

Incontri di Fisica 2002: Beam Test Facility

Incontri di
fisica

2002



Giovanni Mazzitelli
Paolo Valente
Giampiero Di Pirro

Laboratori Nazionali di Frascati



Principi di rivelazione/identificazione di particelle

- Interazioni di particelle cariche (pesanti), perdita di energia
- Interazioni di elettroni
- Interazioni dei fotoni
- Sciame elettromagnetico
- Cenni di calorimetria, risoluzione energetica
- Sciame adronico e calorimetri adronici
- Rivelatori a scintillazione e fotorivelatori
- Cenni sui rivelatori gassosi
- Spettrometri magnetici
- Esperimenti ai grandi *collider*
- Identificazione di particelle

Principi di acquisizione dati (DAQ = Data Acquisition)

- Elettronica analogica e digitale
- Standard di acquisizione: CAMAC, VME, VXI, ...
- Discriminatori, ...
- Logica dell'acquisizione, coincidenze, concetto di **trigger**

Calibrazione e test di rivelatori

- Principi generali (*performance* di rivelatori, calibrazione, ...)
- Cenni su acceleratori di particelle
- La *beam test facility* di *DAΦNE* a Frascati (BTF)

- Un esempio concreto: calibrazione di un calorimetro elettromagnetico



Energia, impulso e unità di misura

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Energia E misurata in eV impulso p misurato in eV/c massa m_0 misurata in eV/c²

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$E = m_0 \gamma c^2 \quad m_{\text{elettrone}} = 5.11 \cdot 10^5 \text{ eV}/c^2 = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

$$p = m_0 \gamma \beta c \quad m_{\text{protone}} = 9.383 \cdot 10^8 \text{ eV}/c^2 = 0.9383 \text{ GeV}/c^2$$

Quanta energia è 1 eV? $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ Kg}$

$$\beta = \frac{pc}{E}$$

$$\gamma = \frac{E}{mc^2}$$

$$m_{\text{ape}} = 1 \text{ g} = 5.8 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

$$v_{\text{ape}} = 1 \text{ m/s} \rightarrow E_{\text{ape}} = 10^{-3} \text{ J} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

ma...



In un “fascio” nelle macchine acceleratrici vengono ‘accumulate’ molte particelle

$$10^{10} \text{ in DA}\Phi\text{NE}$$

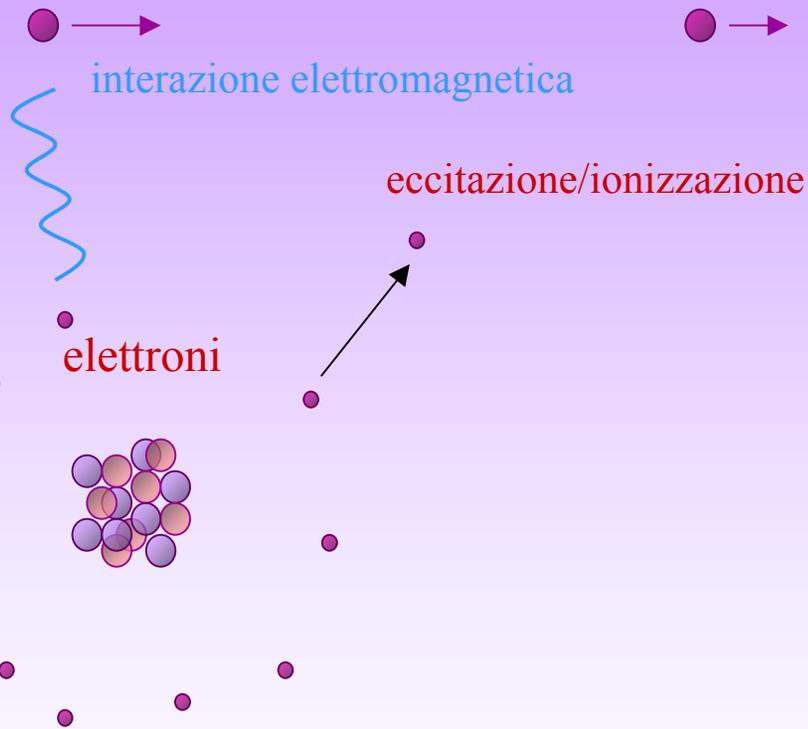
Le particelle vengono accelerate ad energie molto maggiori della massa di riposo (ultra-relativistiche)

$$0.5 \cdot 10^9 \text{ eV in DA}\Phi\text{NE}$$



Interazioni radiazione/materia

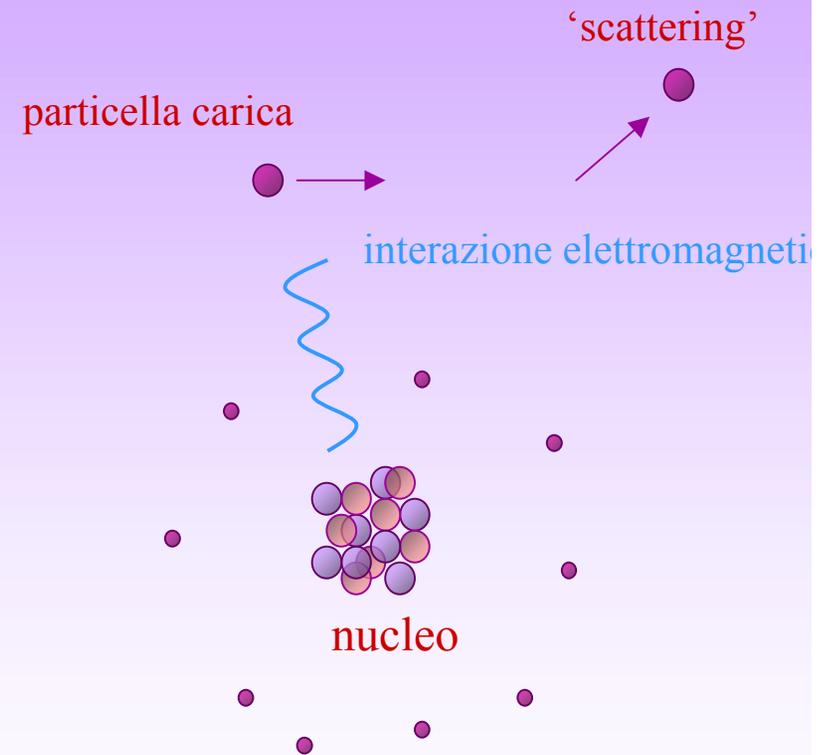
particella carica



Interazioni radiazione/materia

Incontri di fisica

2002

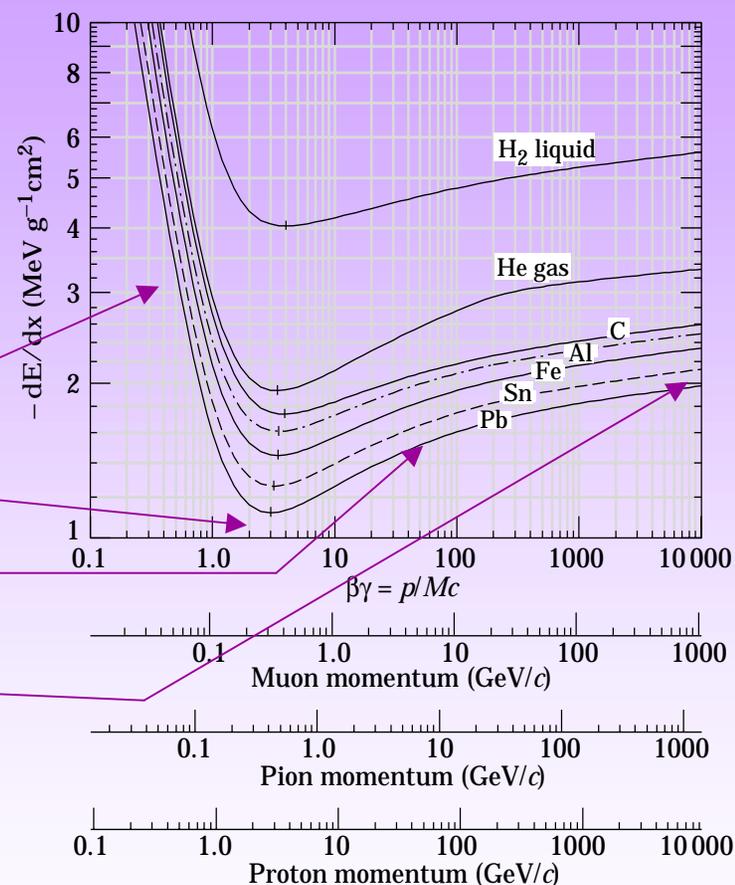


Perdita di energia per ionizzazione: dE/dx

Se espressa in termini di p/m la perdita di energia per unità di lunghezza (e di densità) dE/dx non dipende dalla massa della particella ma solo dalla velocità (β).

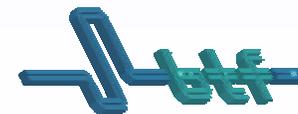
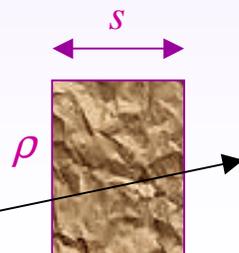
La forma caratteristica della perdita di energia per ionizzazione presenta:

- una **discesa** proporzionale a $1/\beta^2$ per bassi β ,
- raggiunge poi un **minimo**
- quindi risale quando le particelle diventano relativistiche (**risalita relativistica**);
- il dE/dx in realtà satura per effetti di schermo della carica atomica (**plateau di Fermi**)



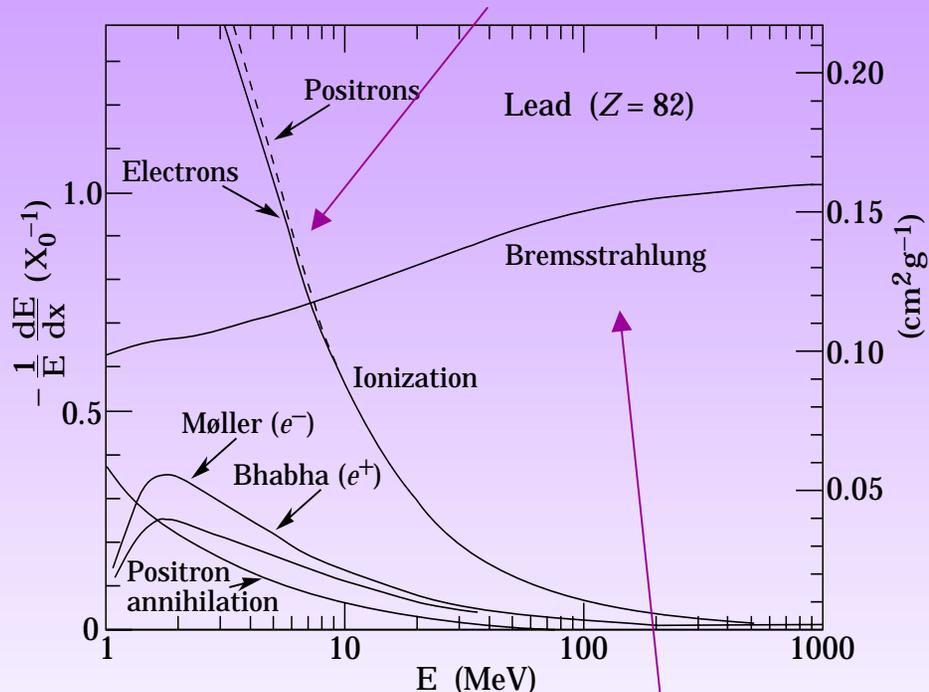
$$\beta\gamma = \frac{p}{mc}$$

$$x = \frac{s}{\rho}$$



Perdita di energia di elettroni (e positroni)

A bassa energia domina la ionizzazione...



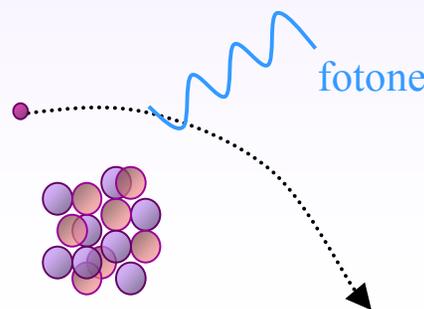
La perdita di energia *per radiazione* diventa praticamente proporzionale all'energia degli elettroni...

$$X_0 = \frac{180 A (g \text{ cm}^{-2})}{Z^2}$$

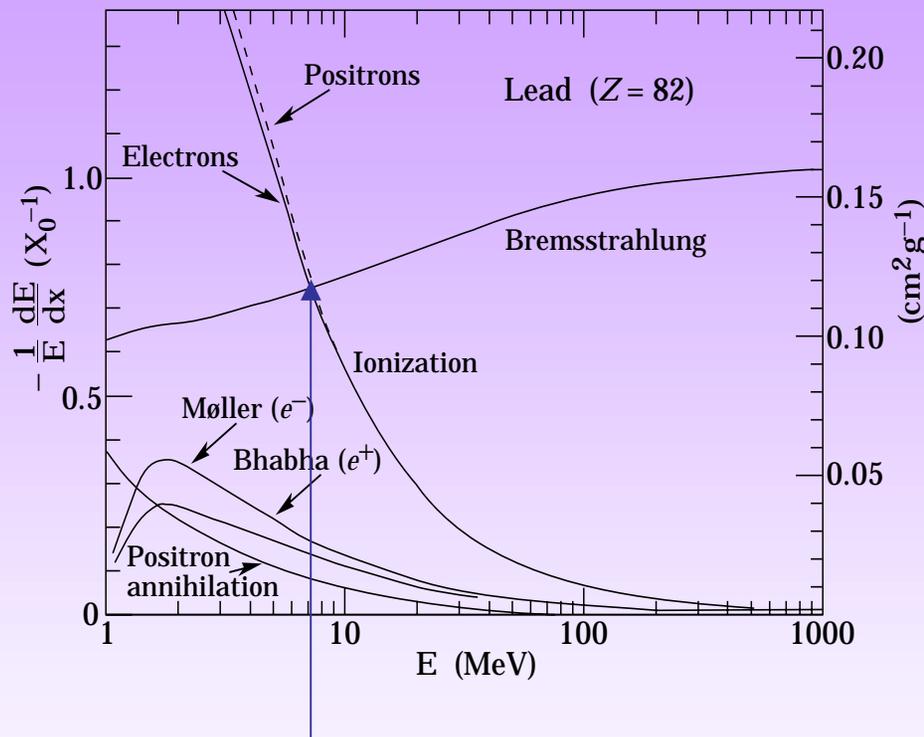
$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{E}{X_0}$$

... e tutti i materiali si comportano allo stesso modo se lo spessore è espresso in termini della lunghezza di radiazione X_0

... ma per energie di elettroni/positroni $> 10 \text{ MeV}$ entra in gioco il fenomeno della **bremstrahlung**, ovvero l'emissione di fotoni dovuta all'effetto accelerante del campo Coulombiano dei nuclei



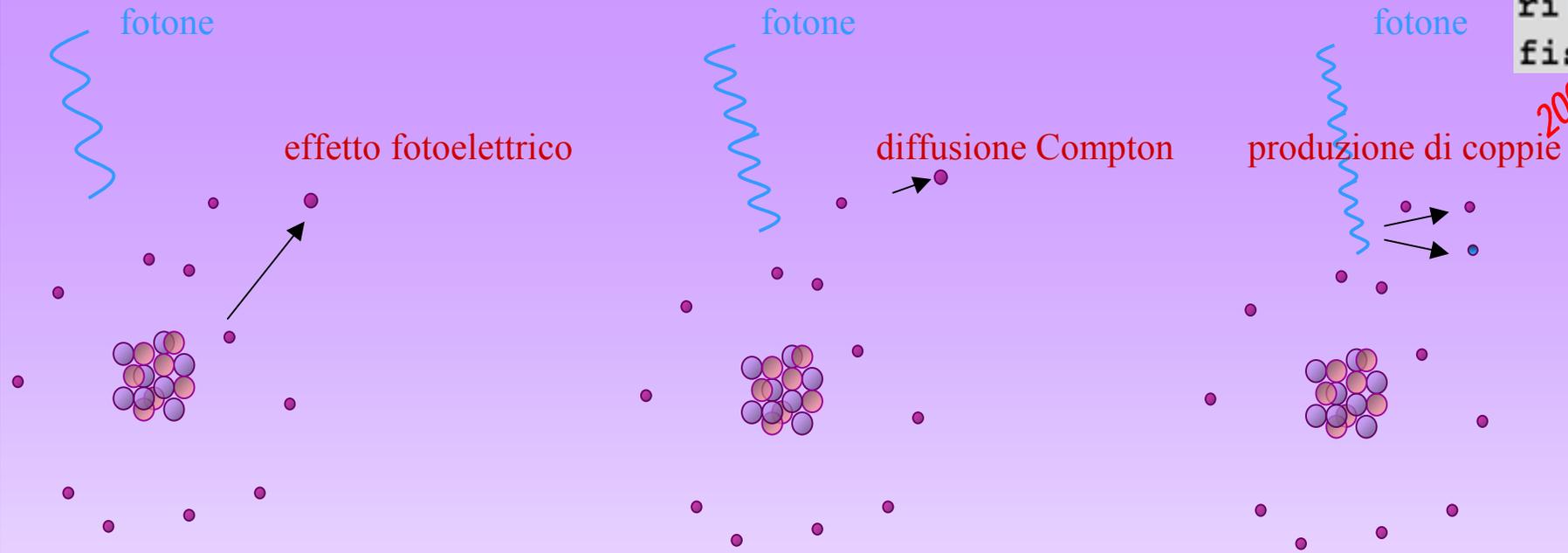
Perdita di energia di elettroni (e positroni)



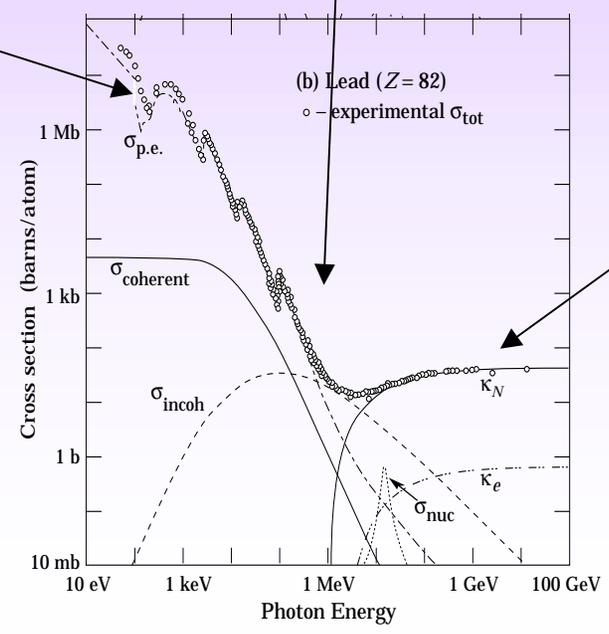
$$\epsilon = \frac{550 \text{ (MeV)}}{Z}$$

L'energia al di sotto della quale domina la perdita di energia per ionizzazione è detta energia critica ϵ

2002



Interazioni dei fotoni

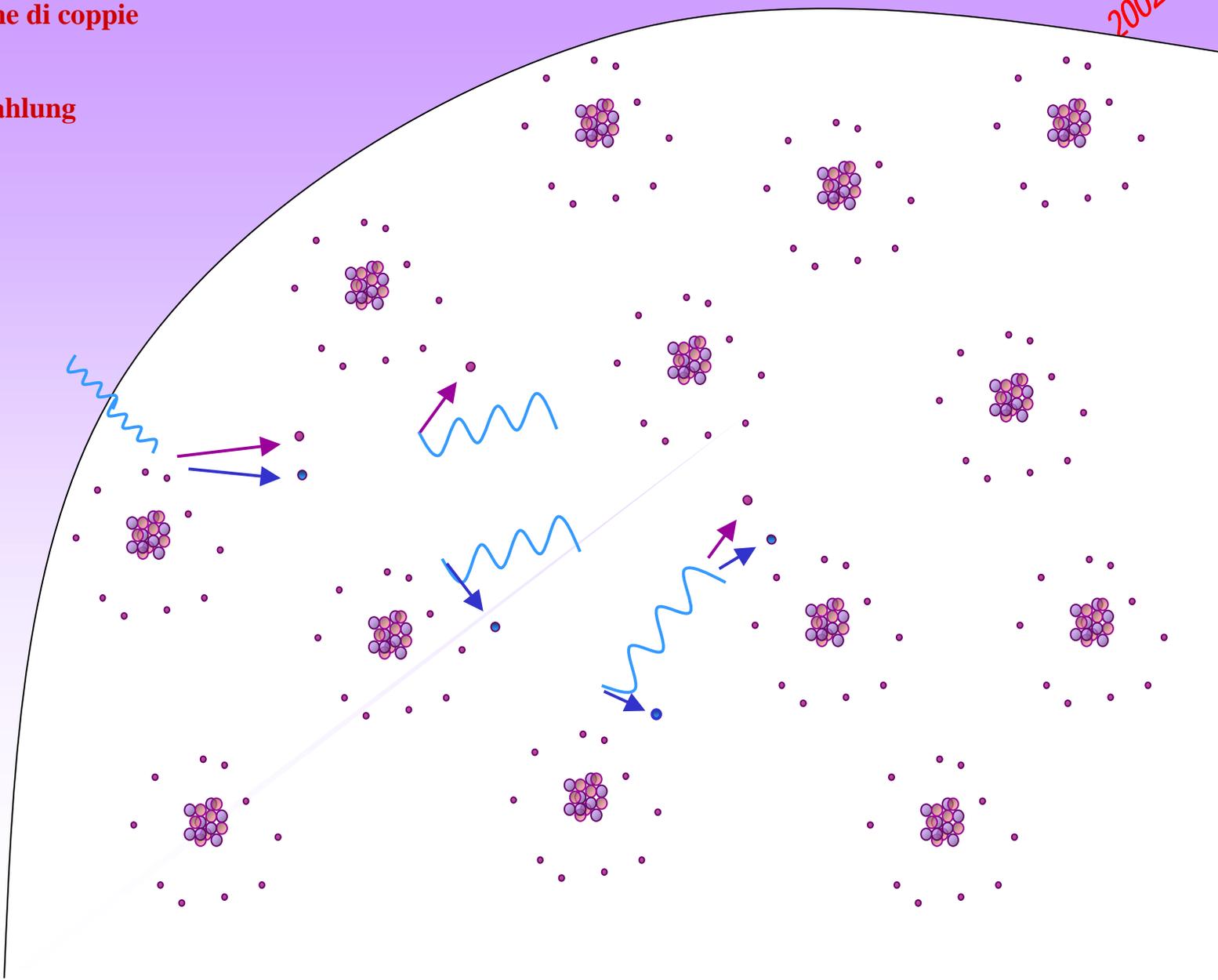


Lo sciame elettromagnetico

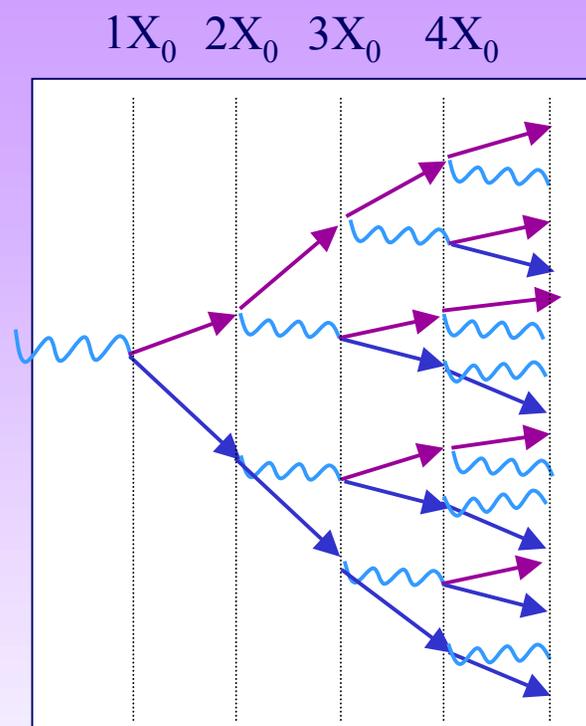
Ad alte energie:

 produzione di coppie

 bremsstrahlung



Lo sciame elettromagnetico



Approssimazione di Rossi 'B':

- la probabilità di ionizzazione non dipende dall'energia: $dE/dx = -\epsilon/X_0$
- si trascura lo 'scattering' di Coulomb sui nuclei e lo sciame è trattato in una sola dimensione
- non si considerano altri effetti come lo 'scattering' Compton sugli elettroni atomici

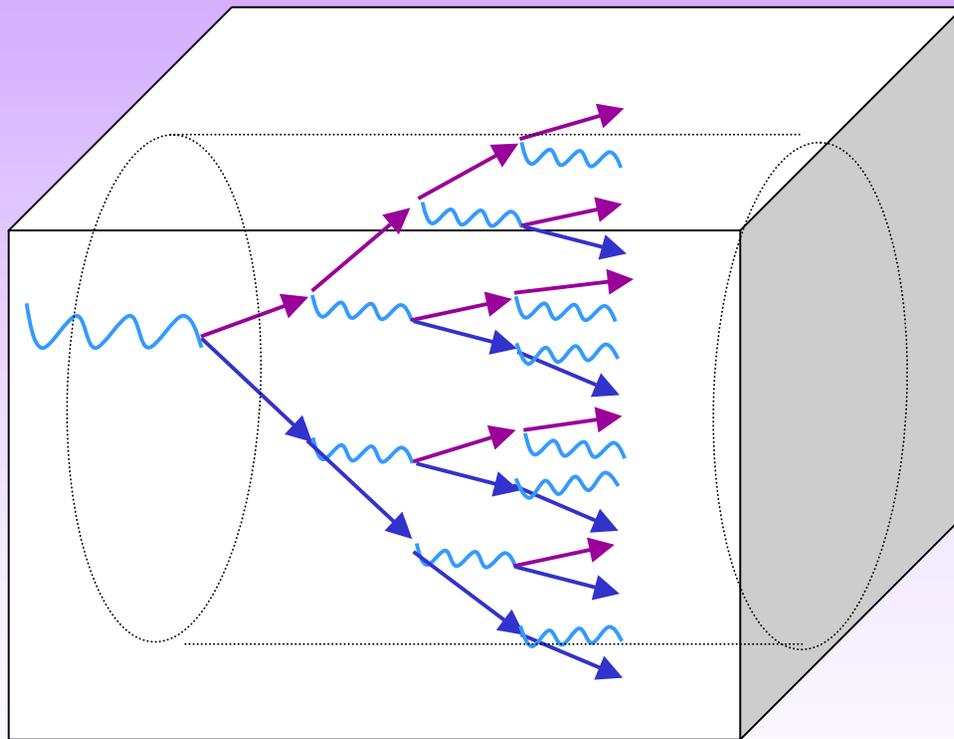
In questa approssimazione la lunghezza di traccia di tutte le particelle secondarie cariche è proporzionale all'energia della particella incidente:

$$T = \frac{E}{\epsilon} \text{ in unità di } X_0$$

Se il blocco di materiale è 'attivo' cioè è possibile rivelare l'energia depositata dalle particelle secondarie cariche quando la loro energia diventa inferiore all'energia critica, abbiamo un rivelatore in grado di misurare l'energia della particella incidente, cioè un **calorimetro**.

Calorimetri (elettromagnetici)

Nella dimensione longitudinale la posizione del picco dello sciame cresce solo con il logaritmo dell'energia E della particella incidente, questo permette di realizzare rivelatori compatti; la maggior parte dello sciame è contenuta in uno spessore di $15 X_0$



Nella dimensione trasversale lo sciame si allarga a causa dell'angolo di emissione dei fotoni e del multiplo scattering, la maggior parte delle particelle è però contenute in un cilindro di raggio $2\rho_M$ (raggio di Molière)

$$\rho_M = \frac{21 X_0 (\text{g cm}^{-2})}{\epsilon} = \frac{7A}{Z}$$

Calorimetri: misura dell'energia

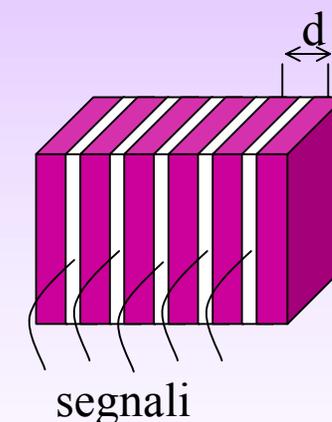
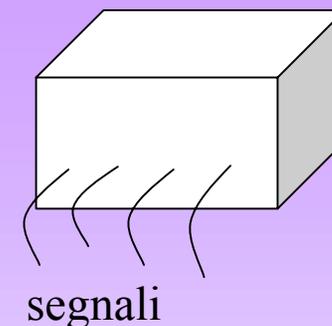
Esistono 2 principali tipi di calorimetro:

- omogeneo (tutto il materiale è **attivo**, cioè in grado di rivelare l'energia persa per ionizzazione)

L'energia della particella incidente è proporzionale al numero di secondari N , le fluttuazioni sono proporzionali a \sqrt{N} , la risoluzione della misura di energia è dunque $\sigma_i(E)/E \propto 1/\sqrt{E}$

- a 'sampling' (campionamento), strati di materiale assorbitore o **passivo** sono alternati a strati di materiale attivo.

Alle fluttuazioni intrinseche si aggiungono quelle del numero di secondari che attraversano il materiale attivo, proporzionali al numero di 'attraversamenti' $N_x = T/d$ e quindi anche il termine di 'sampling' della risoluzione è $\sigma_s(E)/E \propto 1/\sqrt{E}$



Calorimetri: misura dell'energia

Includendo tutte le possibili fluttuazioni, la risoluzione in energia è:

$$\sigma(E)/E = a/E + b/\sqrt{E} + c$$

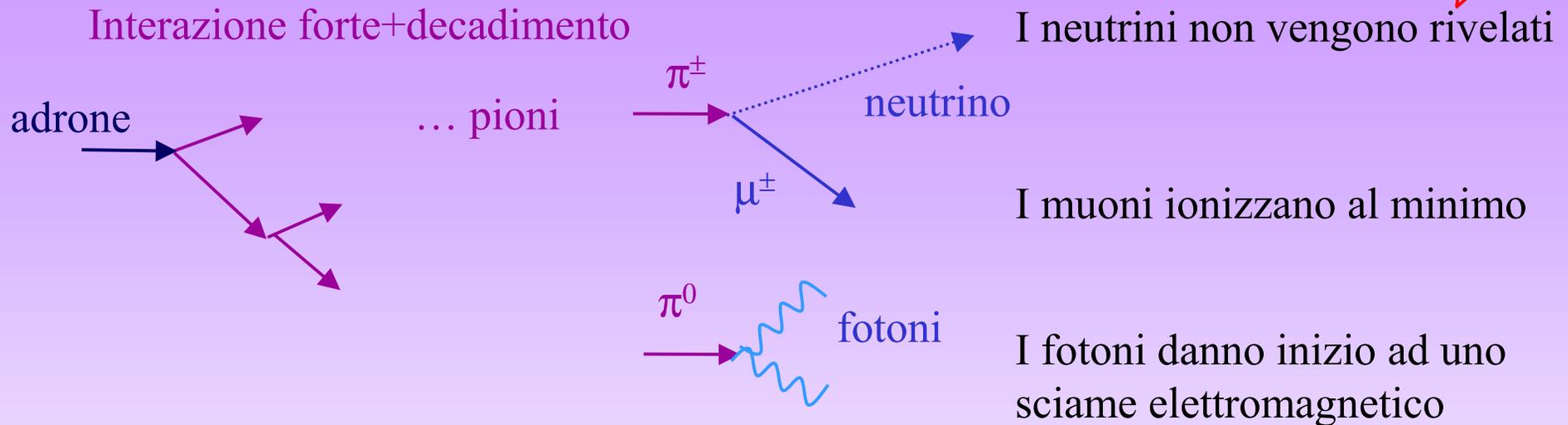
Effetti strumentali, ampiezza finita del piedistallo
(termine di rumore)

Fluttuazioni intrinseche dello sciame
Fluttuazioni di sampling (termine statistico)

Errori di calibrazione e non uniformità
(termine costante)

Sciame non contenuto interamente (leakage)
 $E^{-\alpha}$, $\alpha < 1/2$

Lo sciame adronico



Lo sviluppo dello sciame adronico è più largo rispetto a quello e.m. (a parità di energia). Inoltre i fenomeni nello sciame adronico sono più complessi e molti rilasciano energia **invisibile** nel rivelatore (rottura di nuclei pesanti, neutrini, ...)

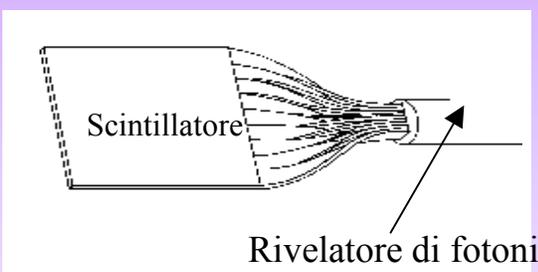
Tutto questo aumenta notevolmente le fluttuazioni, così come la componente elettromagnetica indotta dai pioni neutri. La risoluzione di un calorimetro adronico sarà dunque peggiore di quella tipica dei calorimetri elettromagnetici.

Un altro aspetto fondamentale è la 'compensazione', ovvero la correzione (con accorgimenti costruttivi o software) della differente risposta a elettroni e adroni ($e/h > 1$).

Rivelatori a scintillazione

Particella → **ionizzazione** → particelle cariche → **scintillazione** → luce
luce → **effetto fotoelettrico** → fotoelettroni → **moltiplicazione** → segnale elettrico

Hanno essenzialmente due funzioni: convertire l'energia rilasciata da un particella ionizzante in luce visibile e trasportarla verso un dispositivo (fotomoltiplicatore, ecc...) in grado di convertirla in un segnale elettrico.



Si tratta di materiali (organici o inorganici) che se eccitati dal rilascio di energia di una particella ionizzante, si diseccitano attraverso emissione di luce nel visibile

Gli scintillatori inorganici ad alto Z (BGO) sono adatti anche per rivelare γ

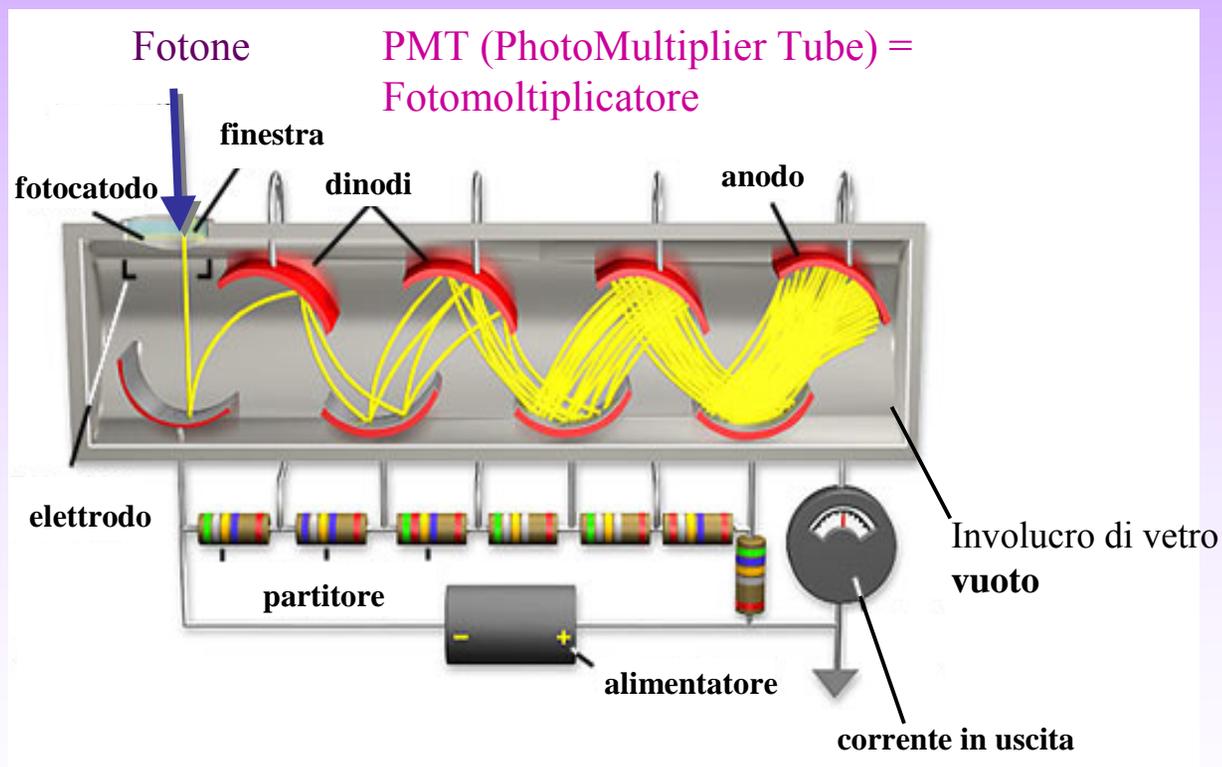
Gli scintillatori sono rivelatori multiuso:

- calorimetri
- misure di tempo di volo
- rivelatori traccianti (fibre)
- contatori di trigger/veto

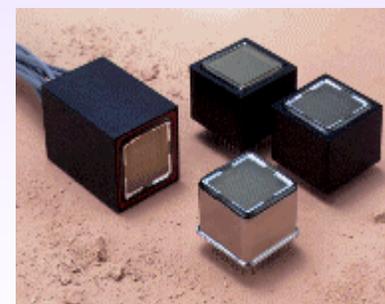


Rivelatori di fotoni

Particella → **ionizzazione** → particelle cariche → **scintillazione** → luce
luce → **effetto fotoelettrico** → fotoelettroni → **moltiplicazione** → segnale elettrico

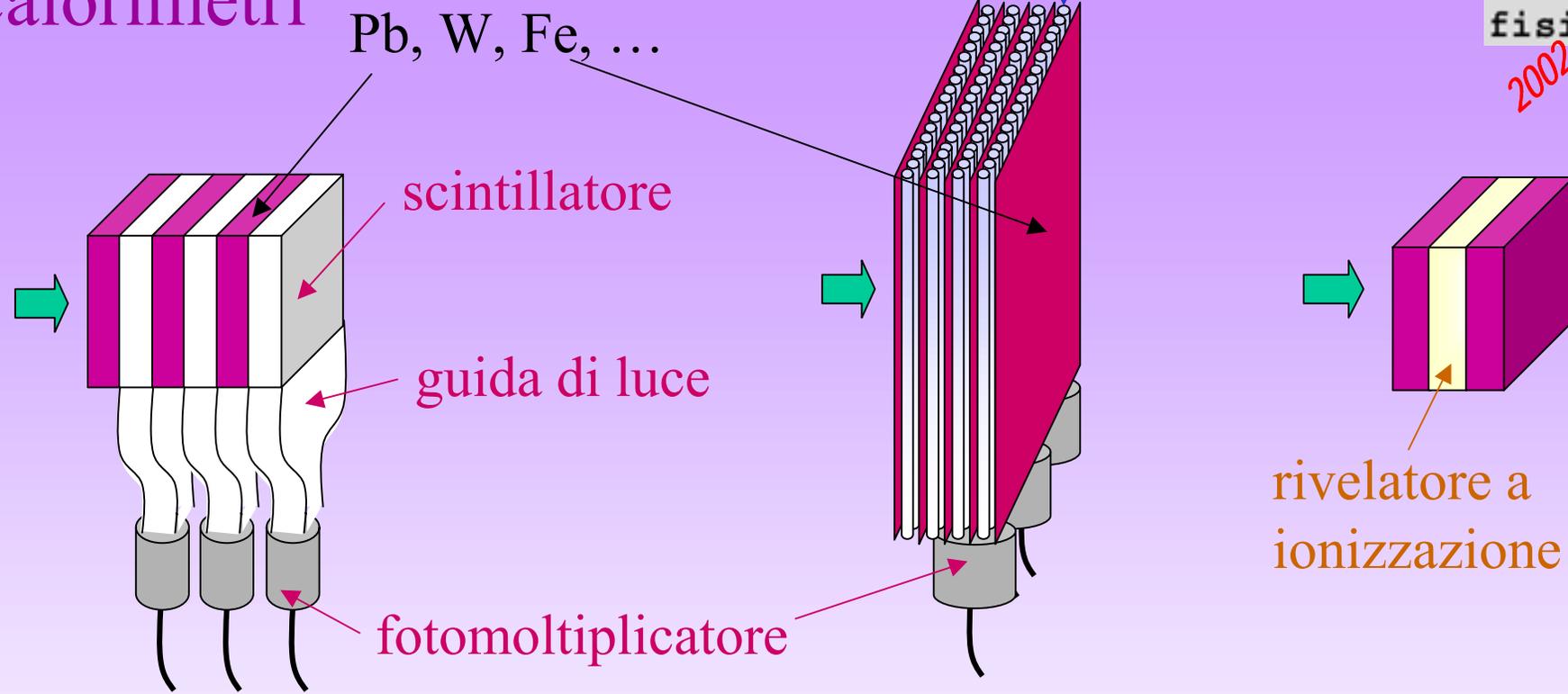


PMT



Multianodo

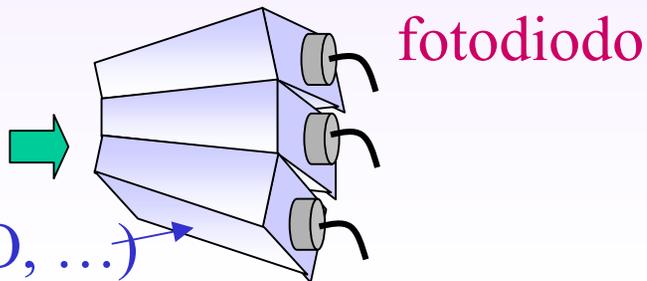
Calorimetri



Incontri di fisica

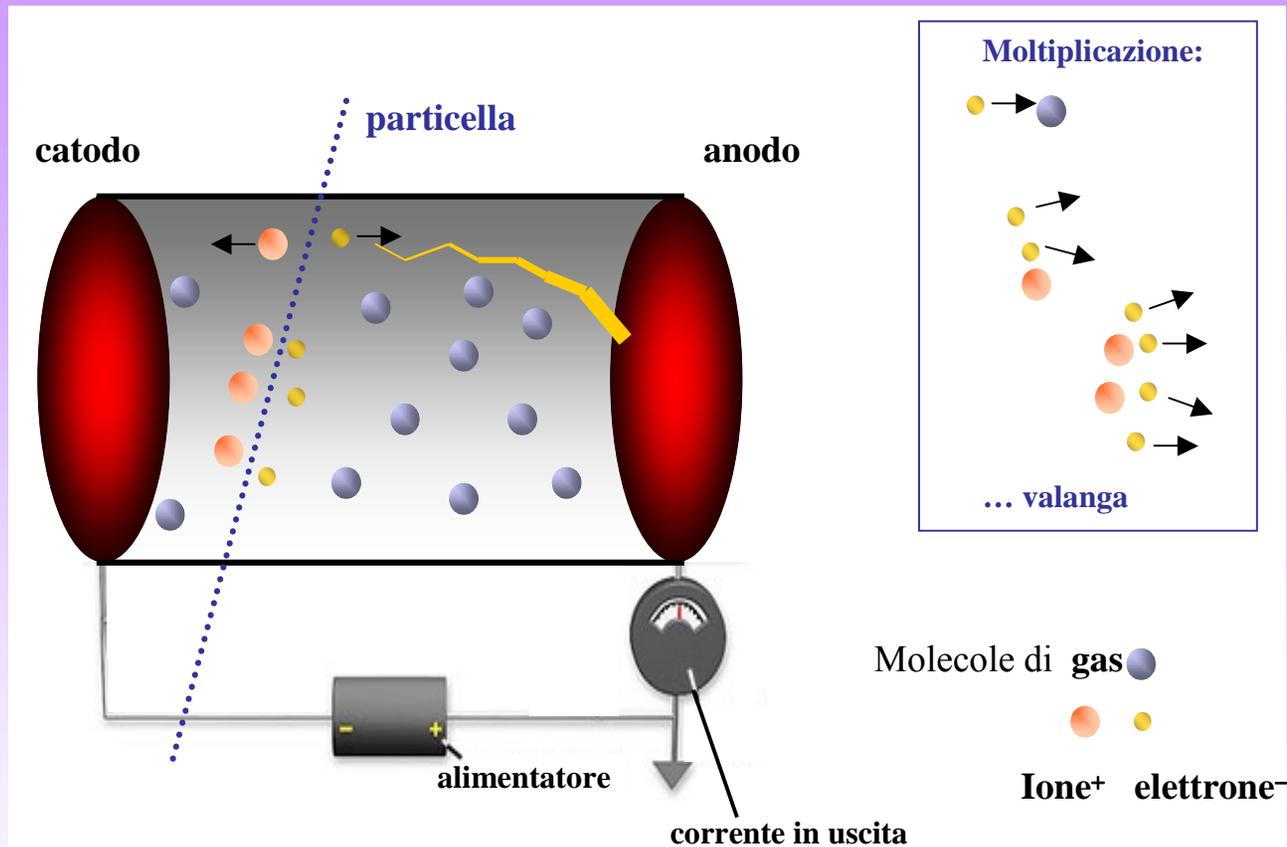


cristallo (NaI, CsI, BGO, ...)



Rivelatori a gas

2002





Incontri di fisica

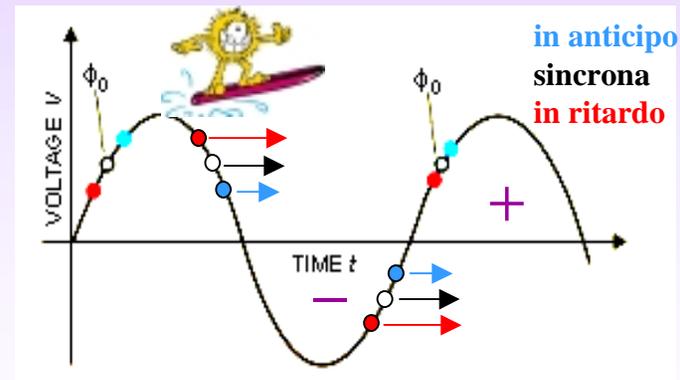
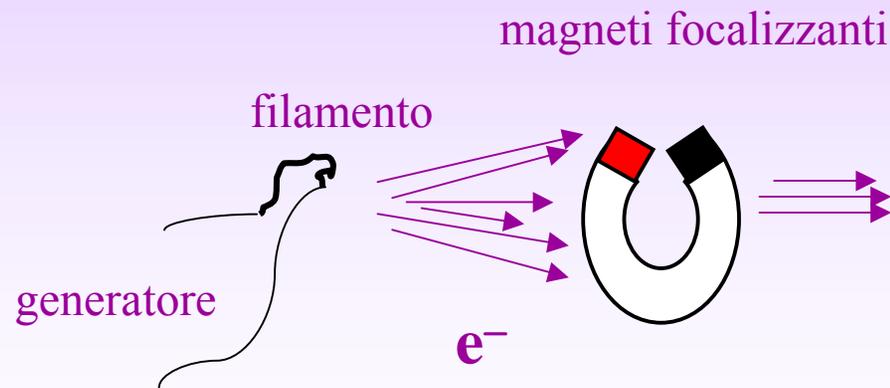
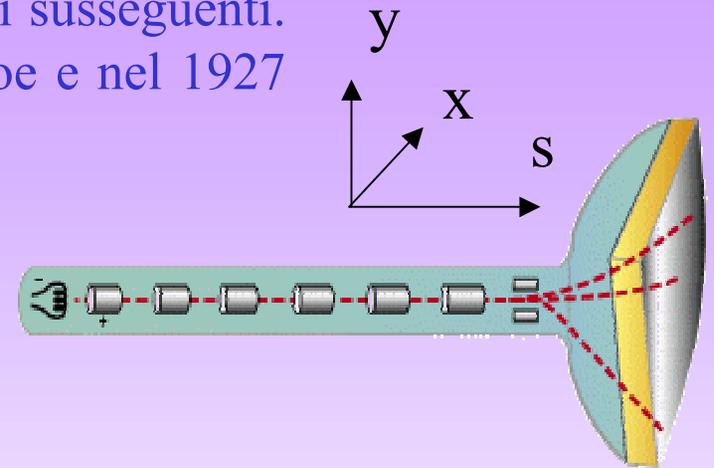
2002

BTF



Acceleratori lineari

Le particelle emesse dal filamento vengono accelerate dal campo elettrico longitudinale generato da elettrodi susseguenti. Questa idea di Ising (1924) fu applicata da Videroe e nel 1927 venne realizzato il primo “drift tube Linac”.



Emittanza... Condizioni iniziali

Il fascio di particelle accelerato dal LINAC, all'energia opportuna, viene immesso nella linea di trasferimento per essere utilizzato per vari propositi. Tale fascio ha delle caratteristiche, che in assenza di elementi attivi (che cedono o dissipano energia) si conservano indefinitamente. “La grandezza che definisce tali condizioni iniziali si chiama **EMITTANZA**”

$$\varepsilon_x = X_0$$

distribuzione spaziale
o trasversa

$$\varepsilon_y = Y_0$$

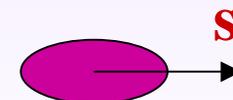
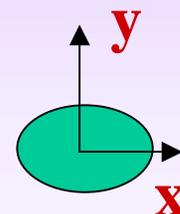
$$\varepsilon'_x = X'_0 = \vartheta_{\max}$$

distribuzione angolare
o divergenza

...

$$\varepsilon_s = \Delta E_0$$

distribuzione longitudinale
o in energia



DAΦNE-LINAC



focalizzazione
finale

convertitore per
positroni

focalizzazione
iniziale

gun

50 m di tunnel

850 MeV elettroni

550 MeV positroni

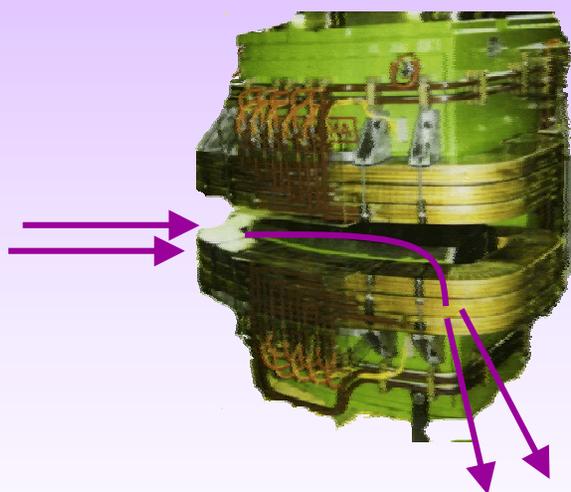
Emittanza $< 1e^- 5e^+$ mm mrad

Emittanza longitudinale $< 1\%e^- 2\%e^+$

Elementi di trasporto dei fasci

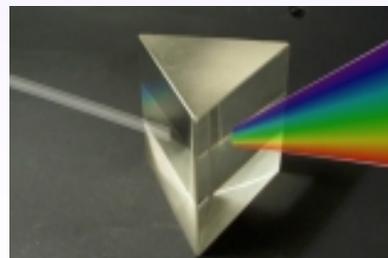
$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

I dipoli permettono di guidare il fascio in modo opportuno.



Non tutte le particelle di un pacchetto generato dal LINAC hanno la medesima energia ($E \approx pc$ per particelle relativistiche) e vengono quindi curvate dal dipolo in modo differente: le particelle emergenti hanno angoli differenti (dispersione).

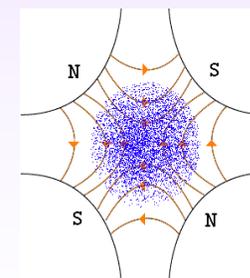
Questo inoltre crea una correlazione energia-posizione



Trasporto e controllo delle caratteristiche del fascio

I quadrupoli permettono di modulare le dimensioni trasversali del fascio:

$$x(s) = x_0 + \sqrt{\epsilon\beta(s)} \cdot \cos[\theta(s) + \varphi] + D(p, s) \frac{\Delta p}{p_0}$$



Ottica

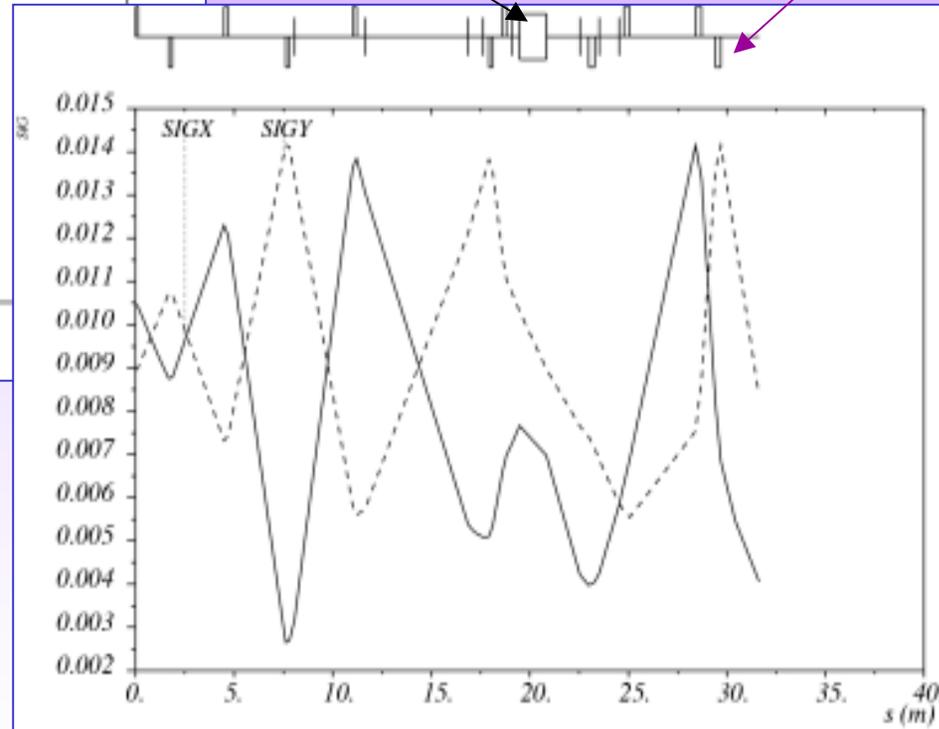
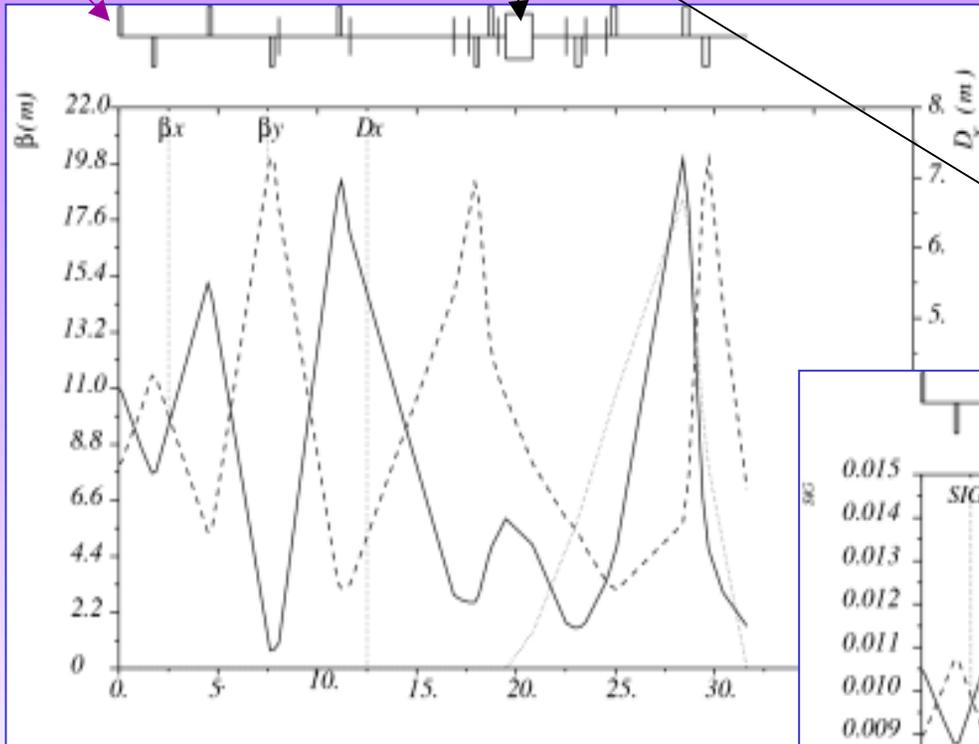
Incontri di fisica

2002

Quadrupoli focalizzante y

dipolo

focalizzante x



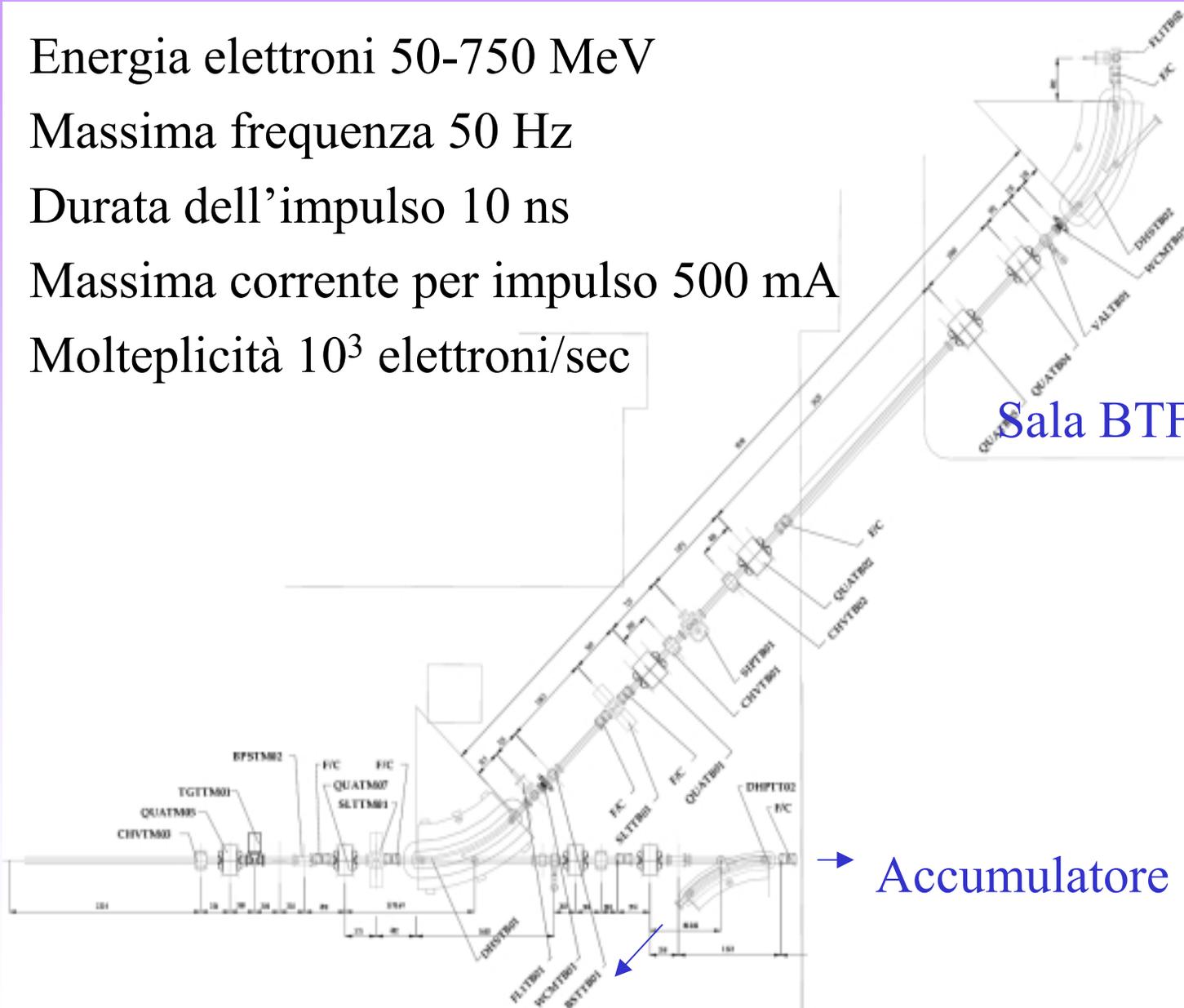
DAFNE Beam Test Facility

Incontri di fisica

2002

- Energia elettroni 50-750 MeV
- Massima frequenza 50 Hz
- Durata dell'impulso 10 ns
- Massima corrente per impulso 500 mA
- Molteplicità 10^3 elettroni/sec

LINAC



Accumulatore

Anelli principali

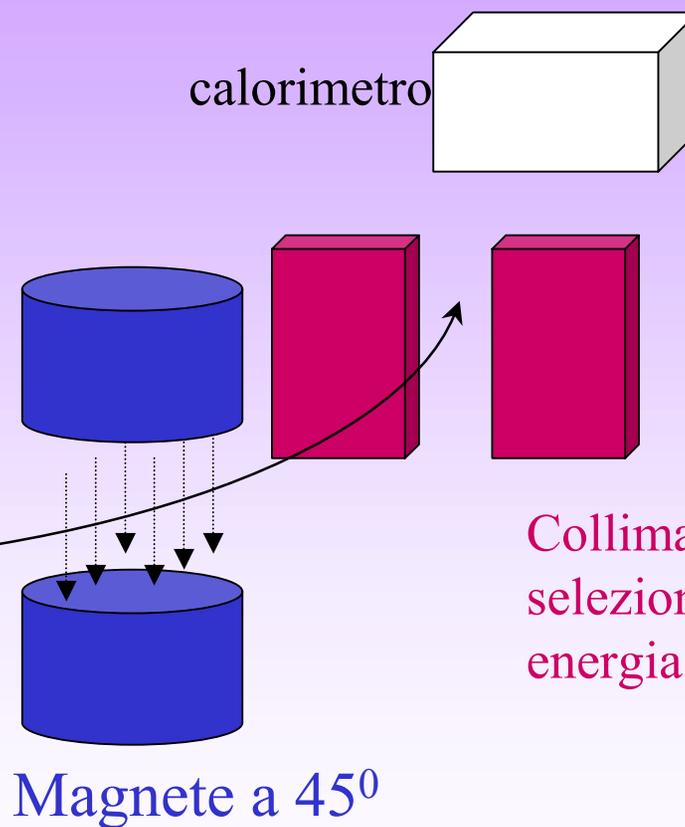


Produzione del singolo elettrone

Fascio dal LINAC
1-500 mA @ 50-750 MeV

1.7, 2.0, 2.3 X_0
Bersaglio di spessore
variabile (rame)

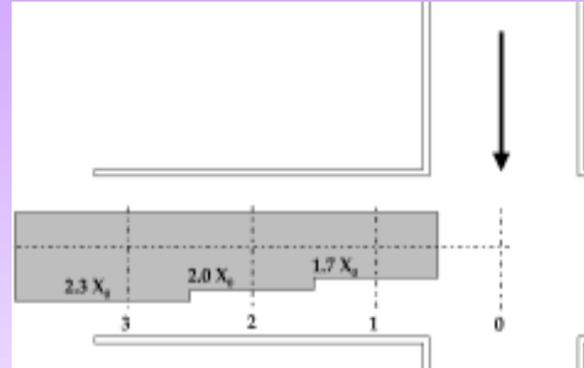
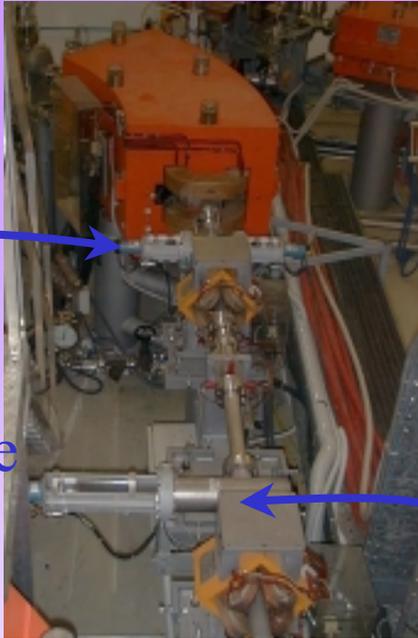
Collimatore



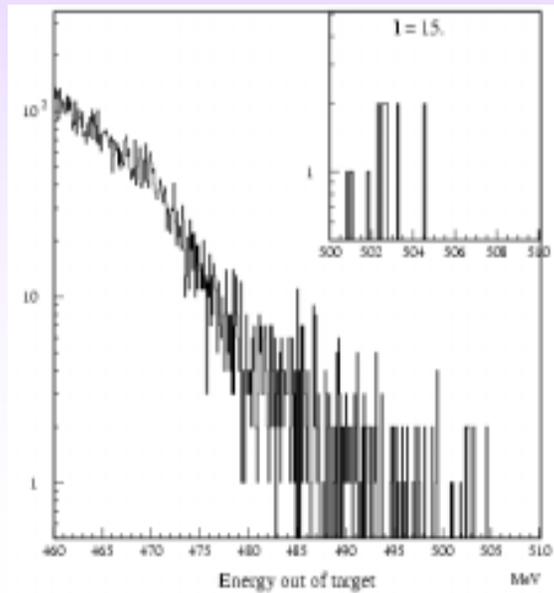
Collimatore: 1%
selezione in
energia

Selettore d'energia

Collimatore

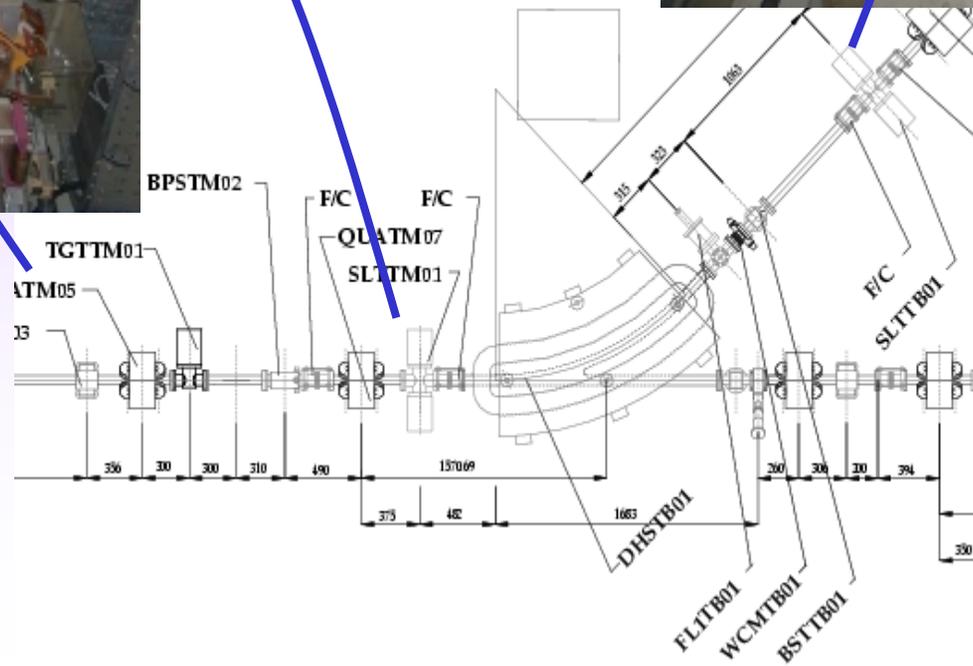


Bersaglio



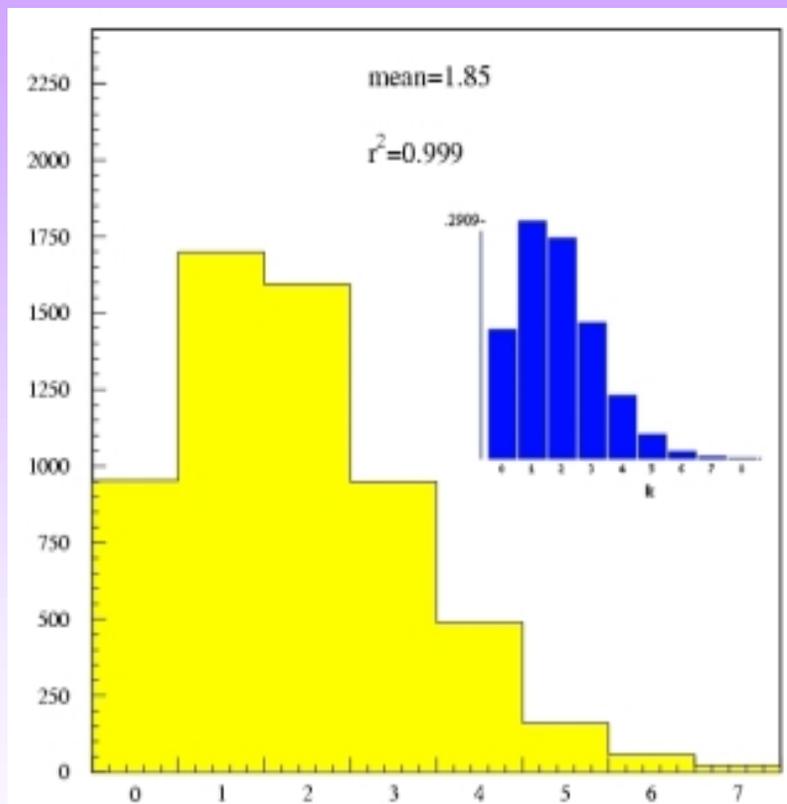
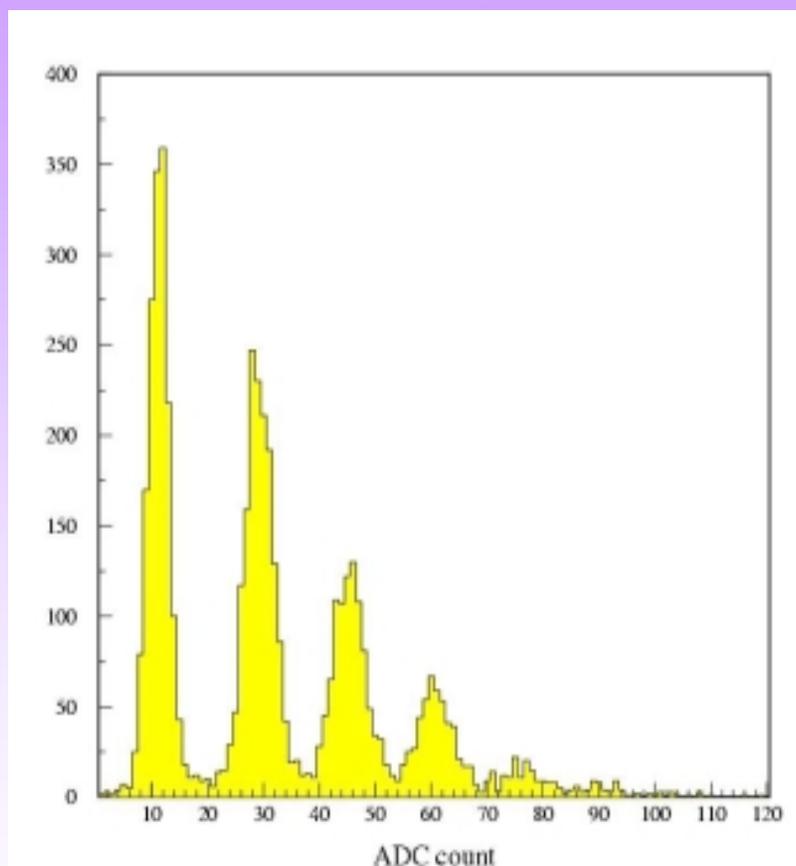
Simulazione 6×10^7 elettroni su bersaglio spessore $= 1.7 X_0$

Selettore d'energia



Segnale

Molteplicità degli elettroni

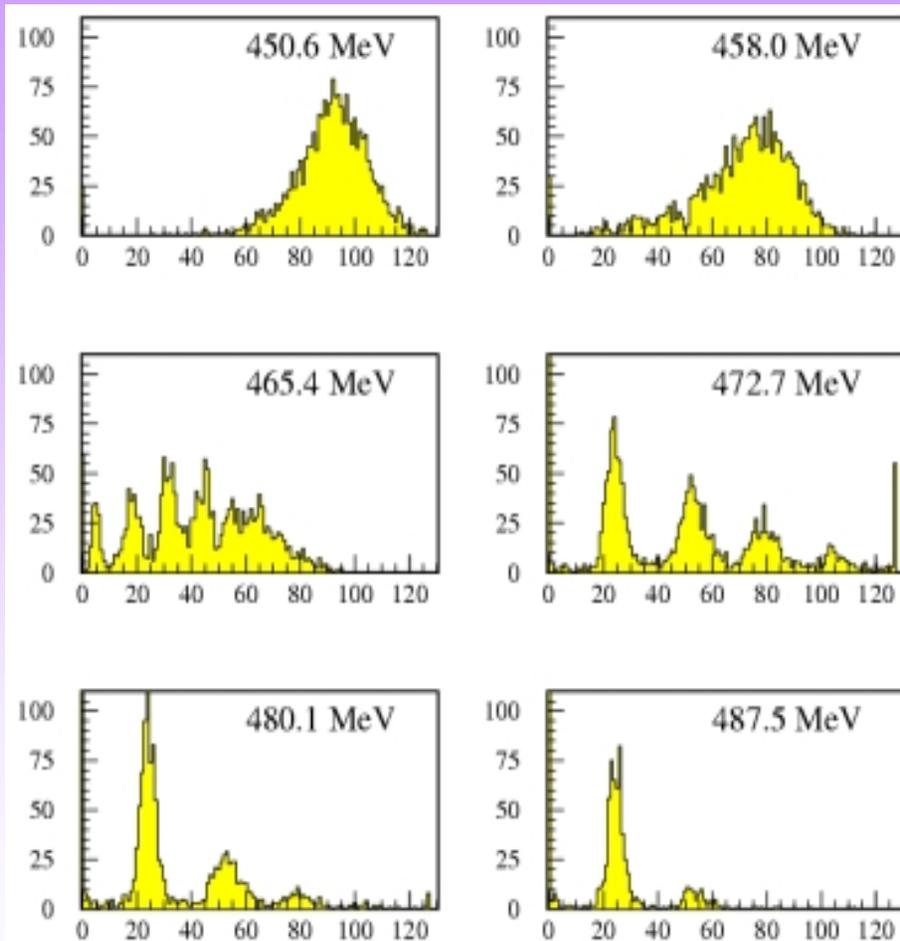


Il numero di elettroni segue la statistica di Poisson

Molteplicità

Il sistema selettore di energia e l'ottica di trasporto possono essere facilmente modulate allo scopo di ottenere il numero di elettroni necessario alle differenti energie

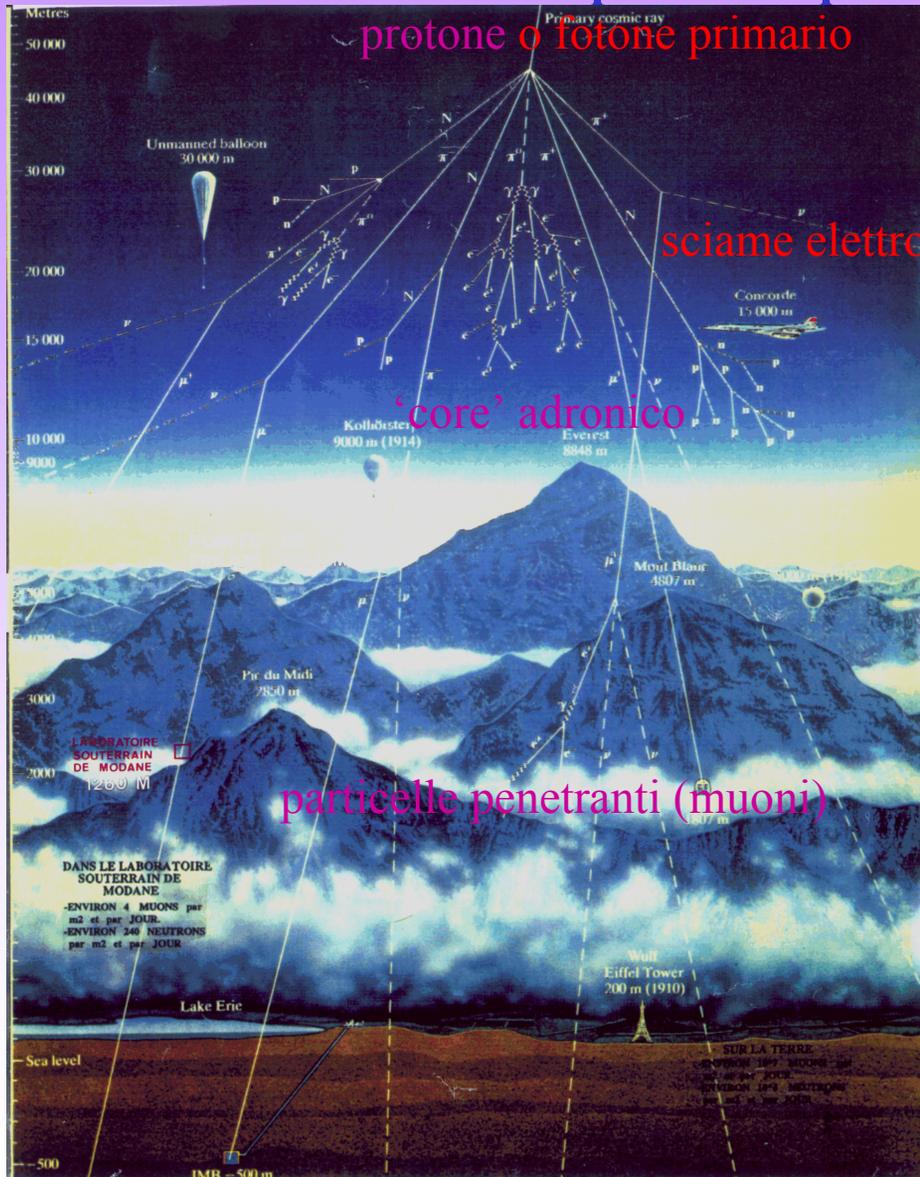
L'efficienza dipende dall'energia e dall'ottica. Un valore tipico del 30% di singolo elettrone con 3% di contaminazione di $N > 1$ può essere facilmente ottenuto



*Impulsi del Linac di intensità $I=2$ mA,
attenuati dal bersaglio di rame di spessore
pari a $1.7 X_0$.*

2002

Un fascio sempre disponibile: i raggi cosmici



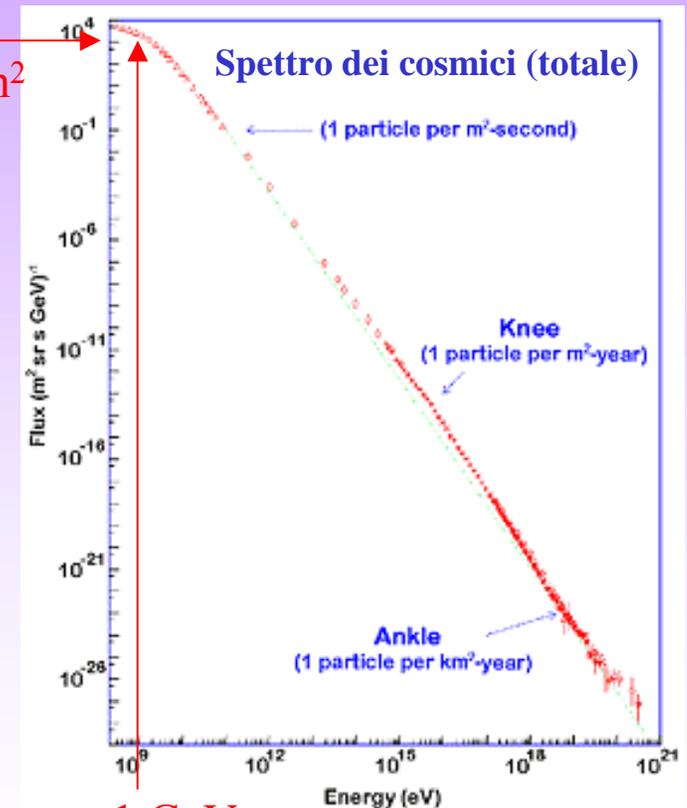
protone o fotone primario

sciami elettromagnetico

'core' adronico

particelle penetranti (muoni)

1000 Hz/m²



Spettro dei cosmici (totale)

(1 particle per m²-second)

Knee
(1 particle per m²-year)

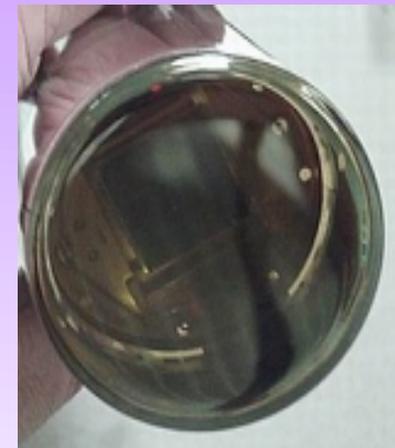
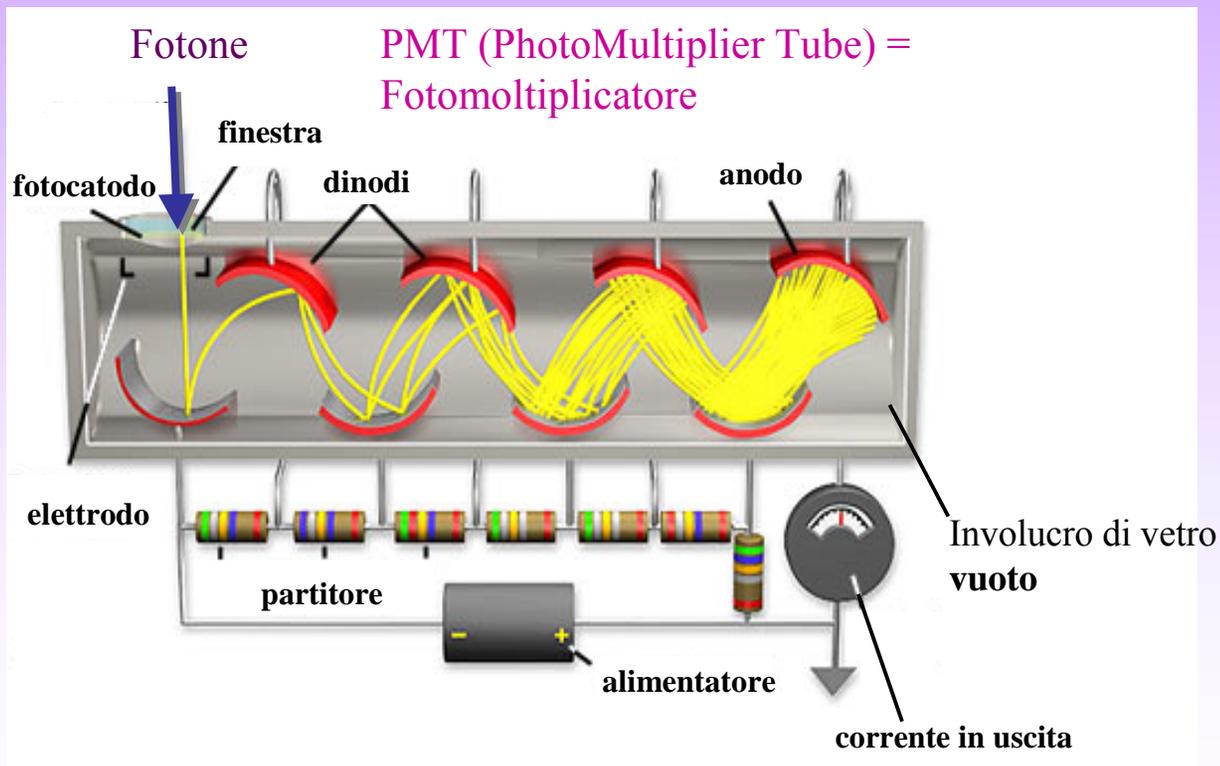
Ankle
(1 particle per km²-year)

1 GeV

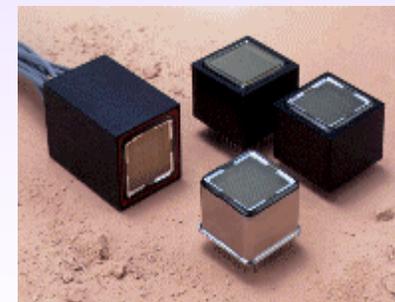
Rivelatori di fotoni

2002

Particella → **ionizzazione** → particelle cariche → **scintillazione** → luce
luce → **effetto fotoelettrico** → fotoelettroni → **moltiplicazione** → segnale elettrico



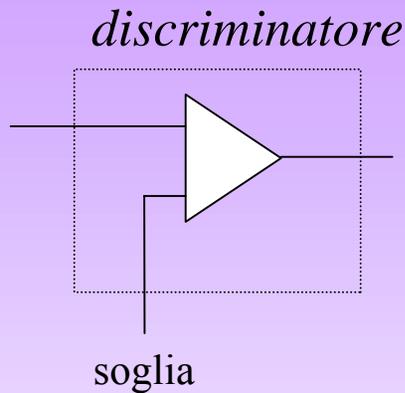
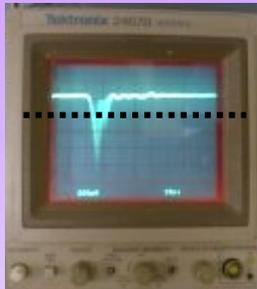
PMT



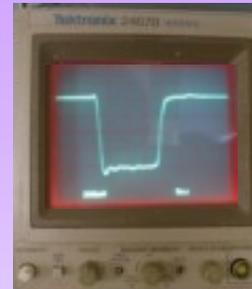
Multianodo

Segnali analogici e digitali

segnale analogico



segnale digitale (NIM o ECL)



→ logica

Standard segnali digitali

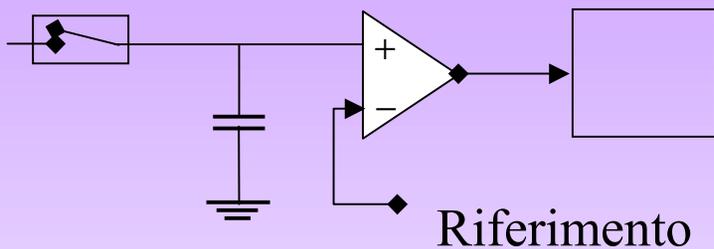
	TTL		ECL	NIM
1	 2-5 V	0	-0.90 V	0 V
0	 0 V	1	-1.75 V	-0.8 V

2002

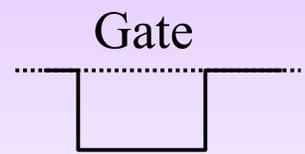
ADC = convertitore analogico-digitale

Segnale analogico

Comparatore Encoder

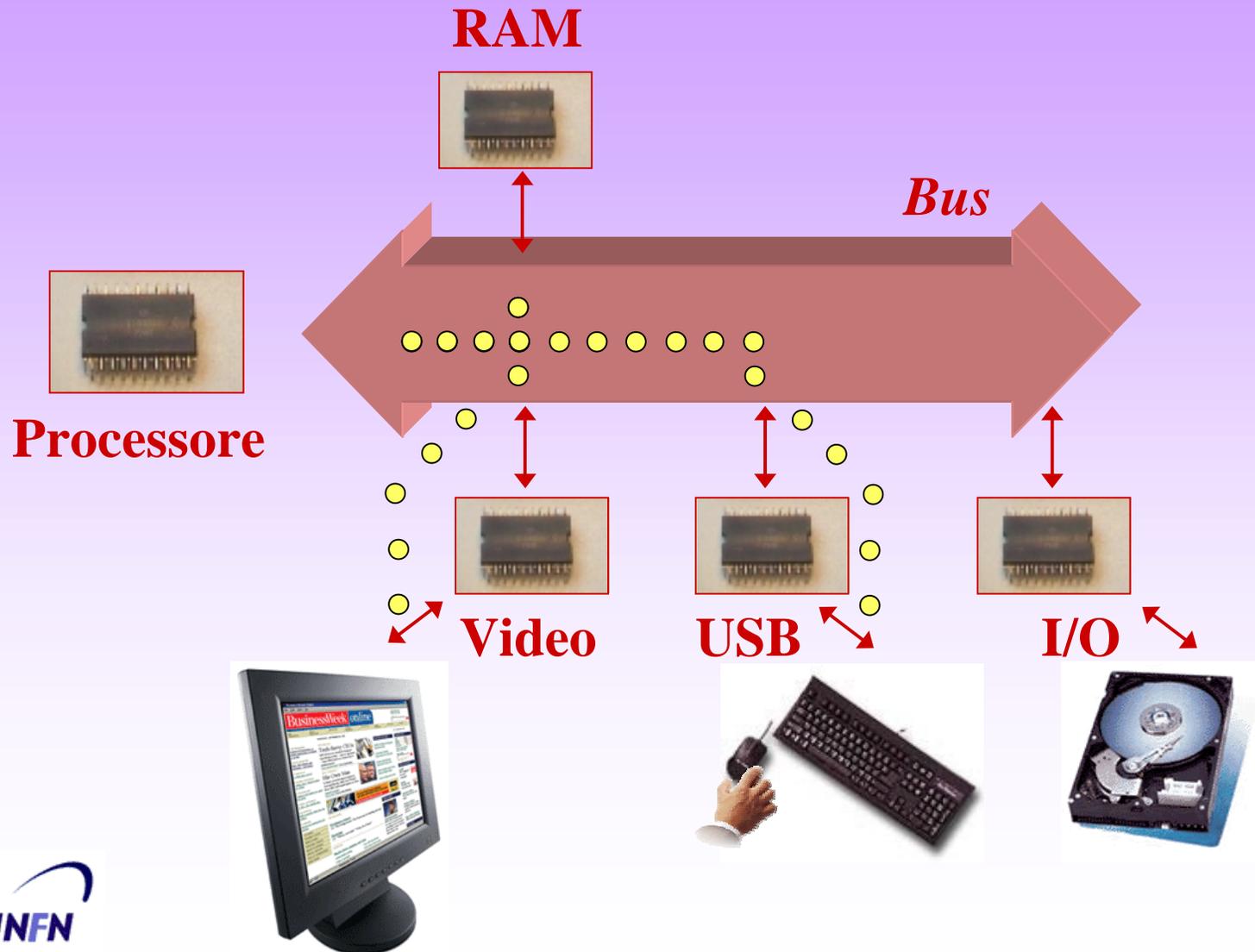


Output digitale

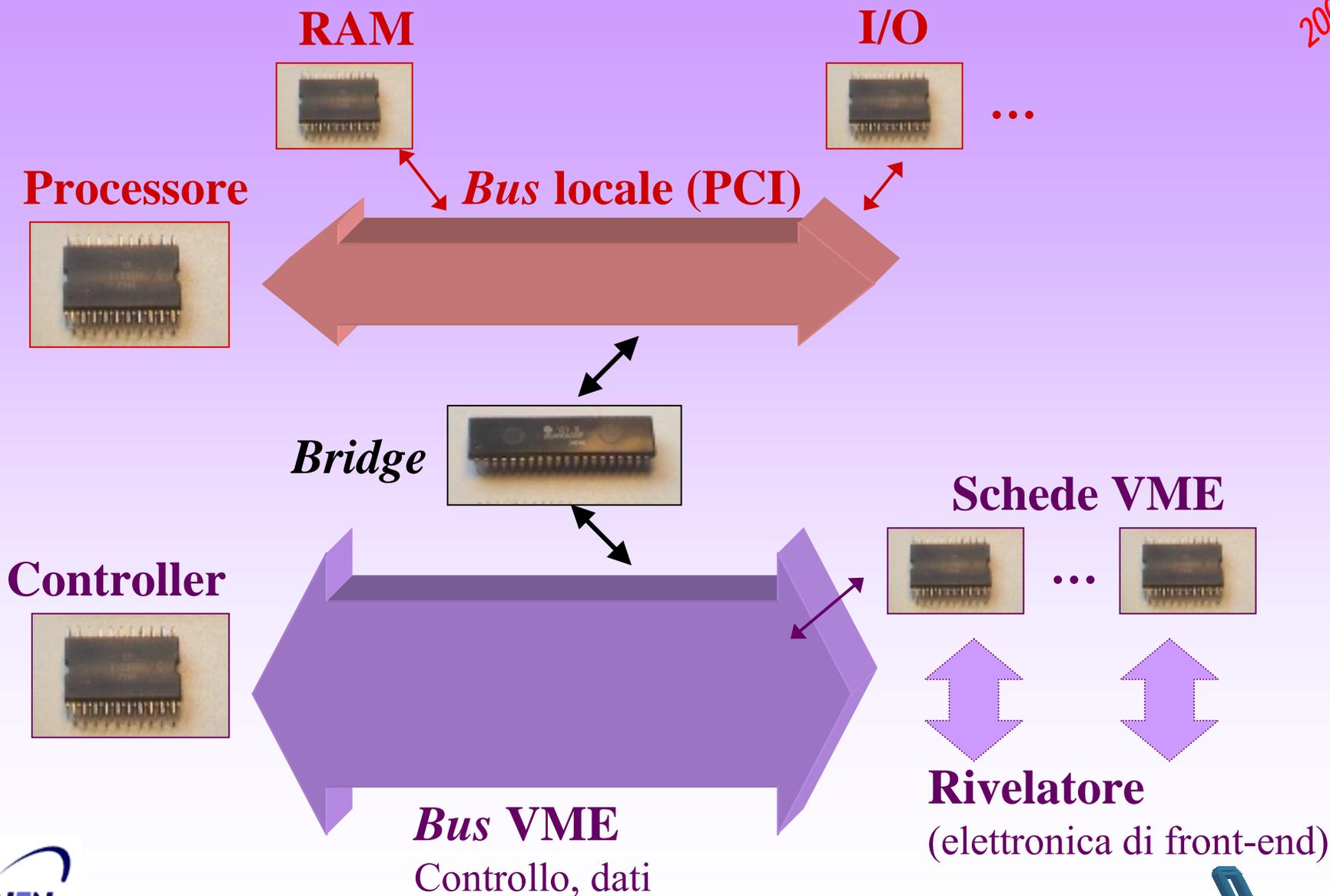


DAQ: il *bus*

2002



DAQ: Schema di acquisizione VME



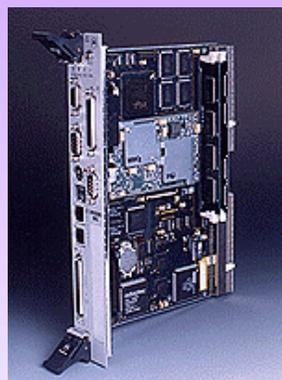
Schema acquisizione VME

Incontri di fisica

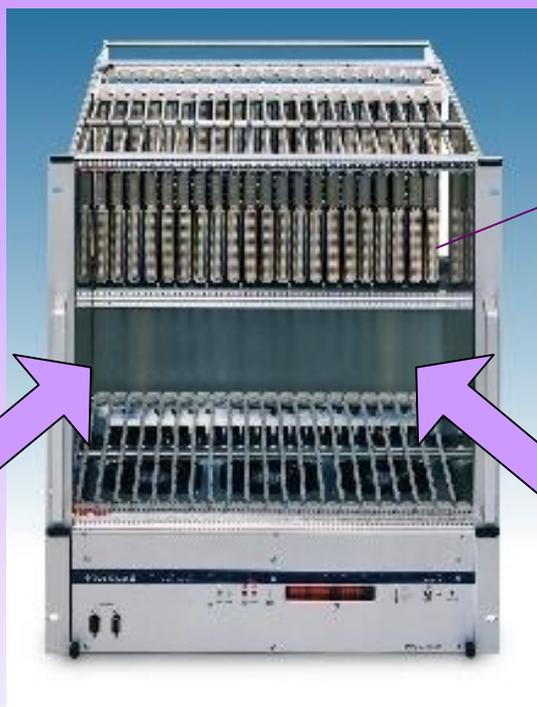
2002

CPU

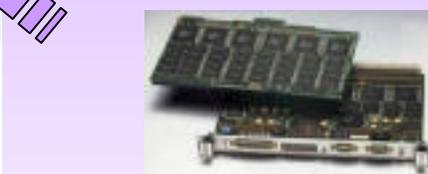
(+ RAM, bridge, I/O, ...)



Crate



alimentazione + bus



Schede

segnali



Rivelatore



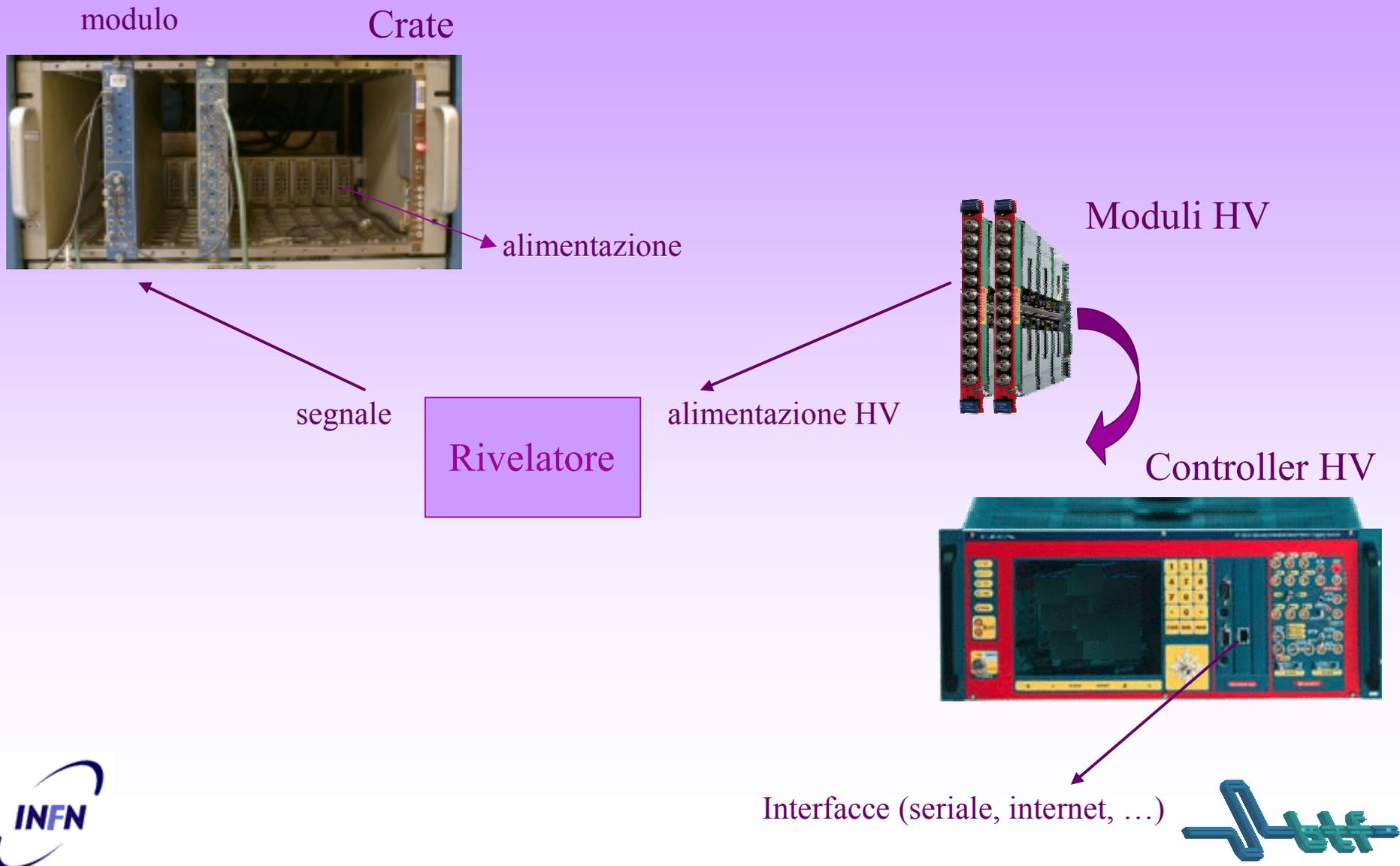
Rete (intranet, internet)



Elettronica NIM, alta tensione (HV), ...

Incontri di fisica

2002

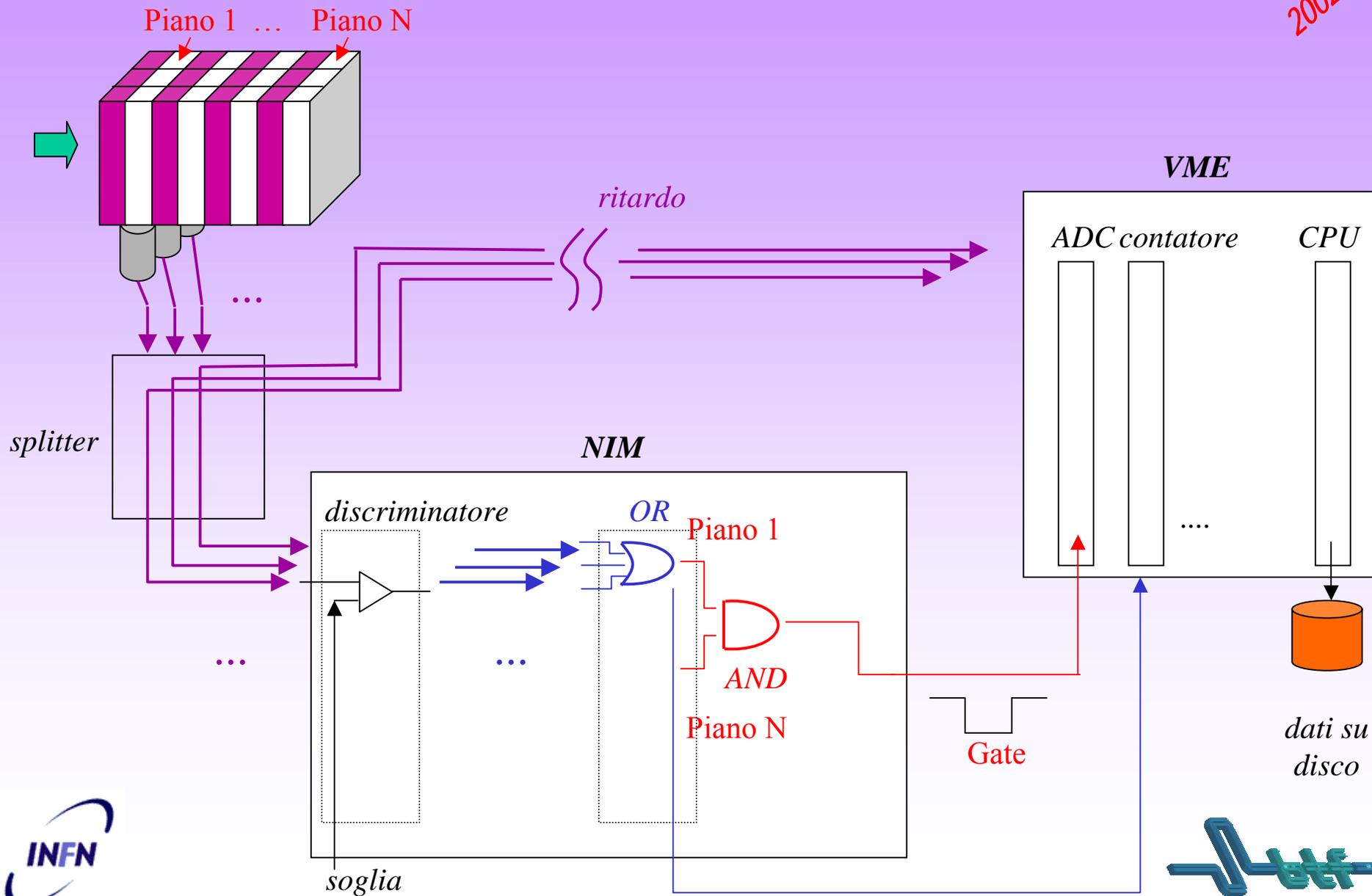


— Segnale analogico
— Segnale digitale

Schema generale del DAQ

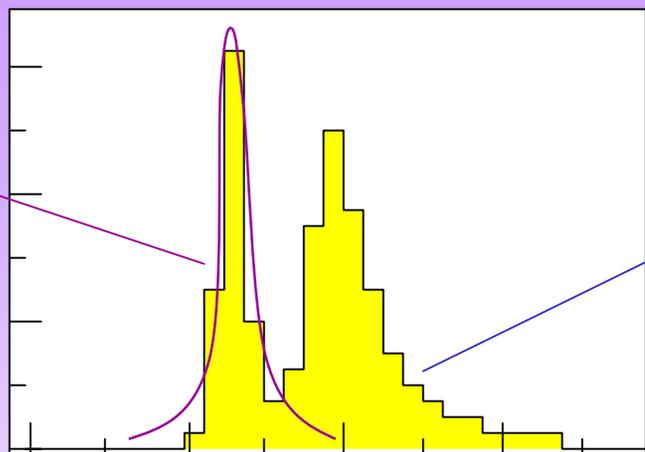
Incontri di fisica

2002



Spettro tipico ADC

Piedistallo
(integrale del rumore)



Curva di Landau, tipica della perdita di energia per ionizzazione con coda ad alti valori di ΔE

Proposta di esperienza

Incont
ri ■ di
fisica

2002

- Studio dei segnali del fotomoltiplicatore all'oscilloscopio
- Corrente di buio e soglia
- Discriminazione dei segnali e impostazione della logica di trigger
- Creazione del segnale di gate e messa in tempo del DAQ
- Spettro di raggi cosmici, piedistallo, ...

- DAQ con fascio: messa in tempo del segnale di trigger
- Acquisizione con fascio: spettro di energia e molteplicità degli e^-



Bibliografia

Rivelatori di particelle:

- R. Fernow, *Introduction to Experimental Particle Physics*
- W.R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*

Articoli di rassegna (calorimetria, rivelatori di tracce, identificazione):

- T. Ferbel, *Experimental Techniques in high-energy nuclear and particle physics*

Acceleratori di particelle:

- M. Sands, SLAC report **SLAC-0121**, 1970
- A. W. Chao, *Handbook of Accelerator Physics and Engineering*