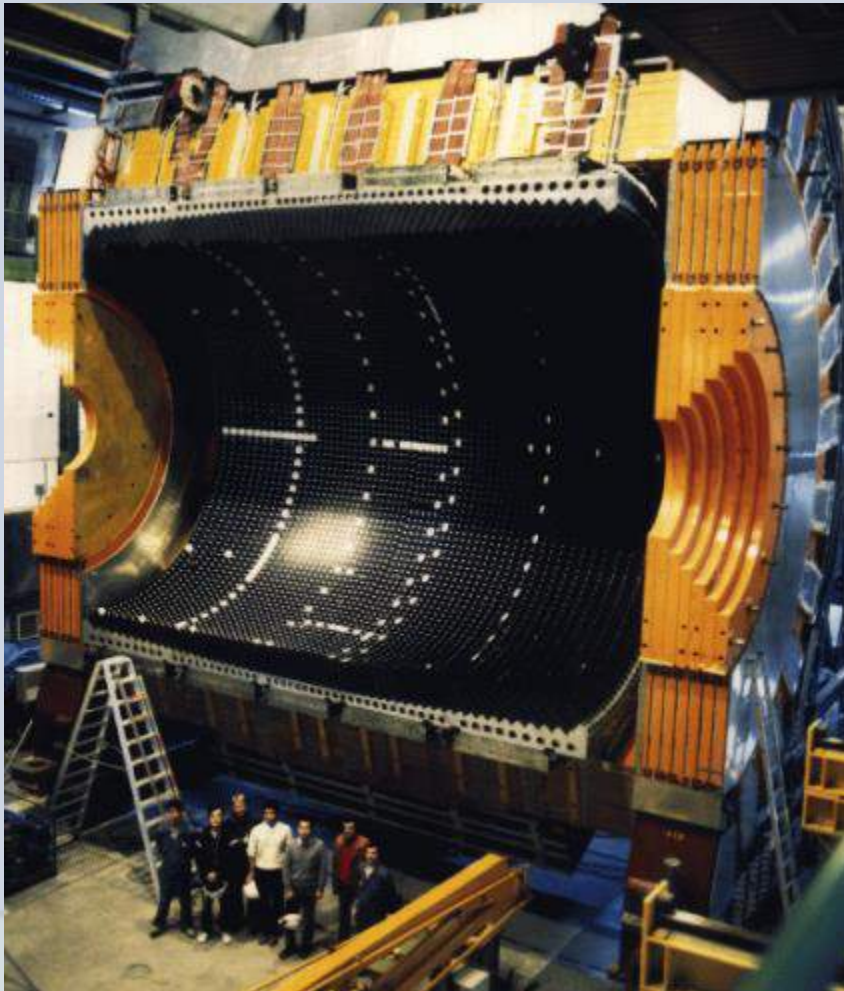
5760 cristalli barrel + 820 forward





OPAL





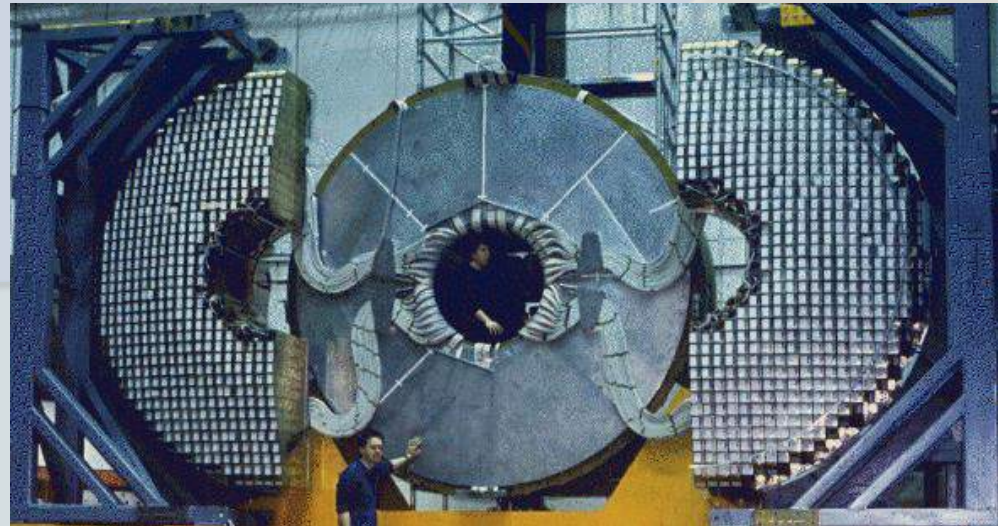
OPAL barrel

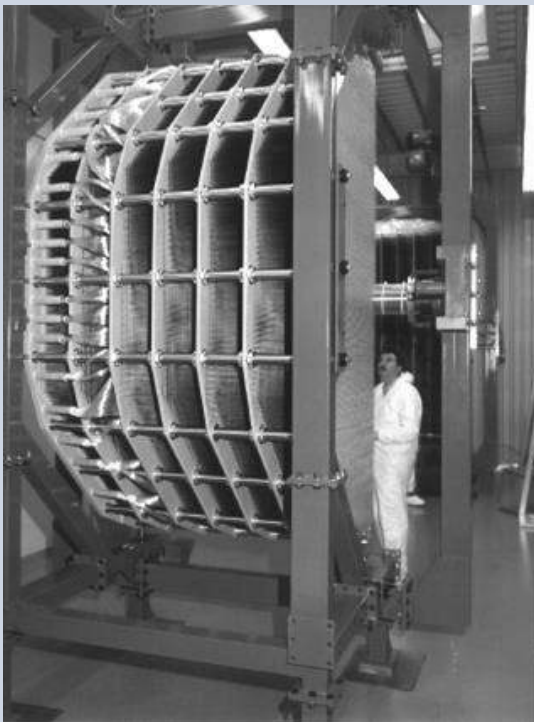
≈ 10500 blocks ($10 \times 10 \times 37 \text{ cm}^3$, $24.6 X_0$),
PM (barrel) or PT (end-cap)
readout.

$$\sigma(E)/E = 0.06/\sqrt{E} \oplus 0.002$$

Spatial resolution
(intrinsic) $\approx 11 \text{ mm}$
at 6 GeV

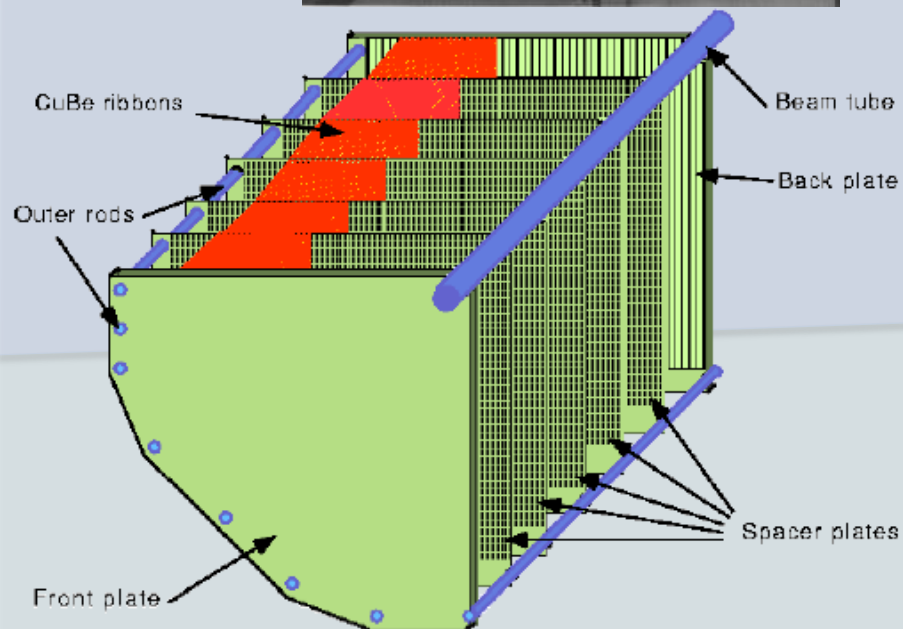
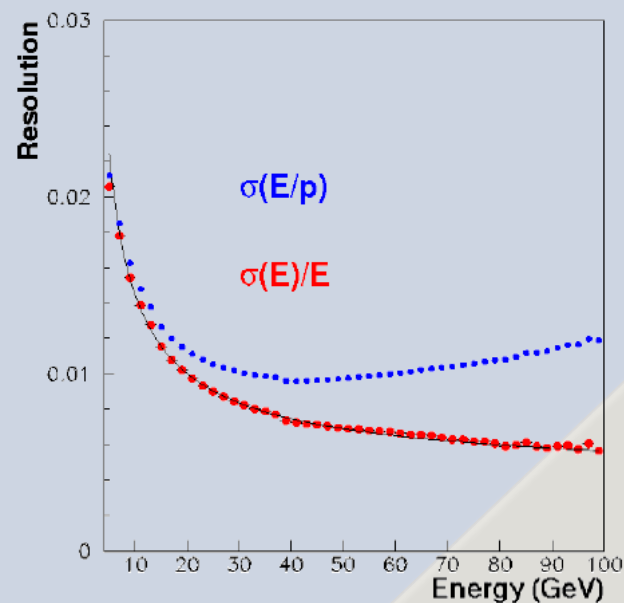
OPAL endcap





Calorimetri omogenei

Camera a ionizzazione a Krypton liquido ($T=120$ K)
Nessun assorbitore metallico ~ omogeneo
Elettrodi: nastro rame-berillio **NA48**

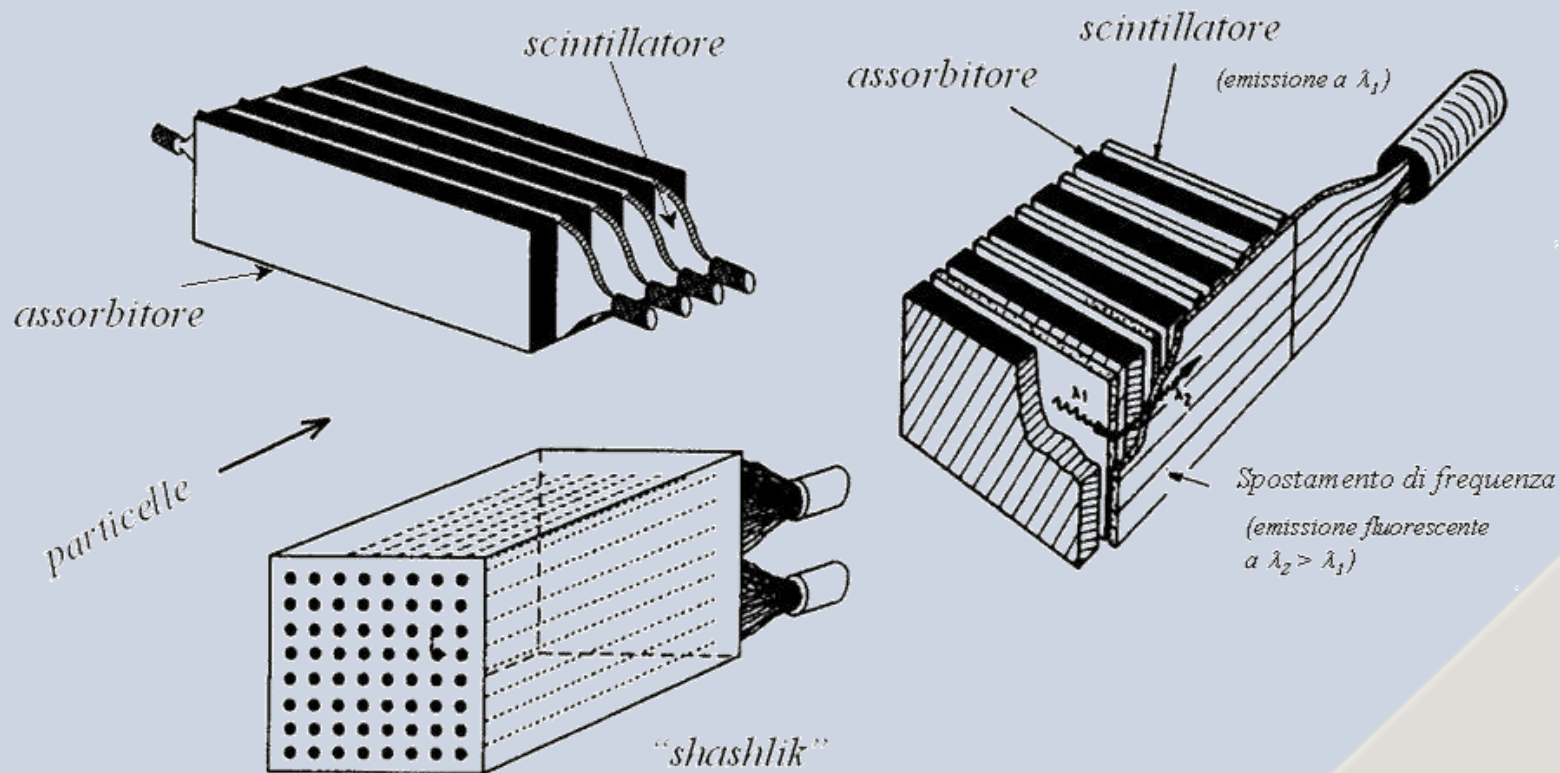


$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{0.032}{\sqrt{E}} \oplus \frac{0.09}{E} \oplus 0.0042$$

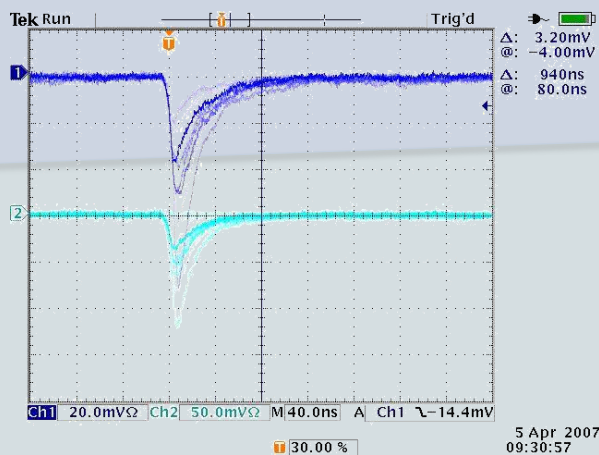
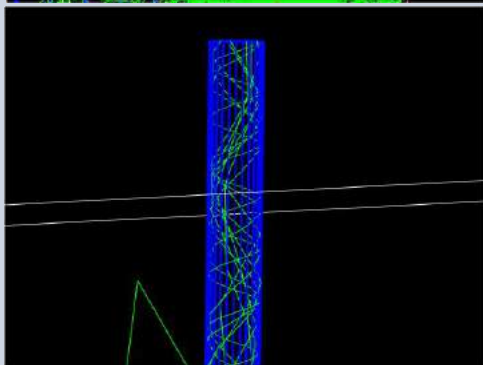
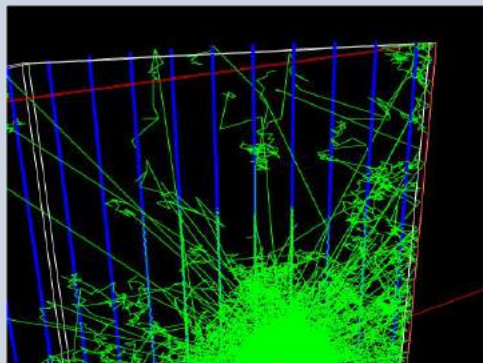
$$\sigma_{X,Y} = \frac{0.42}{\sqrt{E}} \oplus 0.06$$

$$\sigma_t = \frac{2.5}{\sqrt{E}}$$

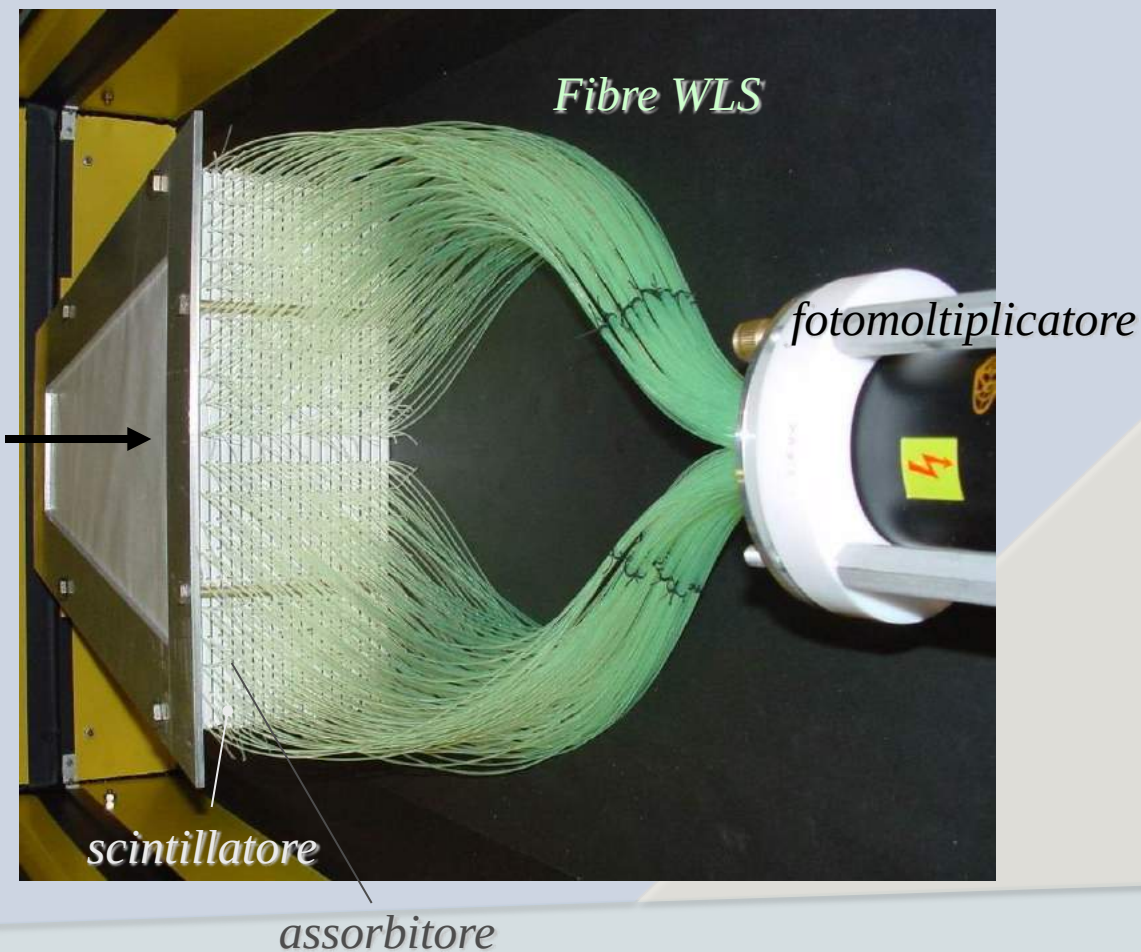
Calorimetri a campionamento



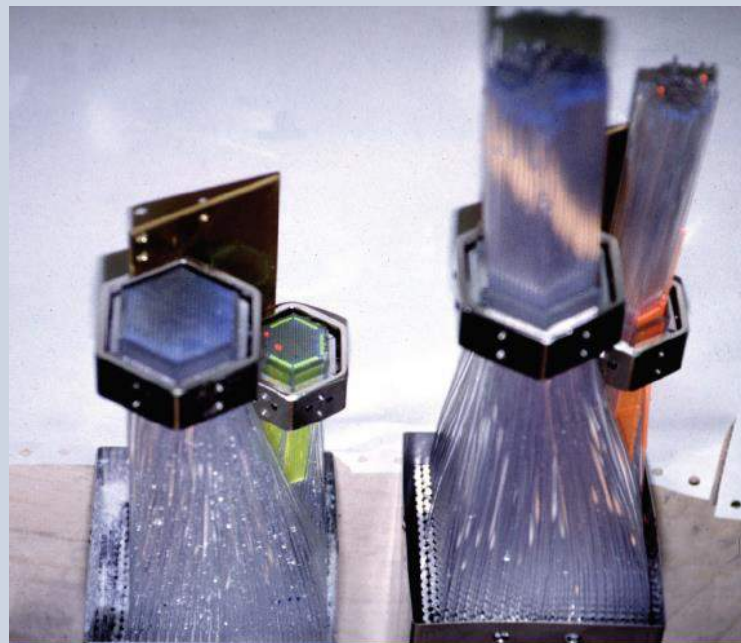
Calorimetri "tile"



5 Apr 2007
09:30:57



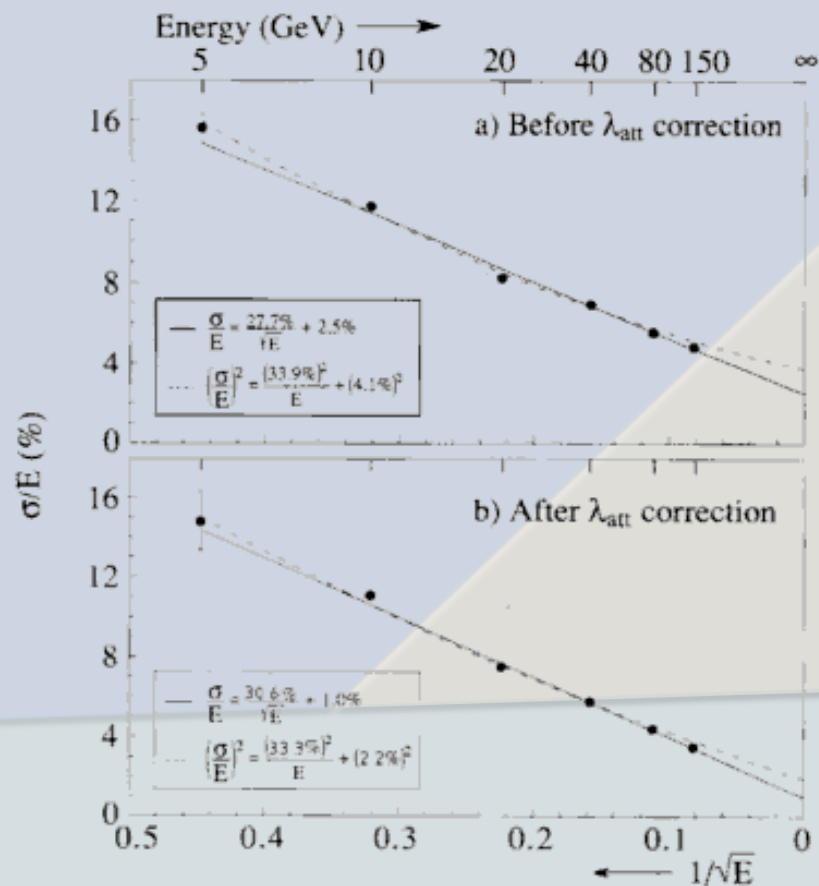
Calorimetro “spaghetti”



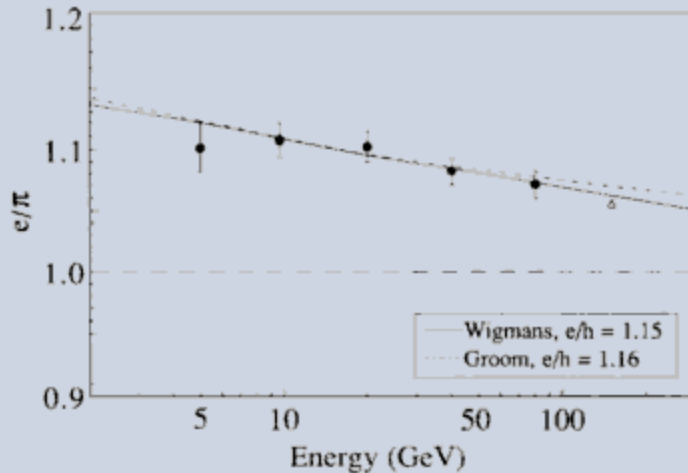
SPACAL

Il “progenitore” ...

*Risoluzione per π prima e dopo la correzione
per l’attenuazione della luce lungo la fibra*



SPACAL



Leggermente non compensato:

- Piccola non linearità della risposta ai pioni [$\sim 4\%$ nel range 5-150 GeV]
- Piccola deviazione dall'andamento $E^{-1/2}$ della risoluzione [legato alle fluttuazioni evento per evento della frazione e.m. dello sciame]

Calorimetro di KLOE



fotomoltiplicatore

Properties of the resulting structure:

Lead : Fiber : Glue volume ratio = 42 : 48 : 10
 Density = 5 g / cm³
 Radiation Length = 1.5 cm
 Module thickness = 23 cm (~ 15 r.l.)

guida di luce



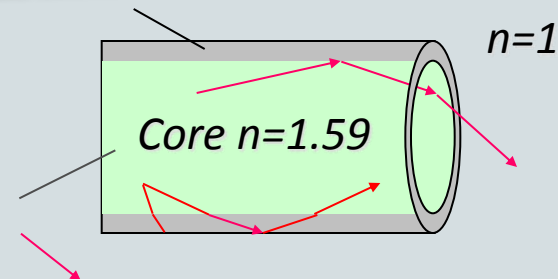
particelle

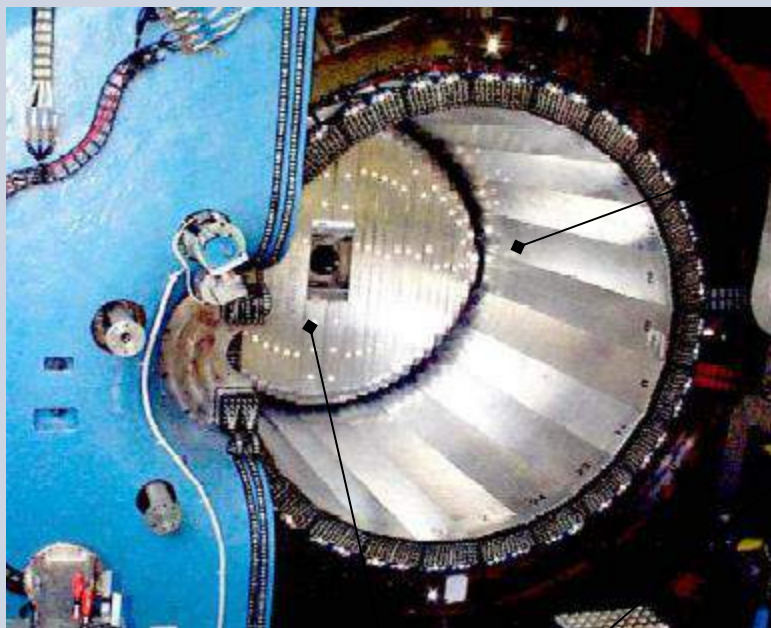
1.35 mm

piombo

fibra scintillante
D=1 mm

Cladding n=1.49





Barrel



Diametro 4 m
Lunghezza 4.3 m

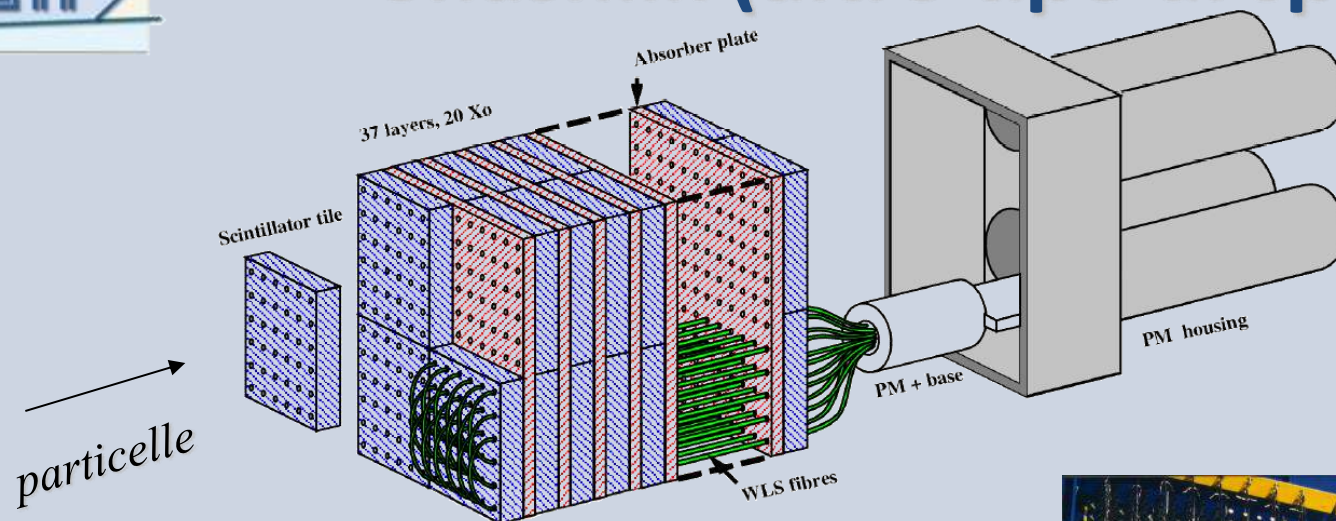
Endcap

Formati da moduli curvi [a forma di "C"]

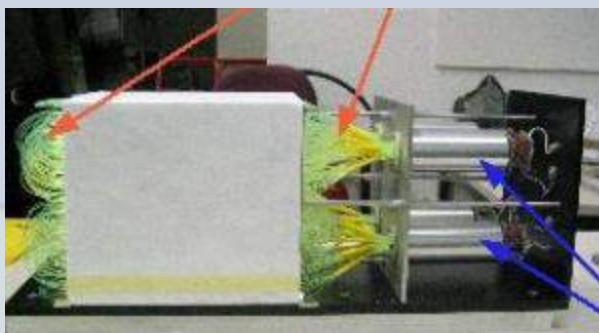
*KLOE è un esperimento concepito per lo studio delle proprietà dei mesoni K tramite la reazione $e^+e^- \rightarrow \phi \rightarrow K\bar{K}$ all'acceleratore DAFNE di Frascati [ϕ a riposo, $E_{\text{fasci}} = 510 \text{ MeV}$]
Prodotti di decadimento di bassa energia*



Shashlik (altro tipo di spaghetti...)



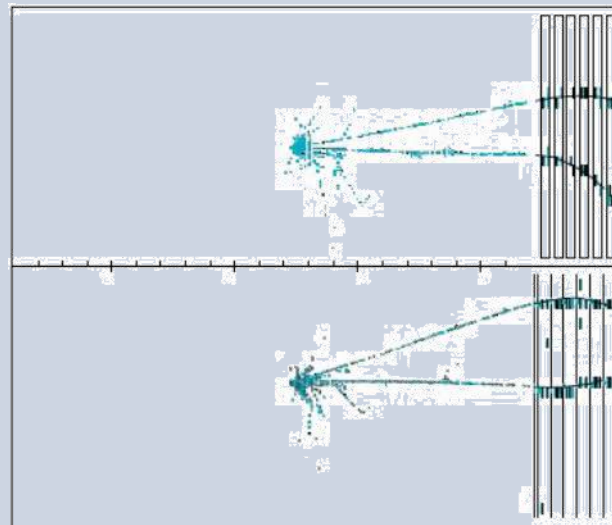
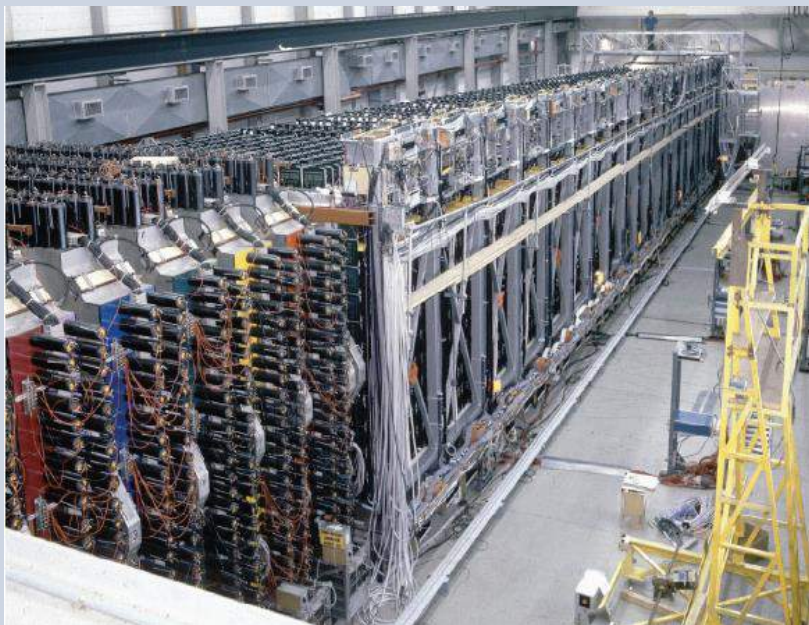
Fibre WLS



PM

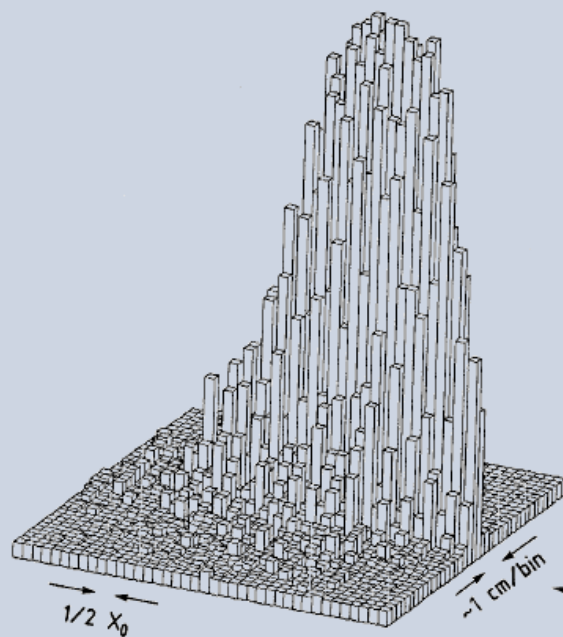


Calorimetro tracciante con rivelatori a gas

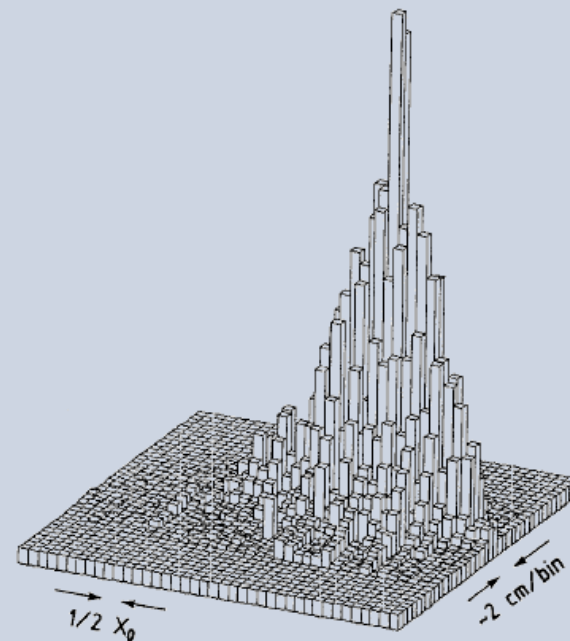


CHARM II

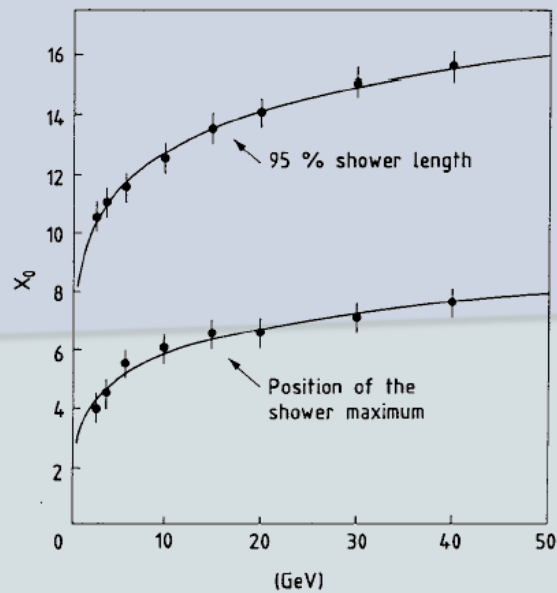
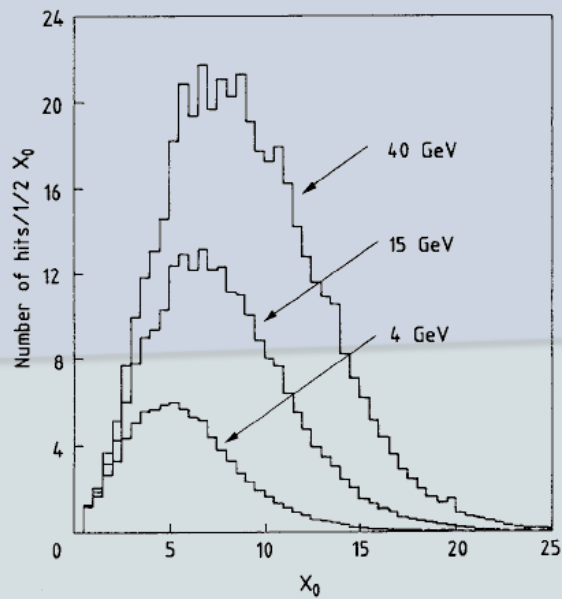
- Calorimetro a segmentazione: piani di **vetro** [$Z \sim 11$]/strati di **tubi a streamer limitato** [+ spettrometro per muoni]
- Basso Z e alto sampling [1 piano = $1/2 x_0$], alta granularità [420 strati, 352 tubi 1 cm, 176 strips 1.8 cm], $(3.7 \times 3.7 \times 35.7) \text{ m}^3$, 700 ton, 150000 tubi
- Concepito per la misura di $\sin \theta_w$ attraverso lo scattering ν -e
- Fascio wide-band di neutrini dell'SPS, ~ 2000 eventi di neutrino [1984-1990]



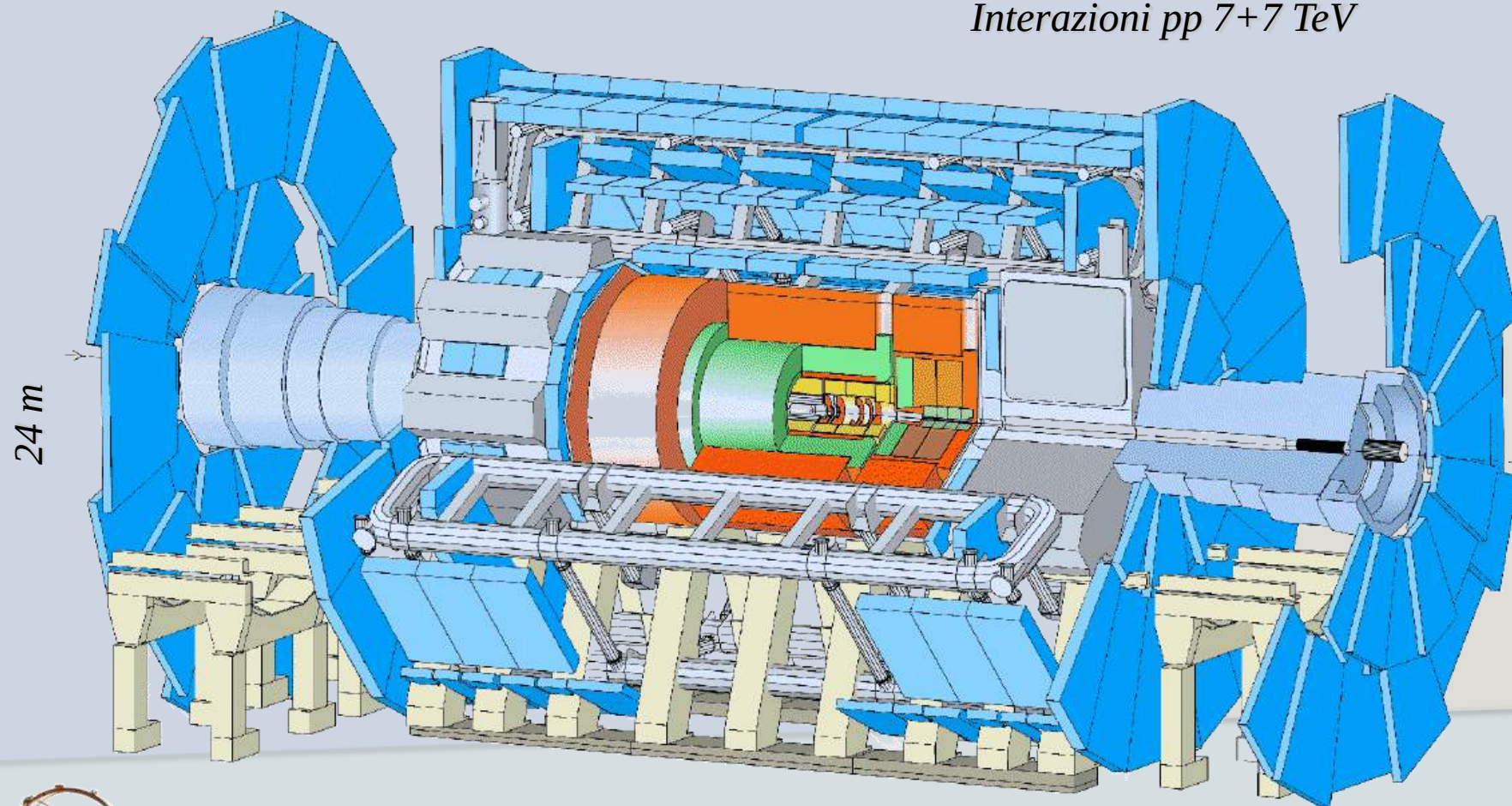
Shower development (Tube hits)



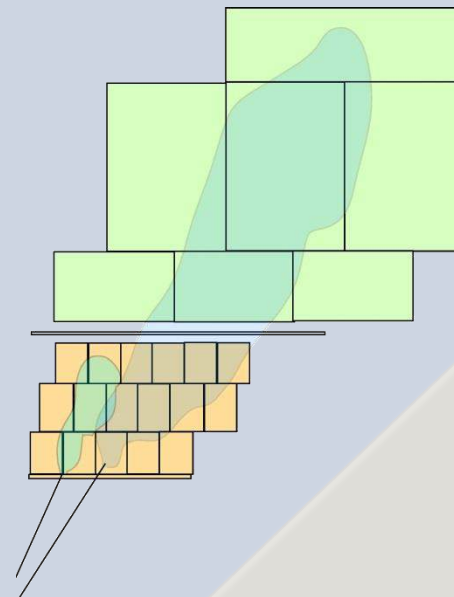
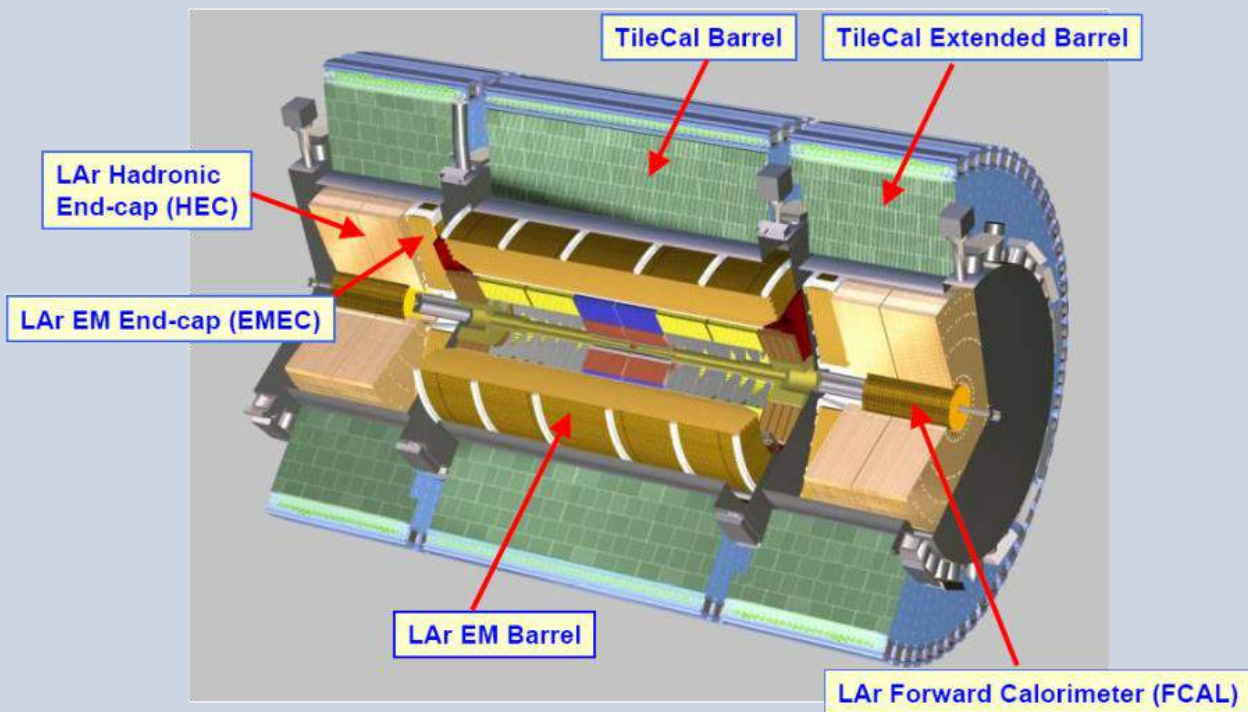
Shower development (Analog strips)

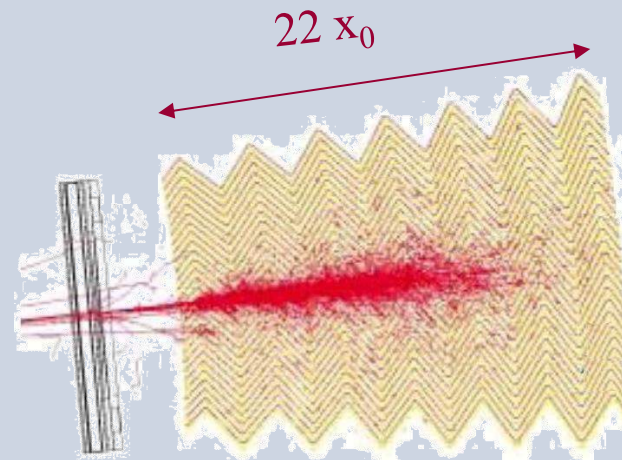
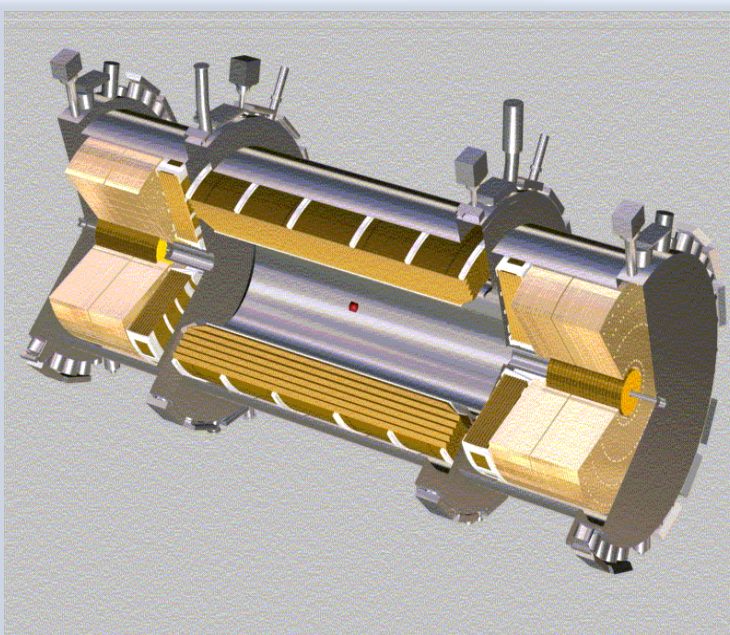


Interazioni pp 7+7 TeV



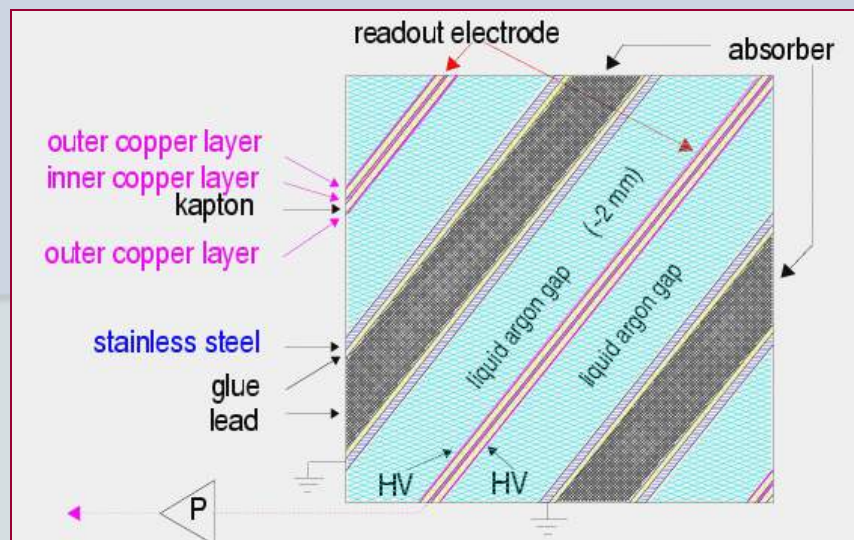
46 m

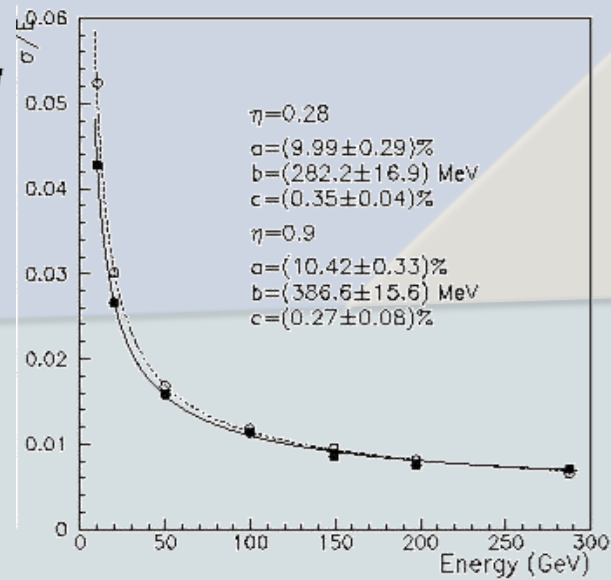
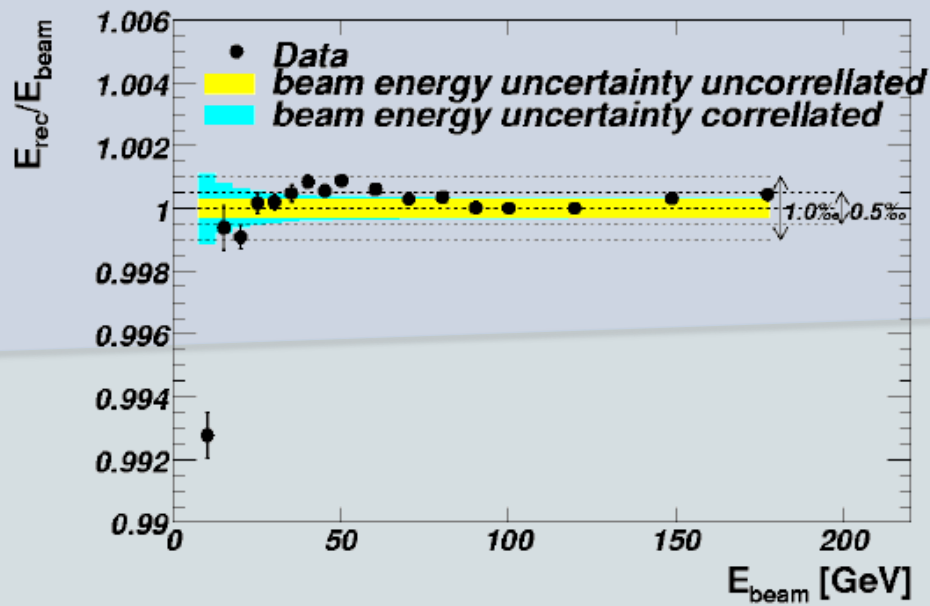
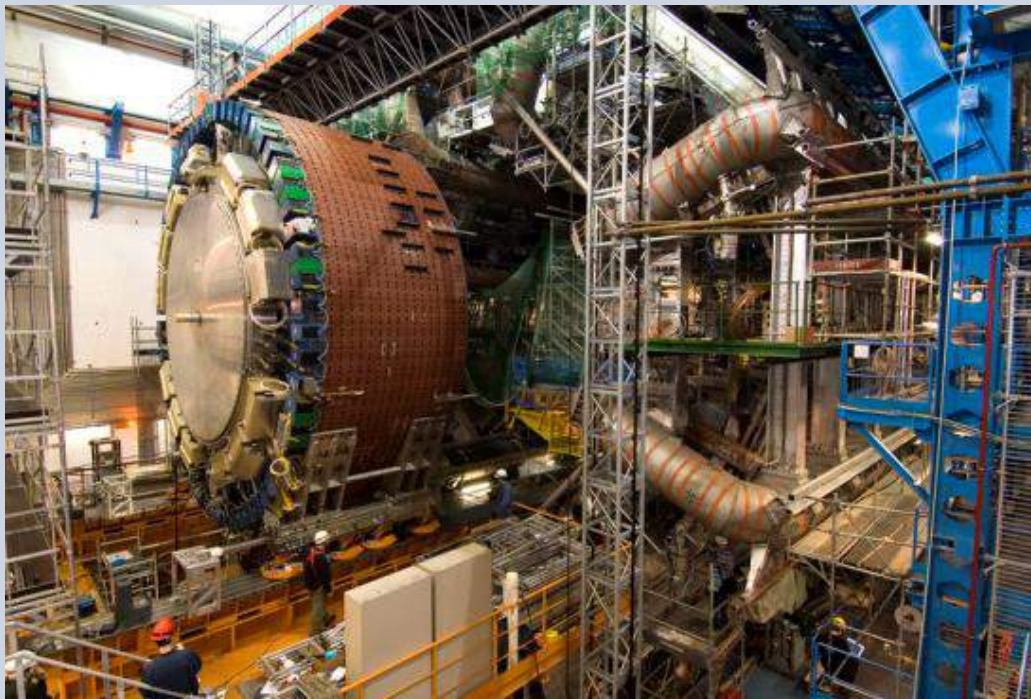


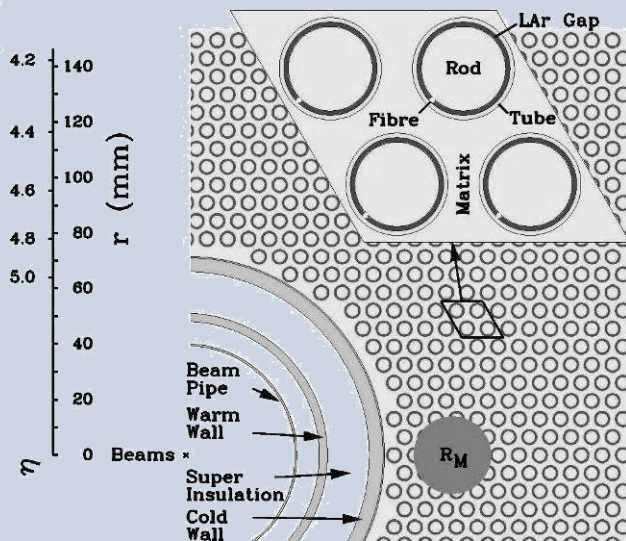


Calorimetro e.m. di ATLAS

Piombo/Ar liquido [accordion]





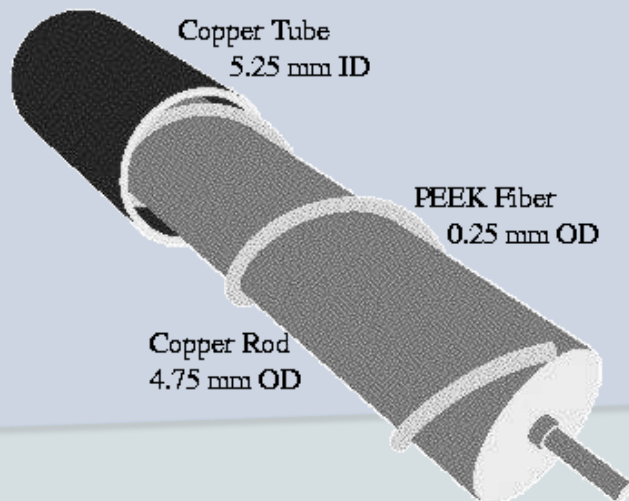


LAr gap FCAL 1/2/3: 250/375/500 μm

Forward Calorimeter (FCAL)

3 “ruote” per endcap (10λ)

- Matrix di rame per la prima (2.6λ , $28X_0$)
- Matrice di tungsteno per le altre 2 ($2 \times 3.7\lambda$)
- fibra in plastica dura come spacer





M. Livan et al., CERN Yellow report, 95-02 (1995).

R. Wigmans, "Calorimetry: energy measurement in particle physics", Oxford Science Publications (2000).

T. Ferbel (Ed.), "Experimental. Techniques in High-Energy Physics", Addison-Wesley (1987)

Particle Data Group (PDG), <http://pdg.lbl.gov/>



BTF - Diagnostica



BTF - Diagnostics



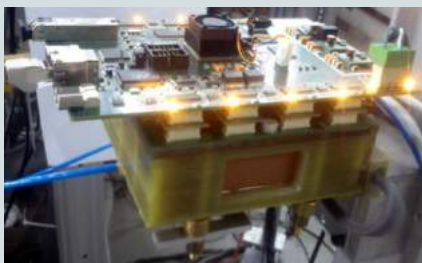
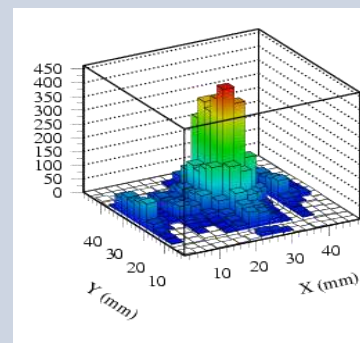
High intensity

- Integrating current toroid
- Fluorescence flag



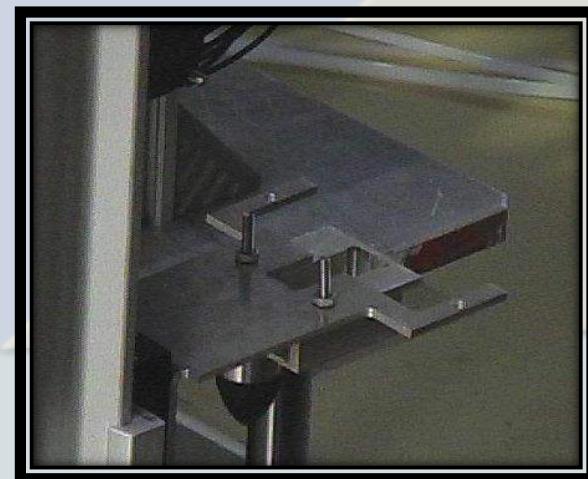
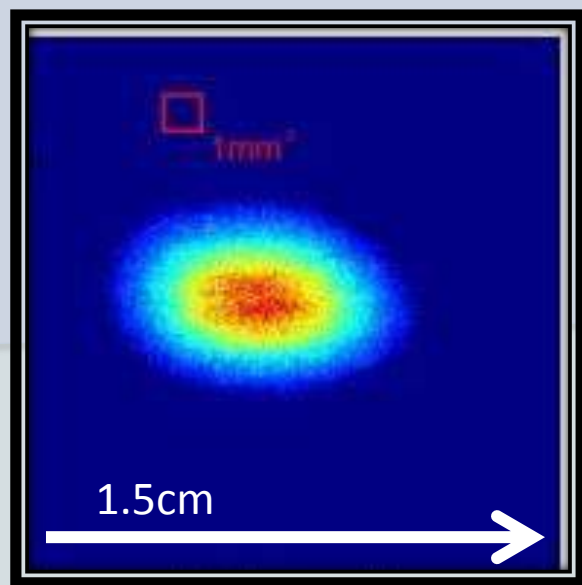
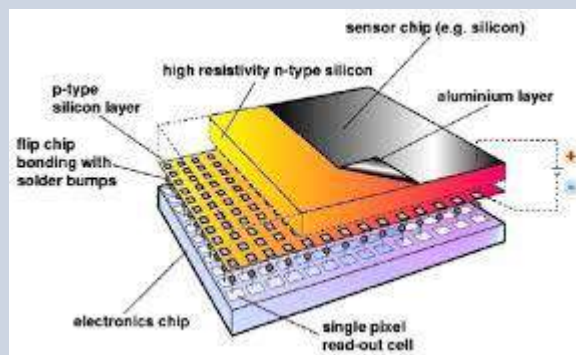
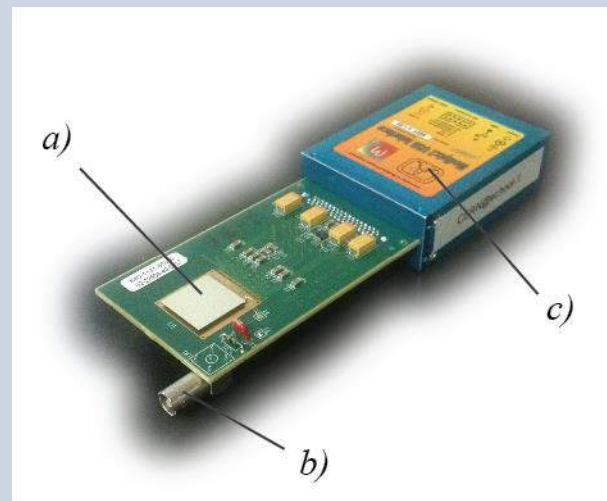
Medium-low intensity

- Scintillating fibers hodoscope
- Silicon pixel detectors
- GEM Time-projection chambers
- Silicon Tracker
- Calorimeter

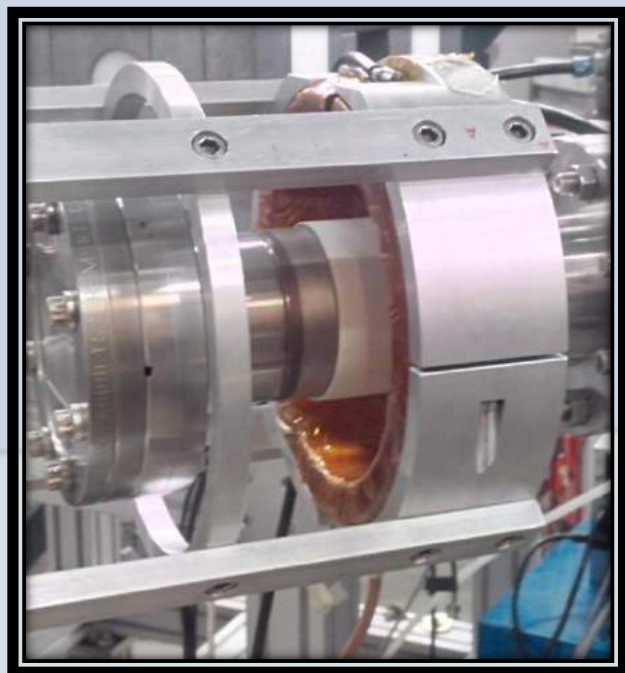
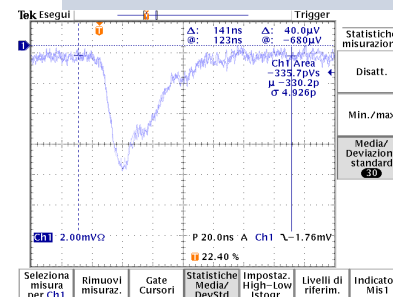
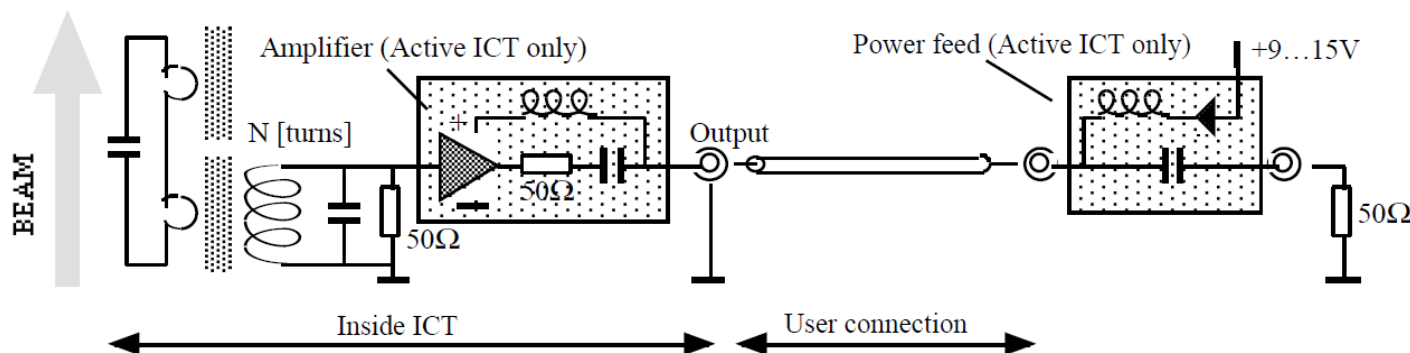




- Timepix and Blue Box
- BTF timing
- Windows VM USB 2.0



- 256x256 pixel detector
- 55 μ m pixel - $\sigma=15\text{ }\mu$ m
- 50 Hz gated OK
- 1.5 cm square $\rightarrow \sim 2\text{cm}^2$ area
- Wide range multiplicity
- Easy to use



Waveform generator: Agilent Arbitrary waveform Generator 33250A

Oscilloscope: Tektronix TDS 3054C

WCM: Bergoz Integrating Current Transformer (ICT-122-070-05:1)

WCM reply:

$\int Vds : \mu = 167 \text{ pVs} \quad \sigma = 5 \text{ pVs}$

$I_{ped} = -59 \text{ pVs}$

$I_{wcm} = \int Vds - I_{ped} = 226 \text{ pVs}$

$Q_{out} = I_{wcm}/R = 4.52 \text{ pC}$

RATIO:

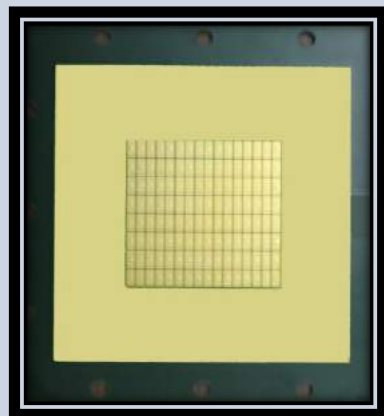
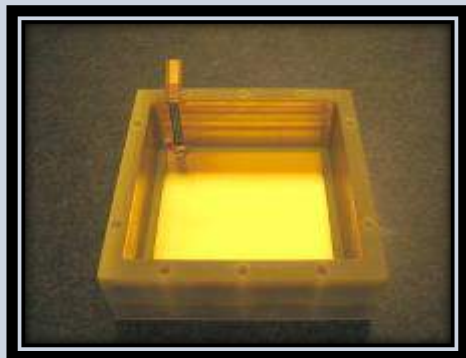
Theoretical ICT ratio = 0.1

R (ratio) = $Q_{out}/Q_{in} = I_{wcm}/I_{imp} = \underline{0.098}$

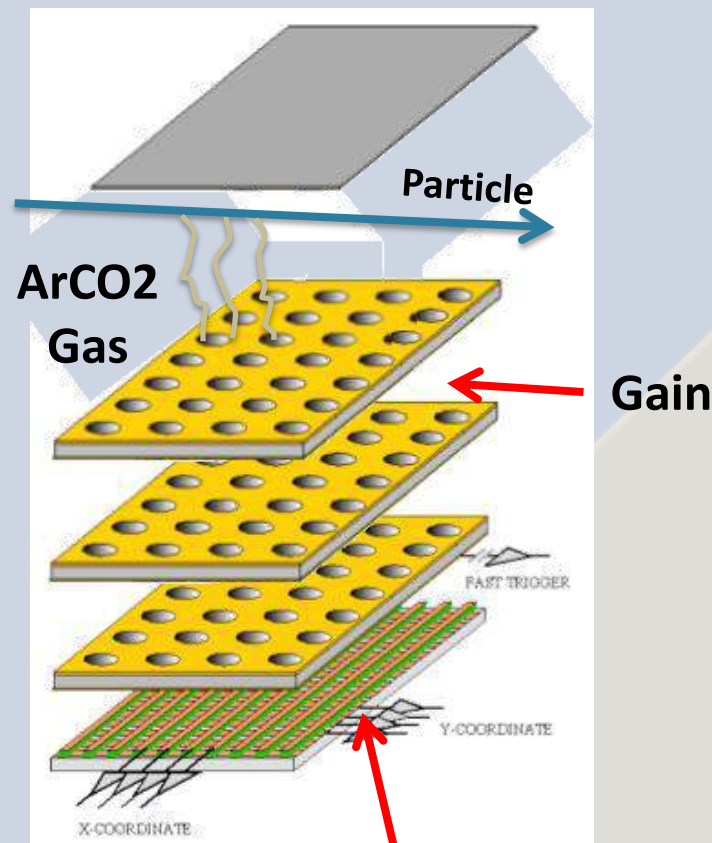
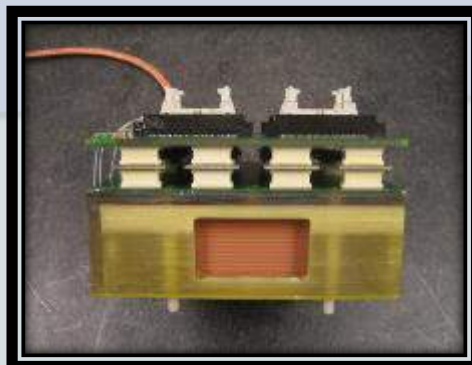
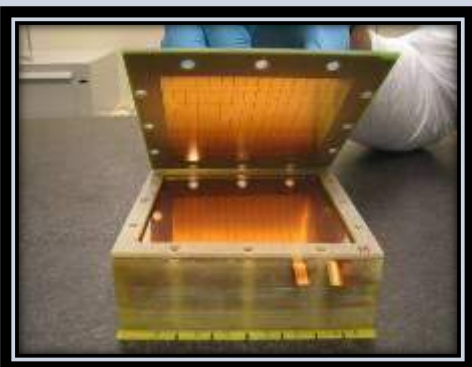
ΔR = $\sqrt{((\sigma_{wcm}/I_{imp})^2 + ((I_{wcm} * \sigma_{imp})/I_{imp}^2)^2)} = \underline{0.002}$



Diagnostics – GEM TPC



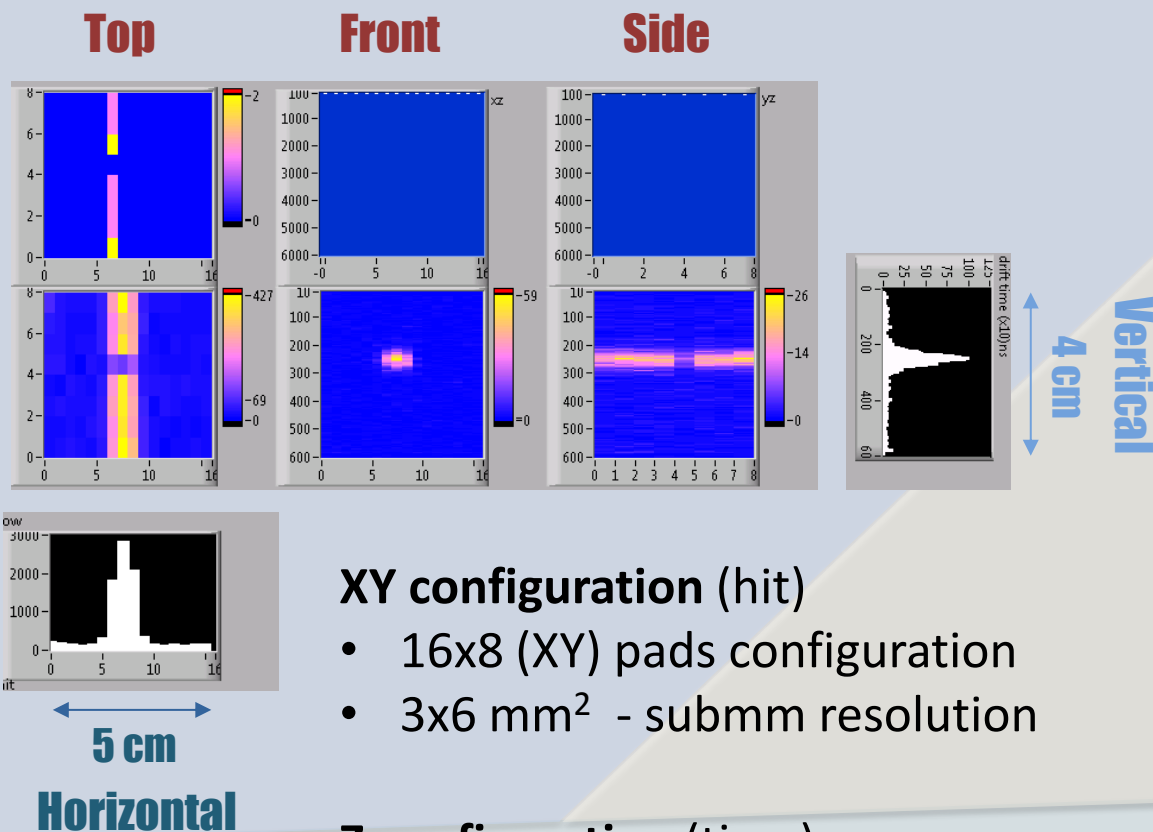
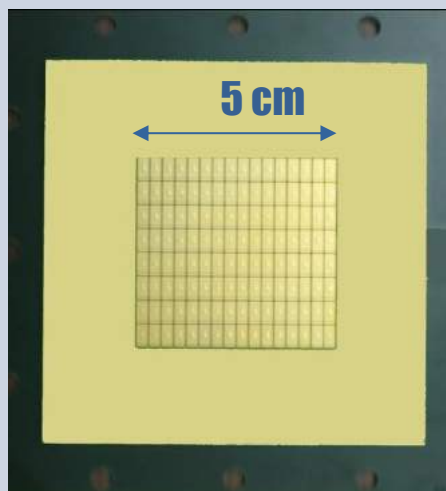
3x6mm² pads
8x16 pads grid



two kapton foils ($<0.2\%X_0$)

Readout
Particle

Triple GEM structure



XY configuration (hit)

- 16x8 (XY) pads configuration
- 3x6 mm² - submm resolution

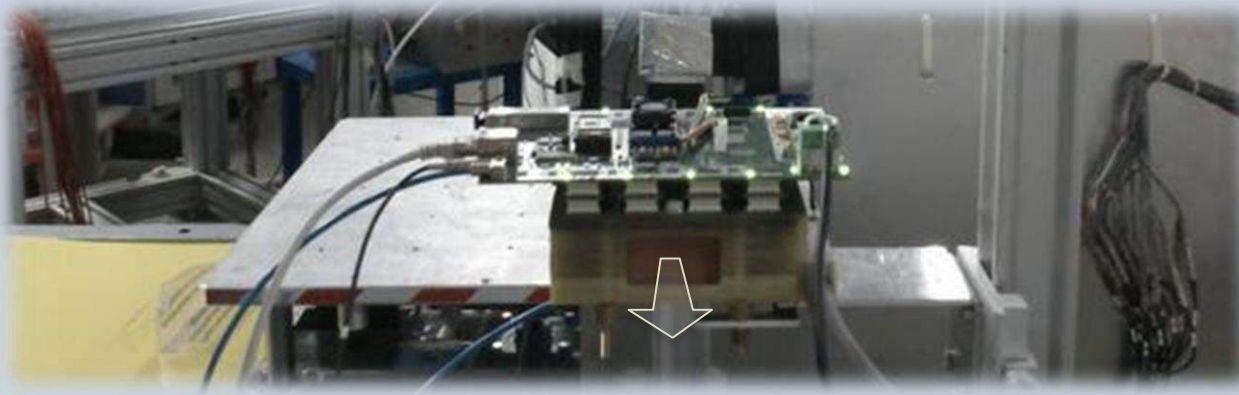
Z configuration (time)

- 6μs max drift -> 80 μm resolution

Clocking

- 15 Hz gated OK

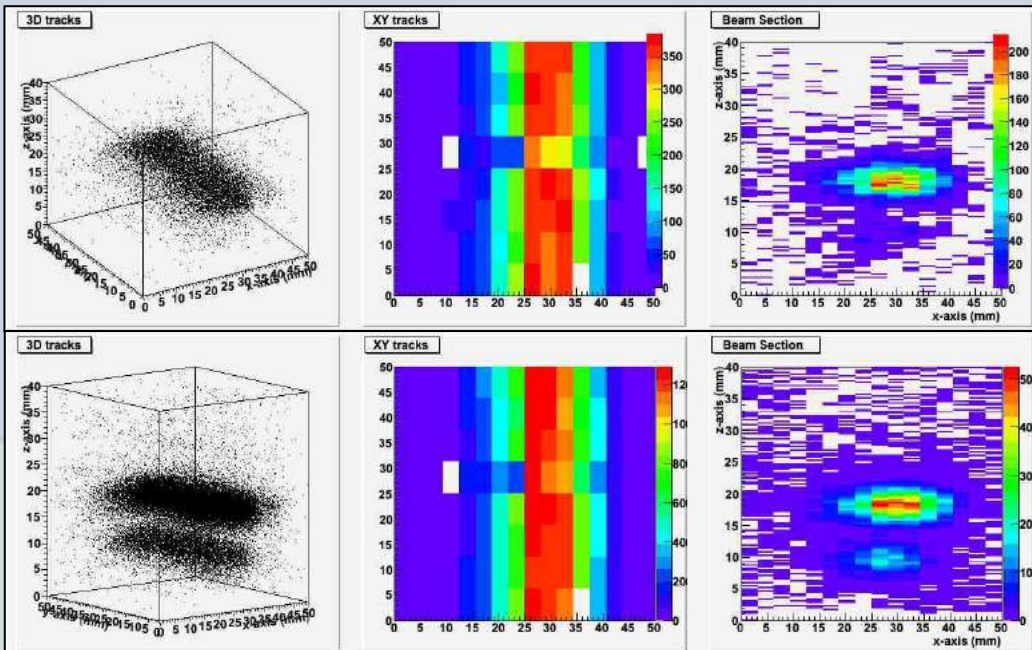
GEM TPC example: channeling



Positron beam, 477 MeV

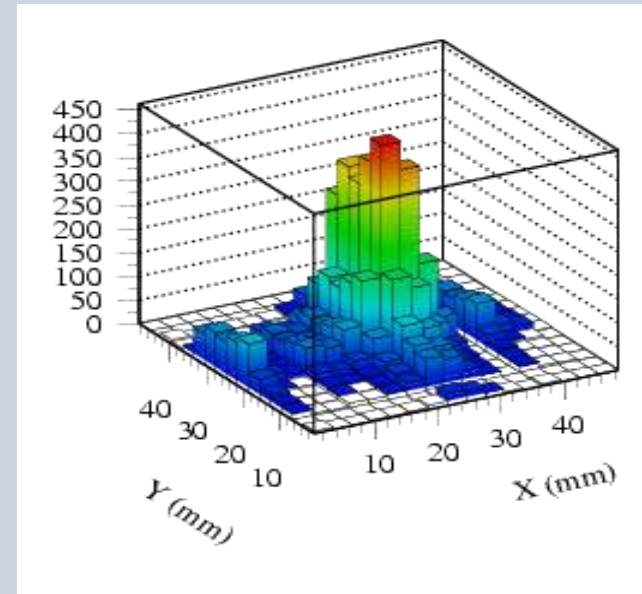
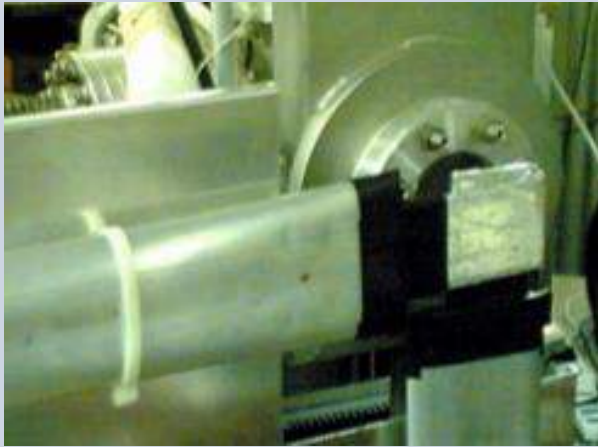
- No channeling

- Channeling

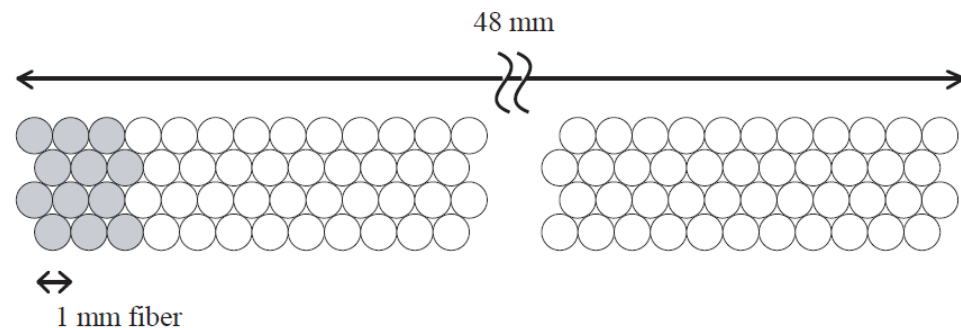




Diagnostics - fiber hodoscope



- 16X16 scintillating fibers
- $\Phi=1\text{mm}/12$ staggered
- 3 mm pitch readout
- 50 Hz gated OK – DAQ BTf
- $48 \times 48 \text{ mm}^2 \rightarrow \sim 23 \text{ cm}^2$ area
- Medium-Low intensity



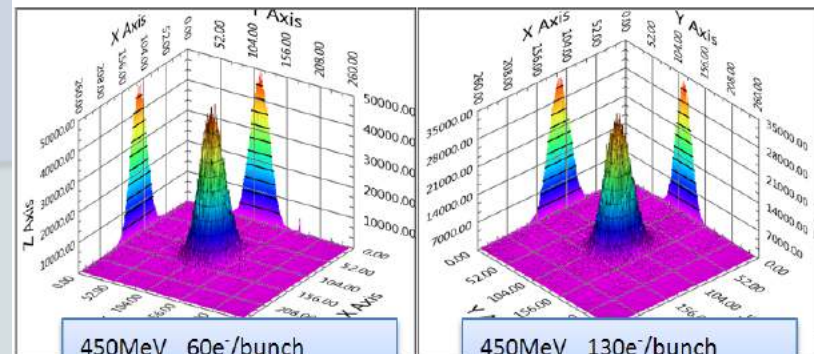
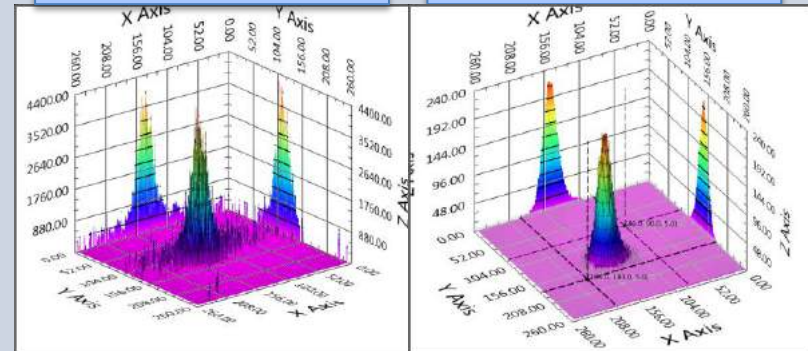


Medipix detector for precision spot measurement

OPTIMIZED BEAM – mixed multiplicity

100MeV single part
 $\sigma_x=0.7$ mm, $\sigma_y=0.8$ mm

450MeV single part
 $\sigma_x=0.5$ mm, $\sigma_y=0.5$ mm



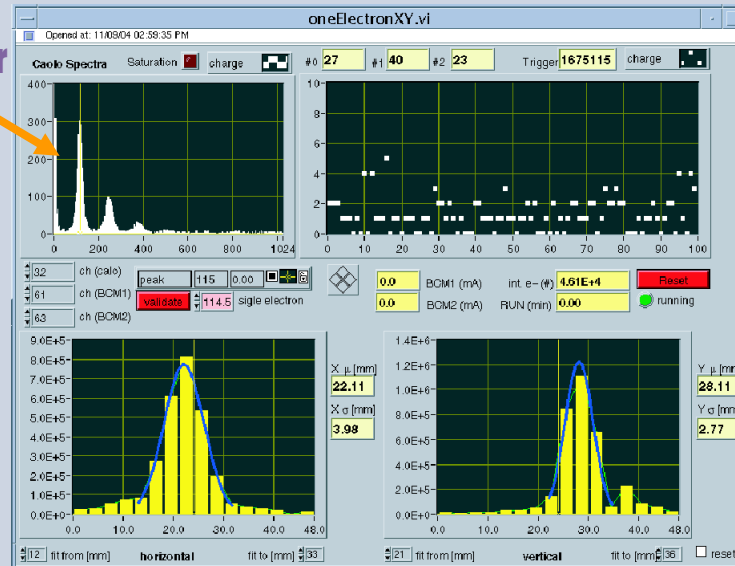
450MeV 60e-/bunch
 $\sigma_x=1.04$ mm, $\sigma_y=0.86$ mm

450MeV 130e-/bunch
 $\sigma_x=1.07$ mm, $\sigma_y=0.87$ mm



Control system

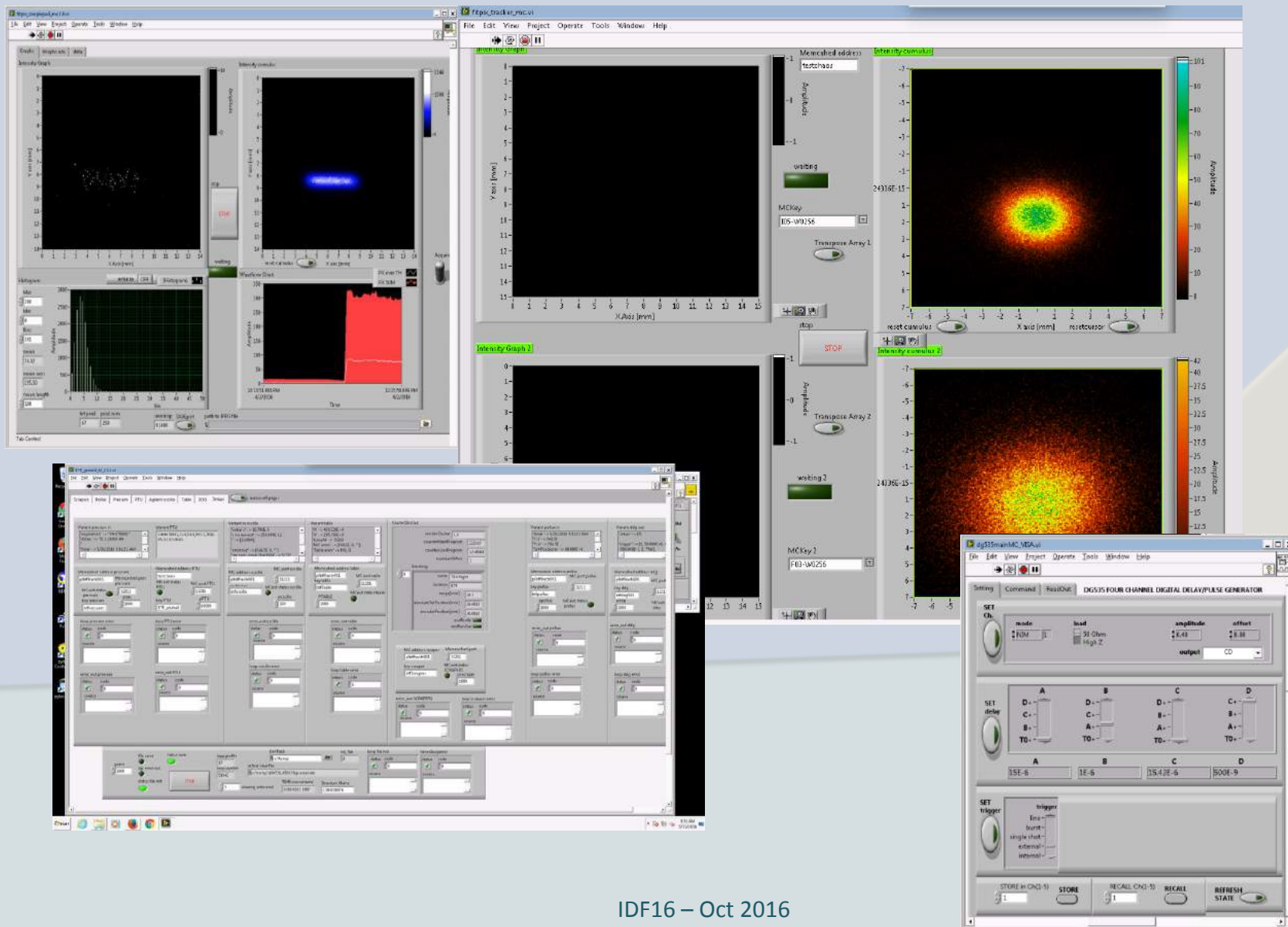
- 'old' online monitor of BTF diagnostics integrated in the DAFNE general control system



calorimeter

XY beam
profile
detector

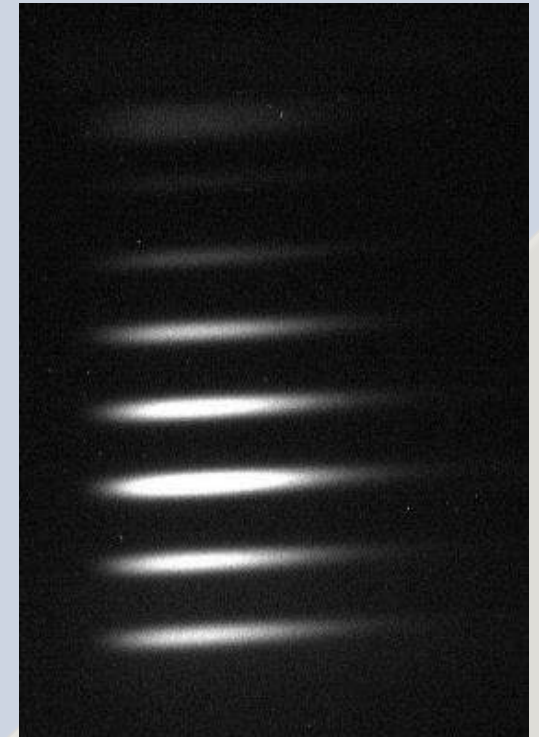
- Many additional bits and pieces added during the last years and have to be integrated:
 - New remotely controlled motorized table
 - GEM TPC acquisition system
 - Slits/collimators/target motors and encoders
 - WCM's oscilloscope readout
- Significant work already done and still under way on controls, in close collaboration (or by) the !CHAOS project
- The BTF line (magnets, controls, diagnostics, tools) will be the first real application of !CHAOS
- First commissioning going on this week
- No nice picture to show, but we expect a brand new (working) system soon



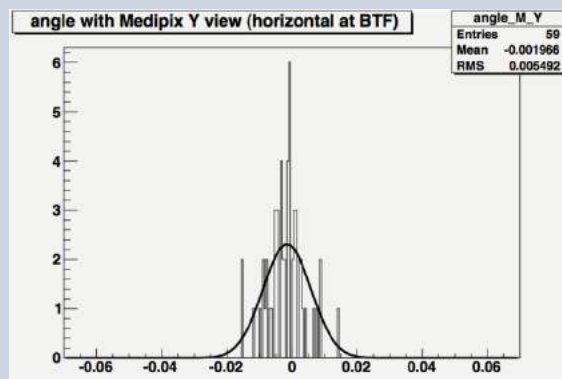
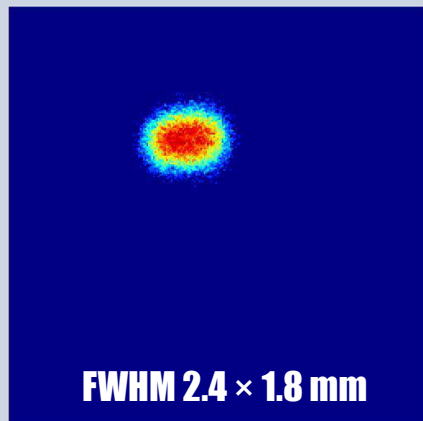


Beam parameters

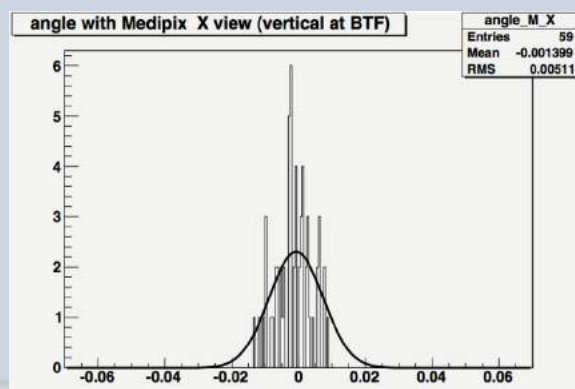
- Measured emittance:
 - $\sqrt{\langle x^2 \rangle} = 4 \text{ mm}$
 - $\sqrt{\langle x'^2 \rangle} = 1.7 \text{ mrad}$
 - $\sqrt{(\langle x \rangle^2 \langle x' \rangle^2 - \langle xx' \rangle^2)} = 4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$



1508 MeV, Pepper pot



2 mrad RMS



1.4 mrad RMS



IUA9 Medipix detector



- <http://www.Inf.infn.it/acceleratori/btf>
- http://wiki.infn.it/strutture/Inf/da/btf/beam_characteristics
- http://www.Inf.infn.it/acceleratori/btf/docs/NIM515_3.pdf
- <https://agenda.infn.it/event/btf2014>

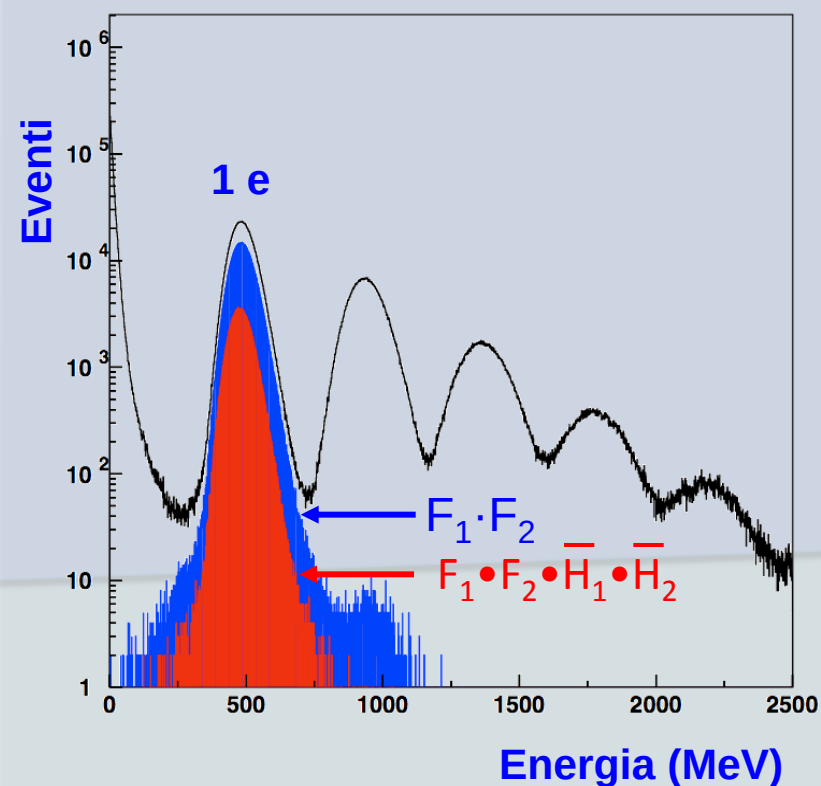
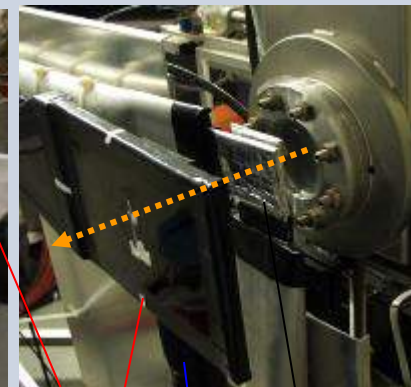
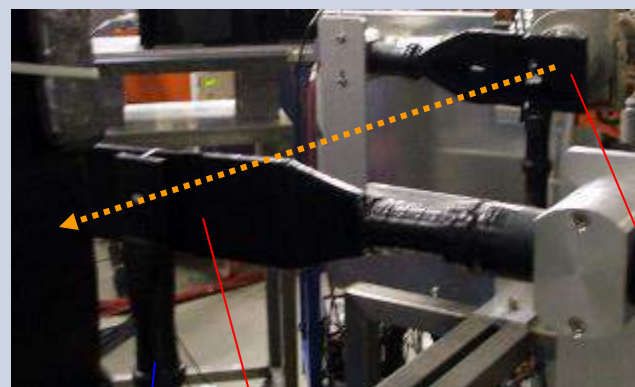
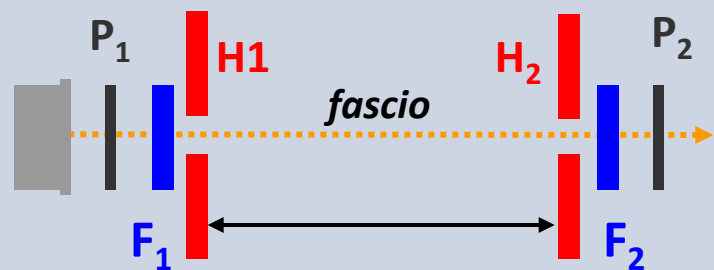


Detector Test a bassa densità



Esempio di applicazione a bassa intensità

(Misura di inefficienza γ veto di NA62 a bassa energia)



Calorimetro
Pb/fibre

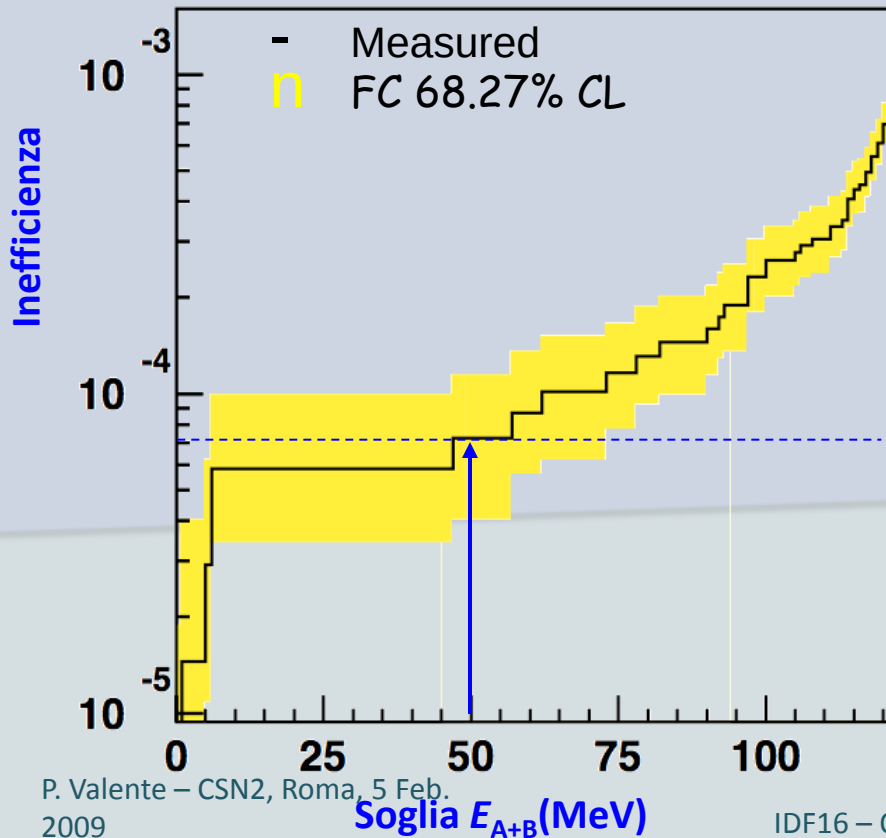
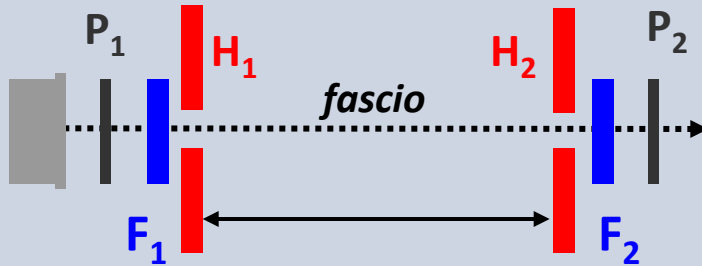
B

A



Esempio di applicazione a bassa intensità

(Misura di inefficienza γ veto di NA62 a bassa energia)



$$1-\epsilon = (7.3^{+4.1}_{-3.3}) \times 10^{-5}$$

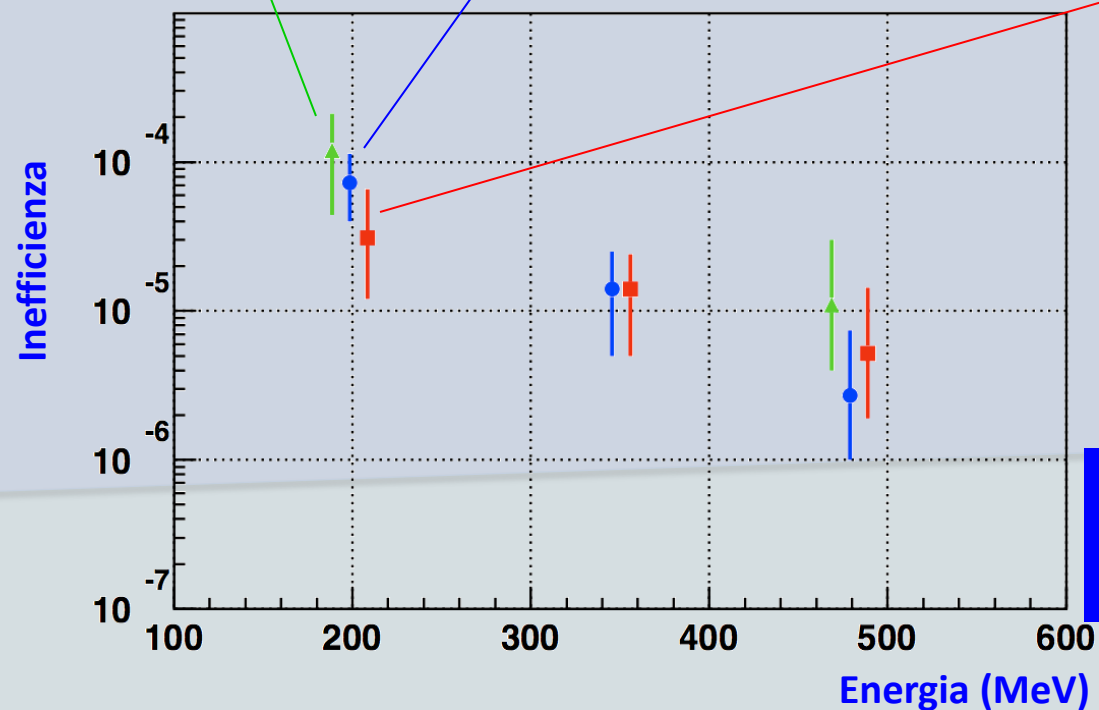
$E_{A+B} < 50 \text{ MeV}$



Vetro al Pb (OPAL)

Calorimetro
Pb/Fibre scintillanti

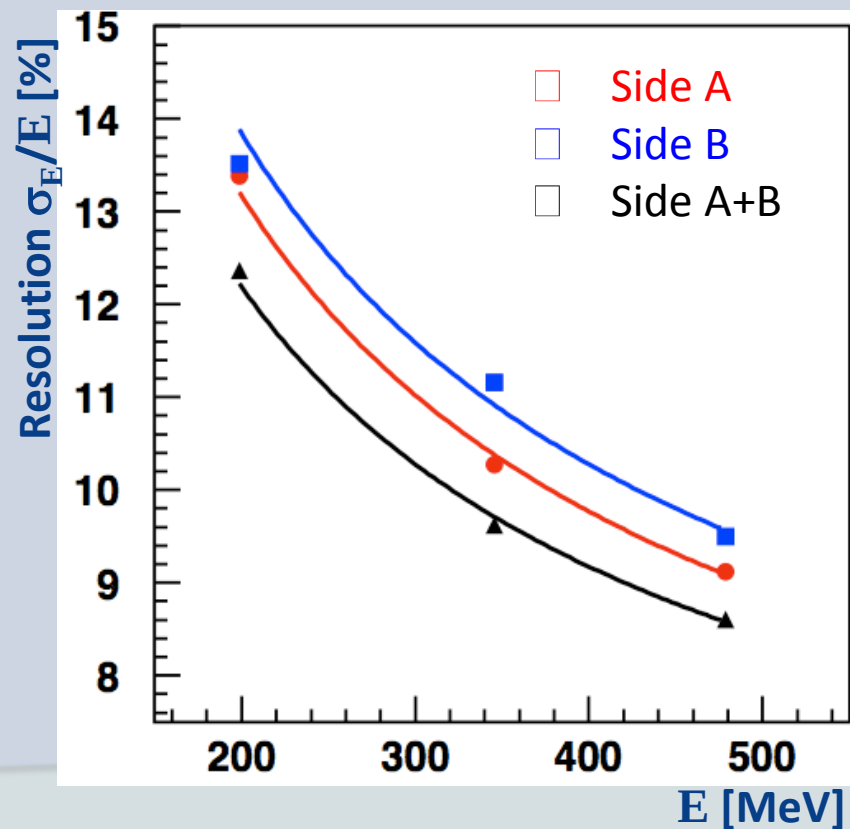
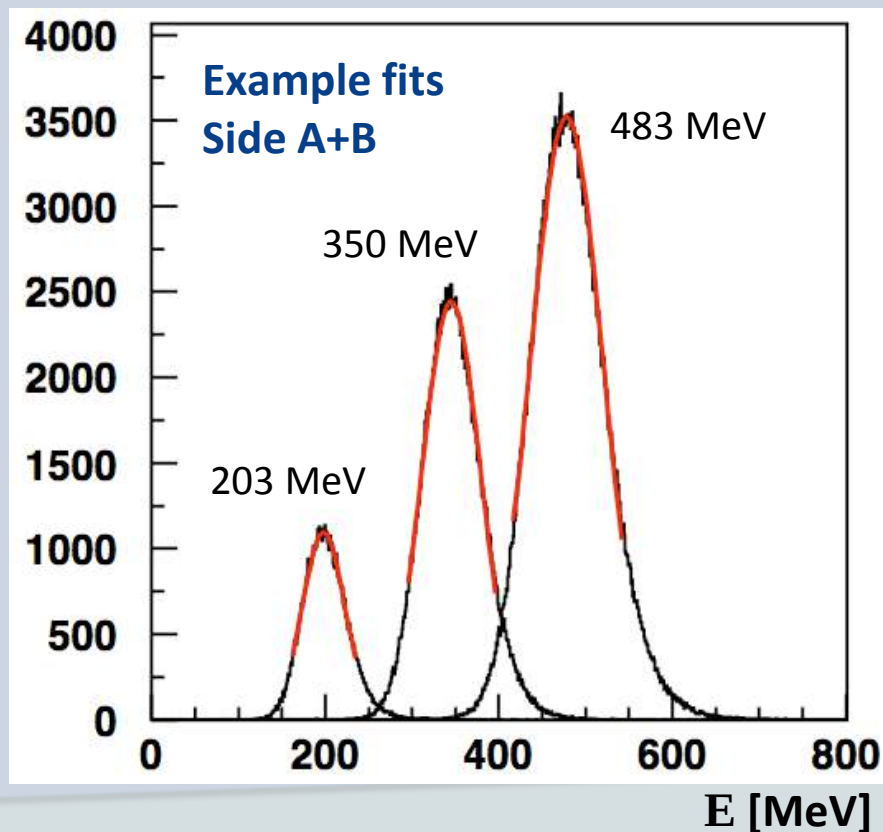
Calorimetro
Pb/Scintillatore+WLS



$E_{\text{meas}} < 50 \text{ MeV}$
No mis-tagging
68.27% FC CLs

Fiber prototype energy resolution

Perform Gaussian fits to $1e^-$ peak ($\square 1.5s$) after run-by-run calibration



Using information from both sides:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{5.1\%}{\square E [\text{GeV}]} \square 4.4\%$$

Small angle calorimeter test 2013

SAC main characteristics

70 lead scintillator sandwiches

1.5mm lead

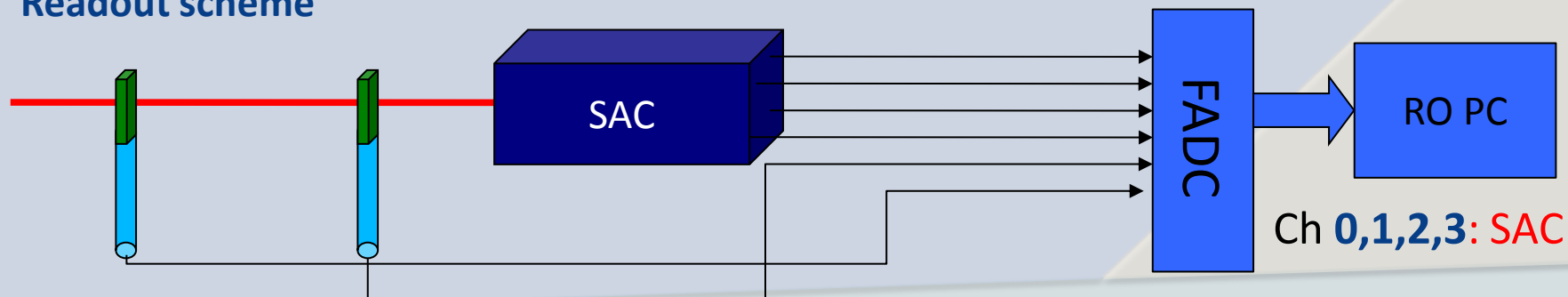
1.5mm scintillator

Kuraray Y-11 (250) 1mm fibers

20.5x20.5 cm² front face

4 Hamamatsu R6427 PMT

Readout scheme



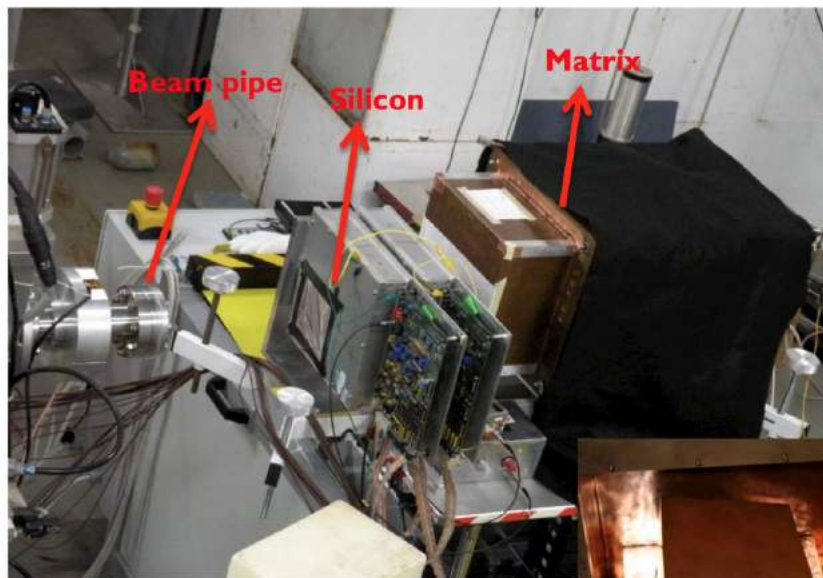
Electron energy: 570MeV to 606 MeV 24 spills per second 10ns spill

Everything readout by a 1 GHz FADC (including the trigger scintillators)

External triggering from the BTF

No trigger bias and possibility for offline study

- ▶ LYSO Matrix
- ▶ Silicon beam telescope:
 - ▶ Single-side 228 μ m strip pitch
 - ▶ 2 planes x-y
 - ▶ Active area 8.75x8.75 cm²

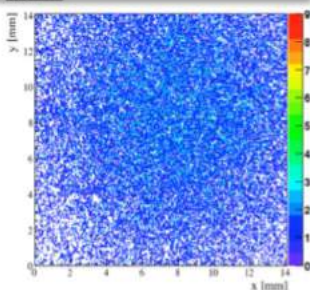


- ▶ Data:
 - ▶ 5 energies: from 99MeV to 487 MeV
 - ▶ 3 different positions

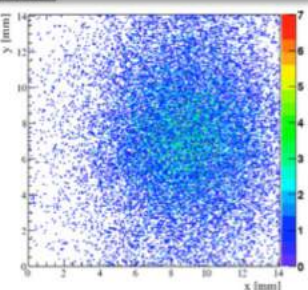


Beam size vs. energy

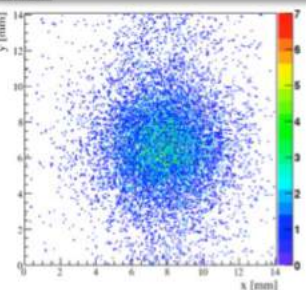
30MeV - single part
 $\sigma_x=4.9$, $\sigma_y=5.3$ [mm]



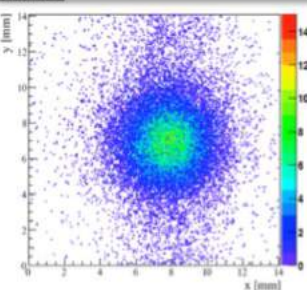
60MeV - single part
 $\sigma_x=2.7$, $\sigma_y=3.4$ [mm]



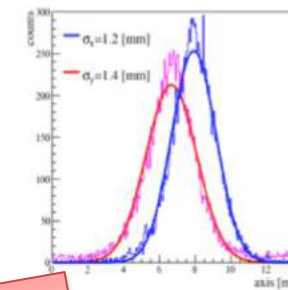
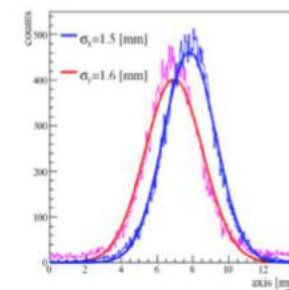
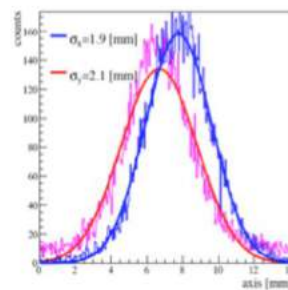
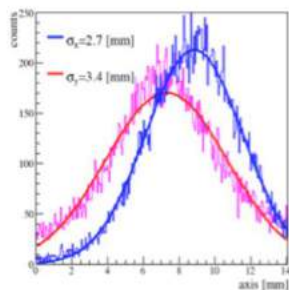
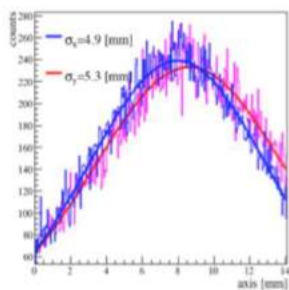
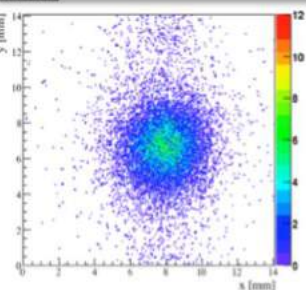
90MeV - single part
 $\sigma_x=1.9$, $\sigma_y=2.1$ [mm]



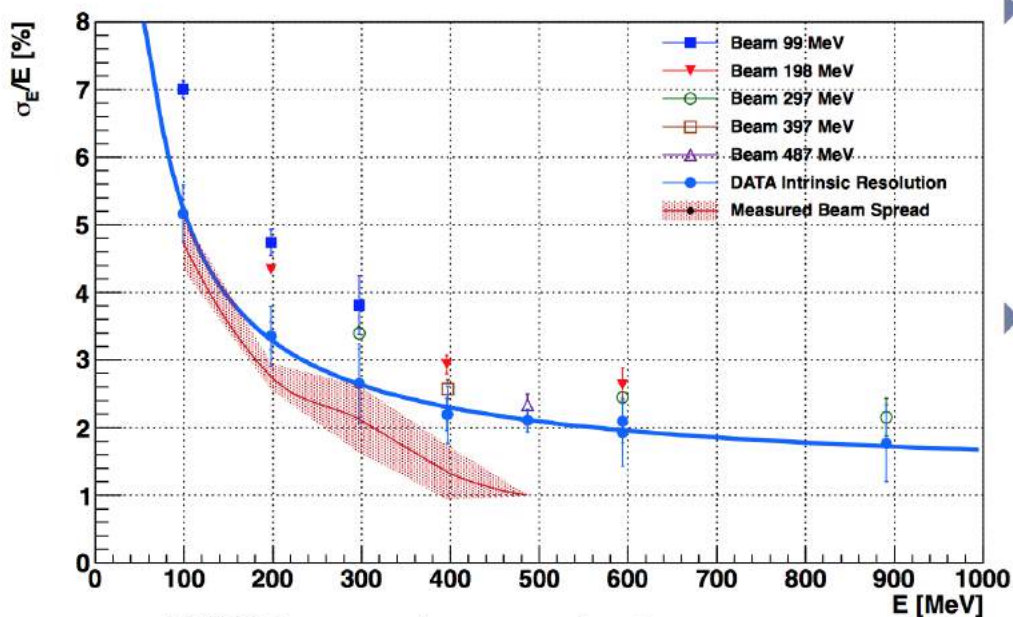
120MeV - single part
 $\sigma_x=1.5$, $\sigma_y=1.6$ [mm]



150MeV - single part
 $\sigma_x=1.2$, $\sigma_y=1.4$ [mm]



Beam for LIMADOU satellite



LYSO matrix resolution

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{1.1\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}} \oplus \frac{0.4\%}{E(\text{GeV})} \oplus 1.2\%$$

Rossi et. al., "A LYSO calorimeter for the SuperB factory", Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 718 (2013)

S. Germani et al., "The SuperB factory electromagnetic calorimeter", J. Phys. Conf. Ser. 404, 012065 (2012)

Beam spread at 500 MeV fixed at 1%

Only one point at this energy, BS can't be extracted

Measured beam spread: May 2012

- ▶ 4.8% at 100 MeV
- ▶ 2.7% at 200 MeV
- ▶ 2.1% at 300 MeV
- ▶ 1.4% at 400 MeV



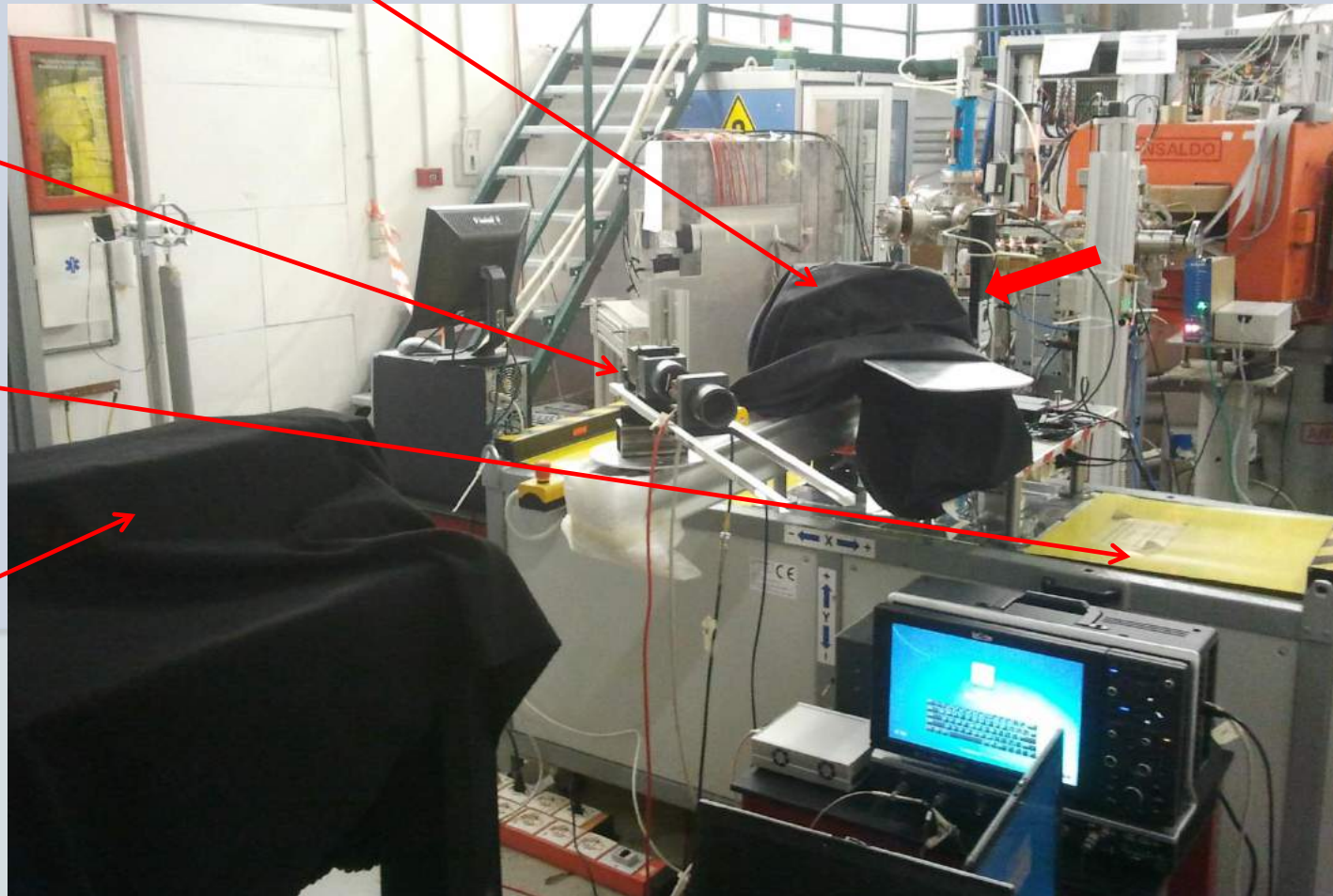
Cherenkov detector test

LAL Cerenkov

INFN Cerenkov

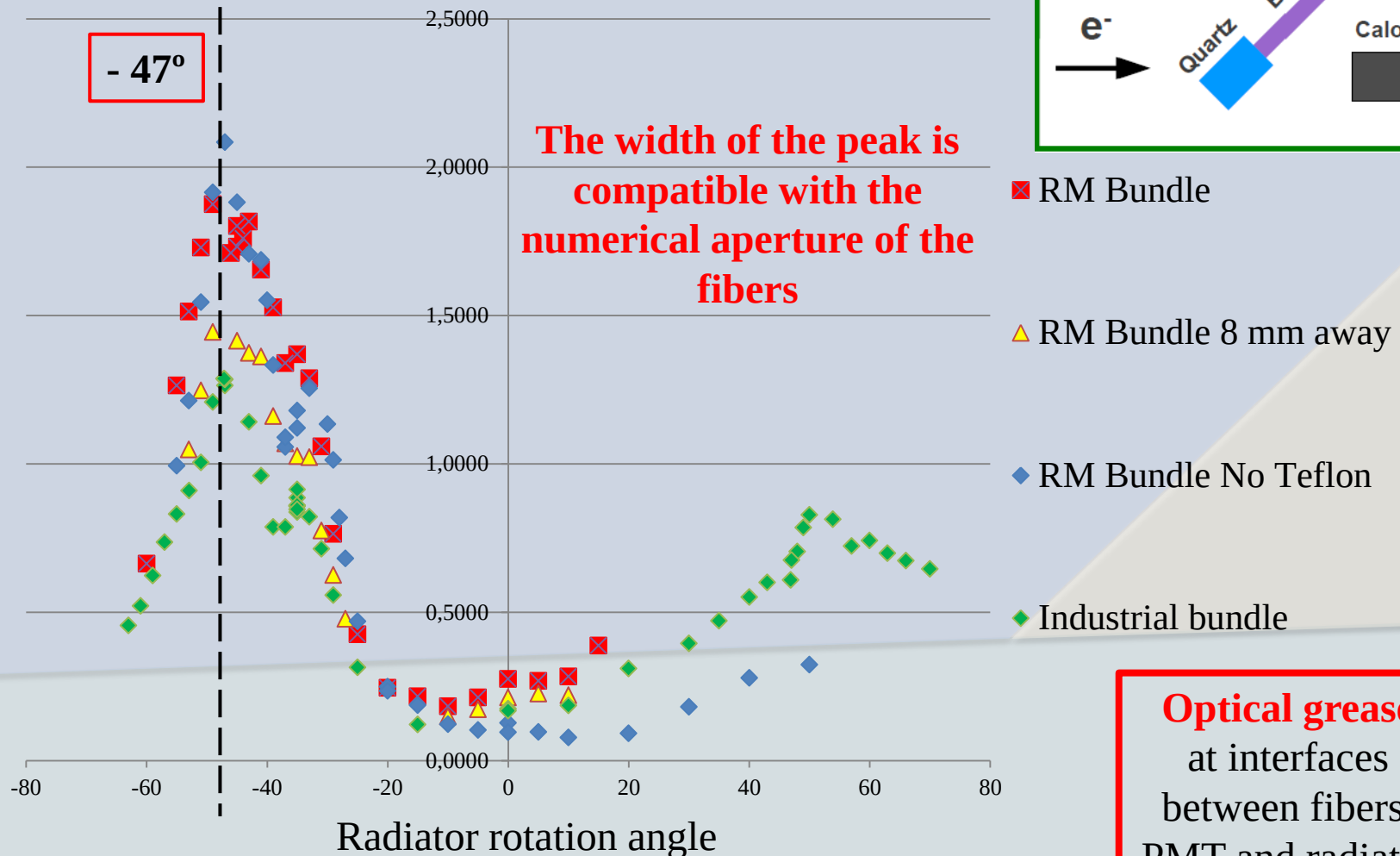
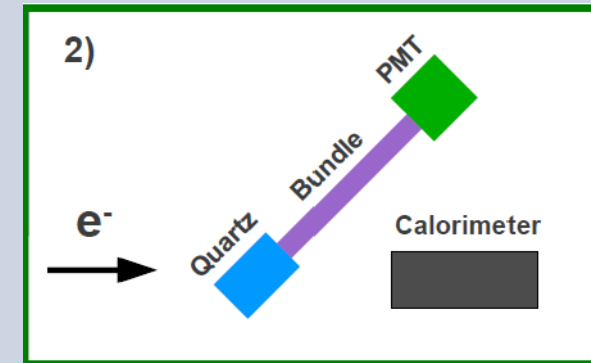
BTF Remote
Control Table

BTF Calorimeter

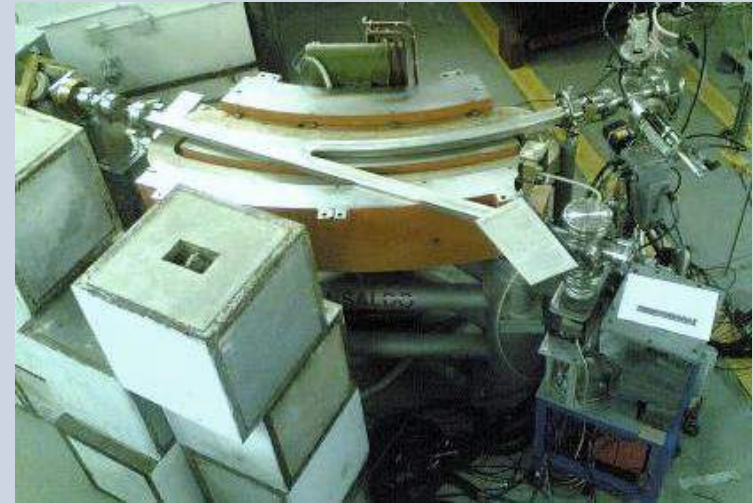
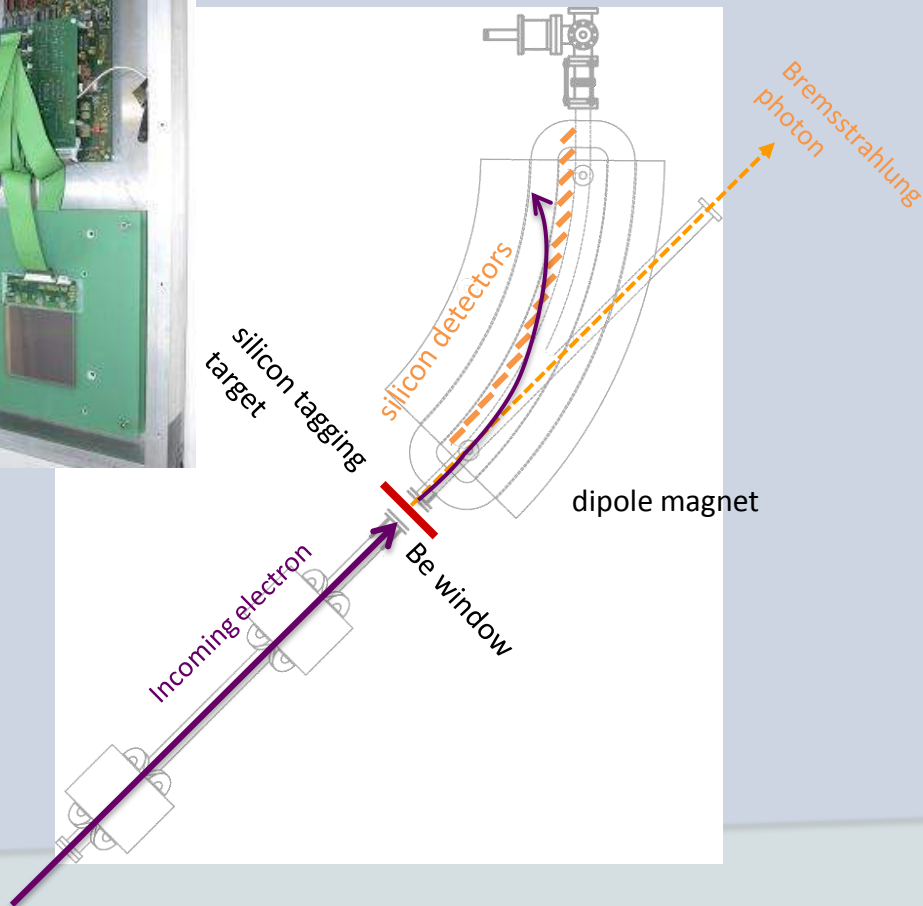


Cherenkov detector test

Charge signal normalized to number of incident electron and electron path length in the radiator (arbitrary units)



Optical grease
at interfaces
between fibers,
PMT and radiator



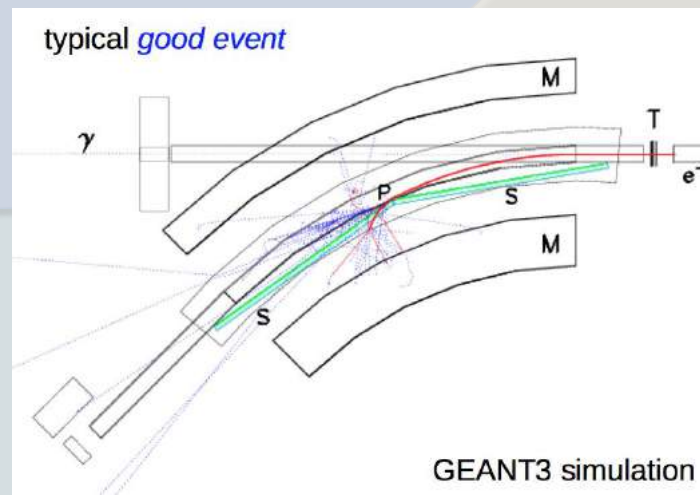
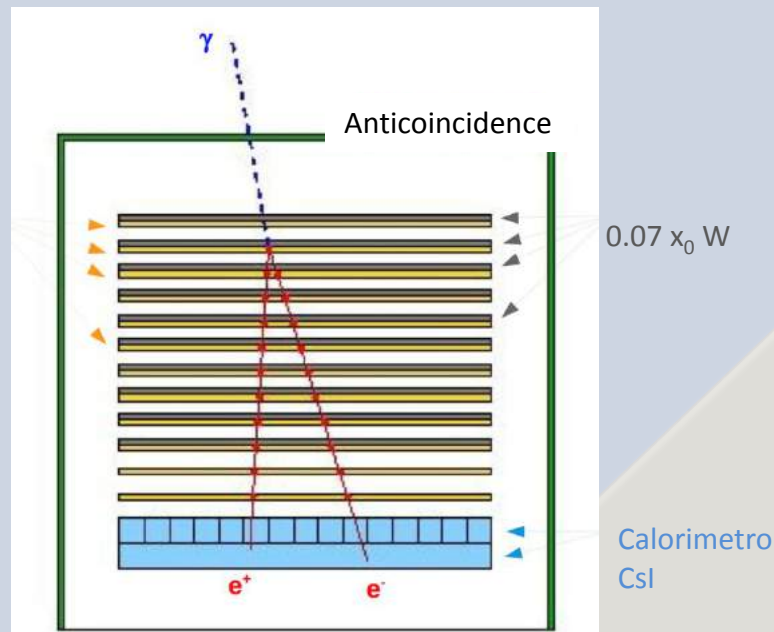
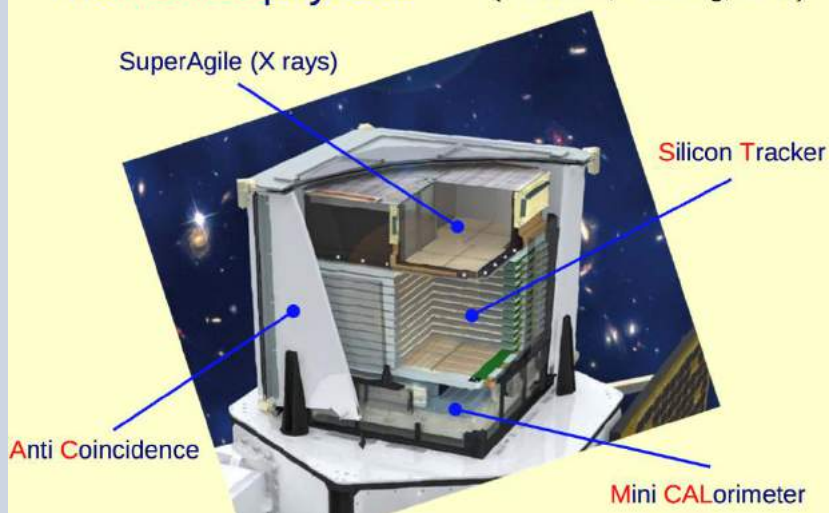
- **Designed and built in close collaboration with the AGILE collaboration with the main purpose of the AGILE scientific payload calibration:**
 - **Silicon trackers + calorimeter**

Test del payload di AGILE

The AGILE payload

($\approx 0.25 \text{ m}^3$, $\approx 120 \text{ Kg}$, 60 W)

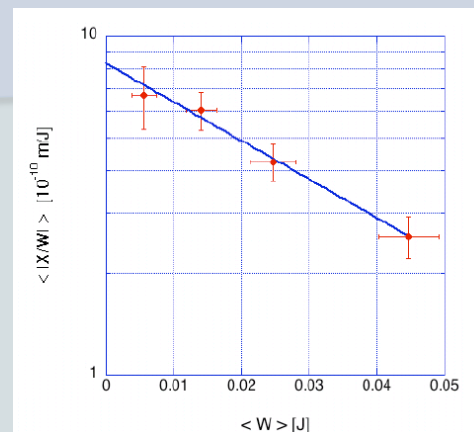
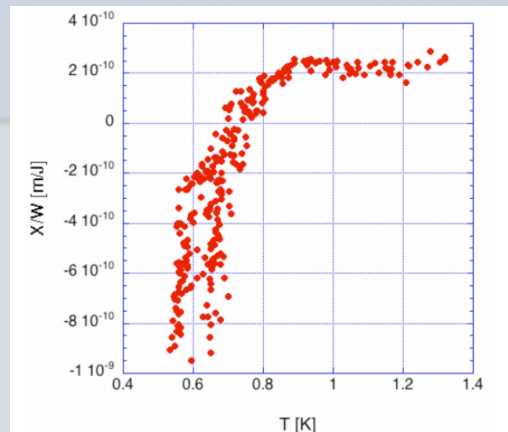
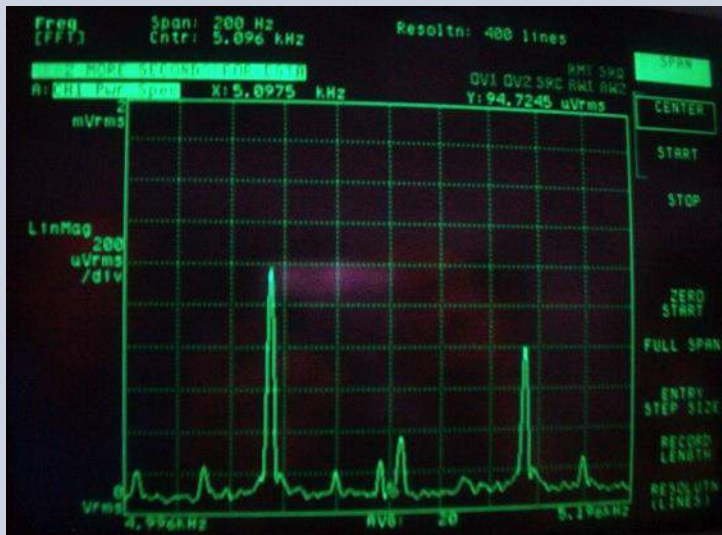
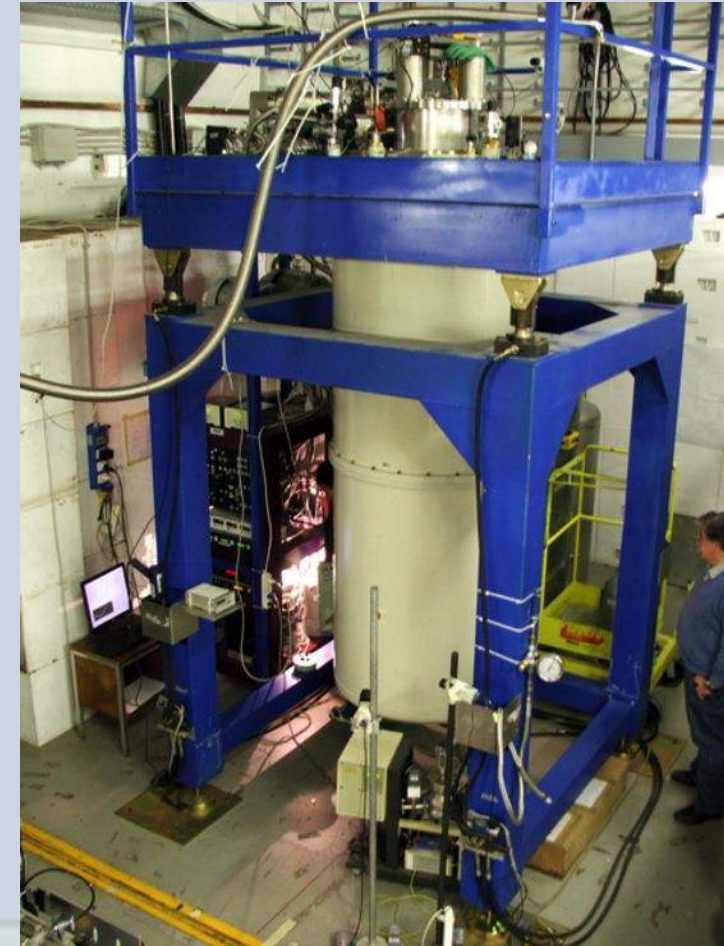
12 piani xy
di Silicio
 $0.01 x_0$

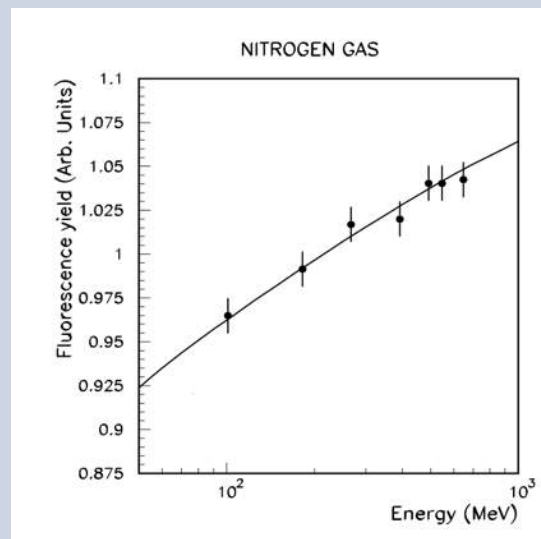
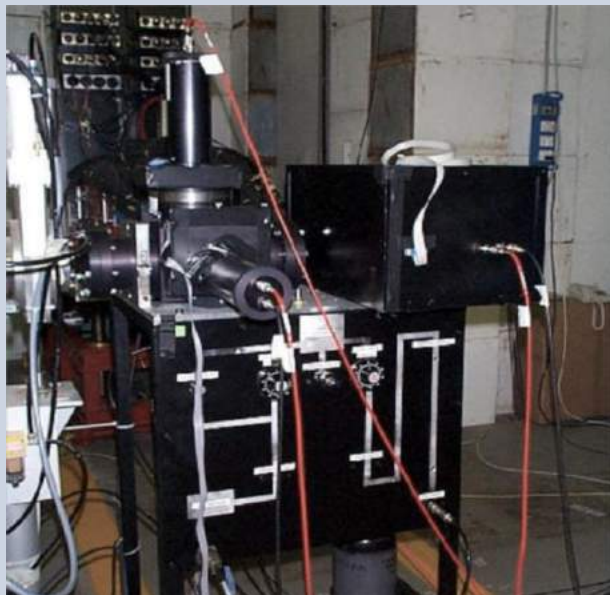




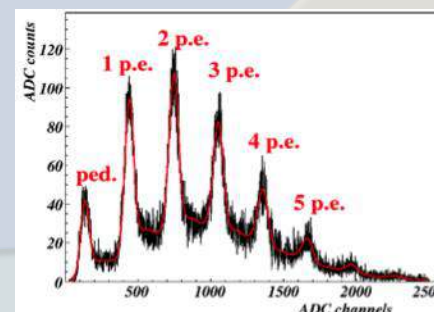
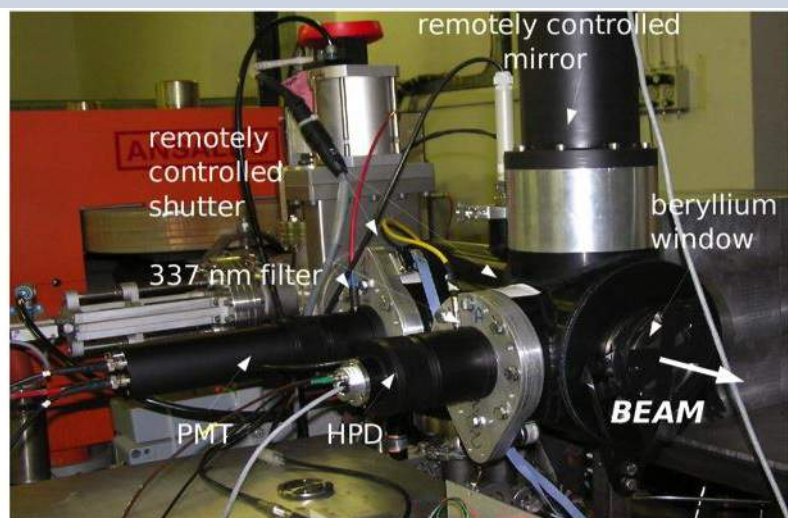
Detector Test ad alta intensità

- Study of thermo-acoustic effect on cryogenic resonant antenna due to charged particles (background to GW detectors like Nautilus)
- Runs in 2003, 2005 and 2009





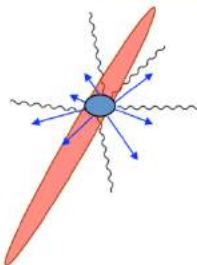
2003: first run
Fluorescence yield
relative to Cerenkov



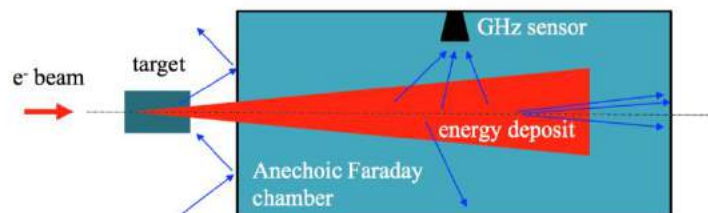
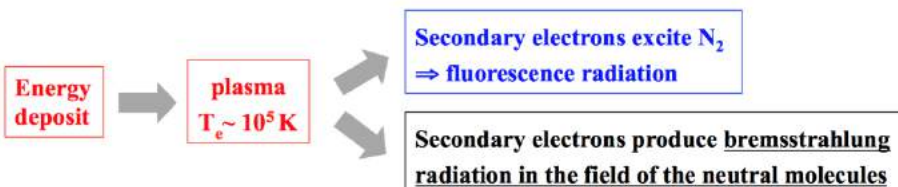
2008:
Absolute fluorescence yield measurement

Microwave Bremsstrahlung Radiation (MBR)
isotropic and not polarized (like fluorescence radiation)

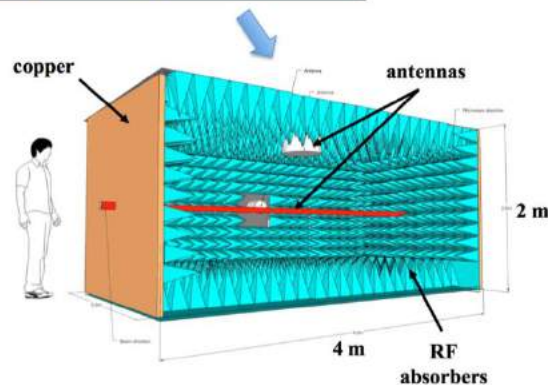
Radio telescope ~ GHz
duty cycle ~ 100%

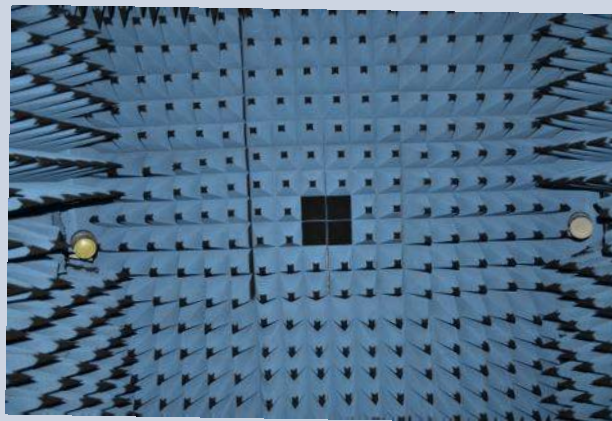
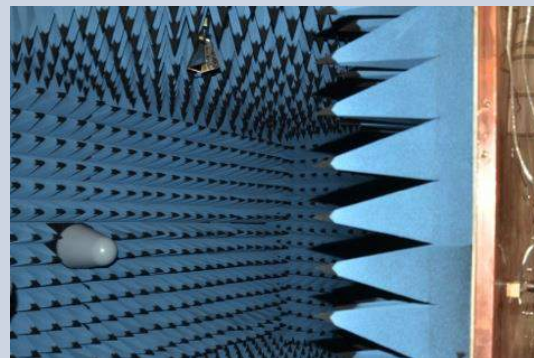


Fluorescence telescope
duty cycle ~ 10%



- MBR ~ energy deposit
- shield from outside radiation
- avoid reflections within the chamber

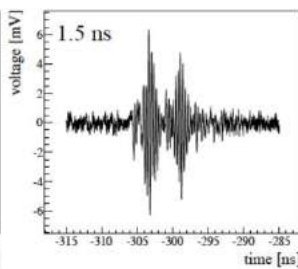
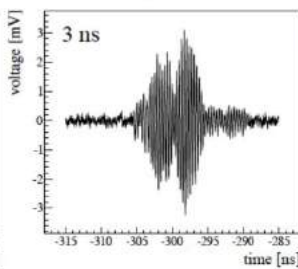
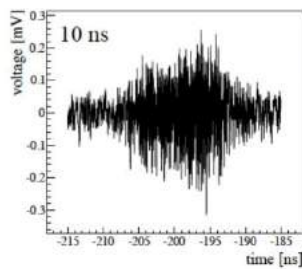




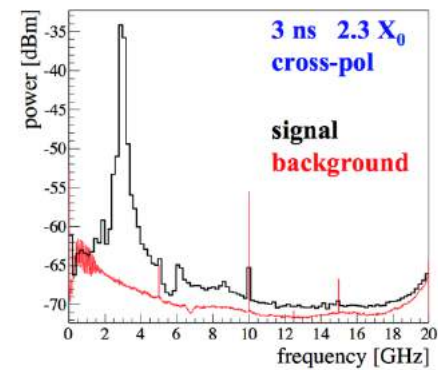
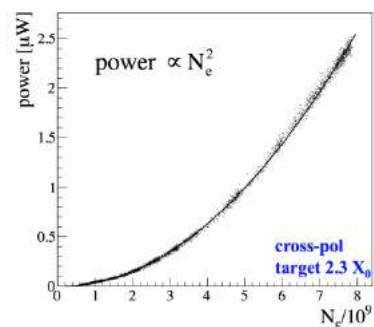
December 2011

May 2012

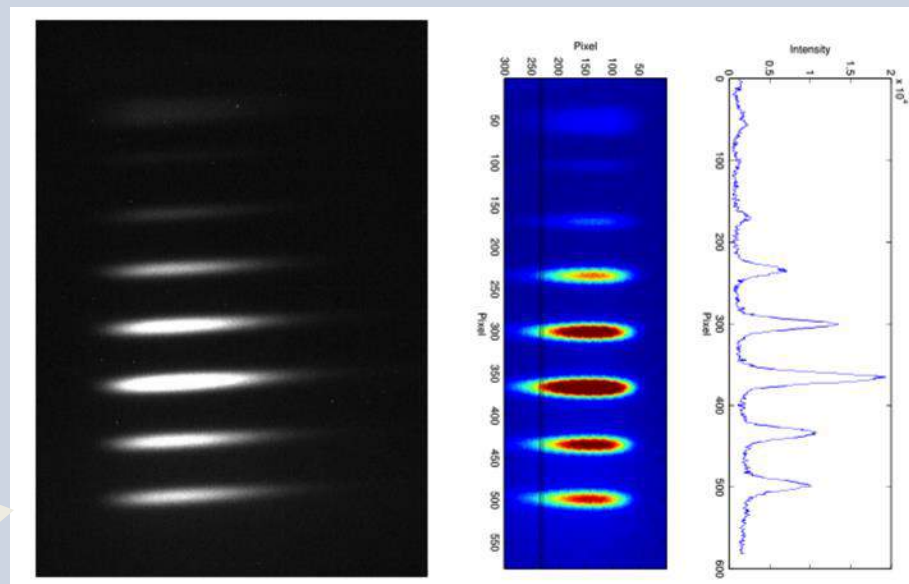
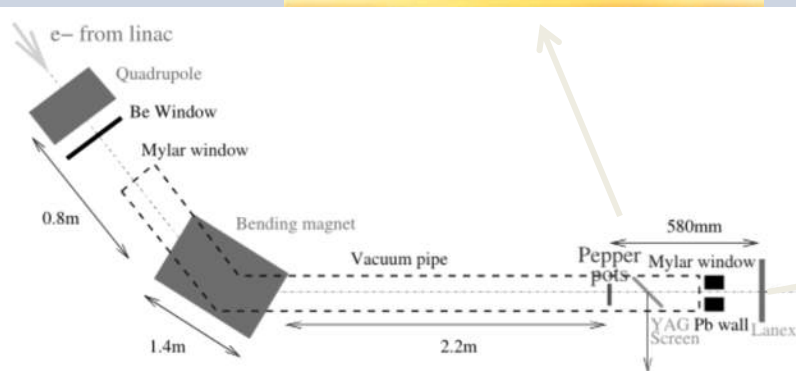
December 2012



POWER vs BEAM INTENSITY



Emittance measurement



Measured emittance @ 508 MeV:

$$\sqrt{\langle x^2 \rangle} = 4 \text{ mm}$$

$$\sqrt{\langle x'^2 \rangle} = 1.7 \text{ mrad}$$

$$\sqrt{(\langle x \rangle^2 \langle x' \rangle^2 - \langle x x' \rangle^2)} = 4 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$$