

# INTERAZIONE RADIAZIONE-MATERIA

## Radiazioni ionizzanti

Interazione di particelle cariche:

range

perdita di energia per ionizzazione

perdita di energia per radiazione

Interazione di particelle neutre:

neutroni

fotoni:

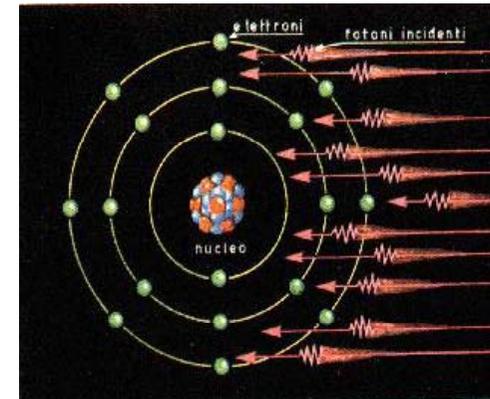
effetto fotoelettrico

effetto Compton

produzione di coppie

attenuazione

spessore di dimezzamento



**Paolo Montagna - Paolo Vitulo**  
Università di Pavia - Dipartimento di Fisica  
INFN Sezione di Pavia

# Particelle o radiazioni?

## massa, carica, velocità, energia

**Mai confondere**  
 particelle cariche e neutre  
 particelle con massa e senza massa

Interaz. coulombiana si o no  
 En.cinetica o elettromagn.

massa	m	m	0	0
carica	e	0	e	0
tipo	Protone, Elettrone	Neutrone	<del>nessuna</del>	Fotone (luce, raggi X ...)
velocità	v (<c)	v (<c)	<del>c</del>	c
energia	Cinetica $E = \frac{1}{2}mv^2$	Cinetica $E = \frac{1}{2}mv^2$	<del>Elettromagn <math>E = hv</math></del>	Elettromagn $E = hv$



**Avvertenza:** in Fisica Nucleare l'energia si misura sempre in **elettronVolt**:  
 1 eV è l'energia acquisita da un elettrone quando viene accelerato  
 tra due punti tra cui c'è una differenza di potenziale di 1 V. Cioè (da  $L=qV$ ):  
 $1 \text{ eV} = (1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot (1 \text{ V}) = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

# Radiazioni ionizzanti

Ogni radiazione, interagendo con la materia, **cede energia** alla struttura atomica/molecolare del materiale attraversato.

Se l'energia ceduta è sufficiente (**radiazioni ionizzanti:  $E \geq 100 \text{ eV}$** ), si verificano nel materiale effetti distruttivi (frammentazioni, rotture di legami, ionizzazione, ...).

## Radiazioni ionizzanti:

- **elettromagnetiche** ( $m=0$ ,  $E=h\nu$ ) → raggi X e  $\gamma$
- **corpuscolari** ( $m>0$ ,  $E=\frac{1}{2}mv^2$ ) → particelle  $\alpha$ ,  $\beta^\pm$ , p, n, ...

**Particelle cariche:**  $\alpha$ ,  $\beta^\pm$ , p

→ **ionizzazione diretta** degli atomi del mezzo

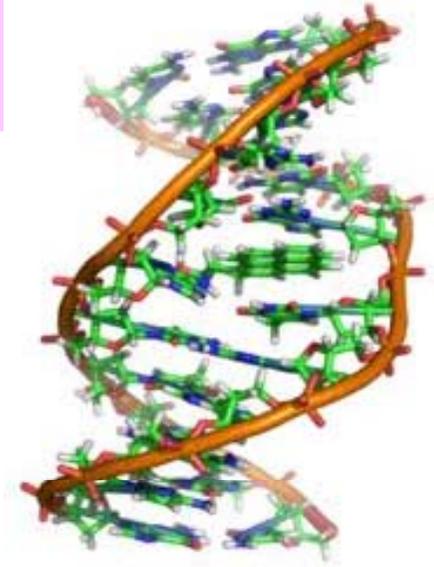
**Particelle neutre:** n, X,  $\gamma$

→ **ionizzazione indiretta** tramite produzione di particelle cariche secondarie

## L'assorbimento delle radiazioni nella materia

è un processo molto vario e complesso. I parametri importanti sono:

**tipo e energia della radiazione incidente, natura del materiale.**



# Interazione di particelle cariche

Tutte le particelle **cariche** ( $e_{\pm}$ ,  $p$ ,  $\alpha$ , nuclei) interagiscono principalmente a causa delle **interazioni coulombiane** con gli elettroni del mezzo attraversato, perdendo rapidamente la loro energia cinetica.

La perdita di energia della particella carica appare principalmente sotto forma di **ionizzazione ed eccitazione** del mezzo materiale attraversato.

L'energia cinetica ceduta dalla particella è praticamente **tutta** assorbita dal mezzo a una **distanza caratteristica**, che dipende dalle caratteristiche della particella incidente e del mezzo attraversato.



# Range

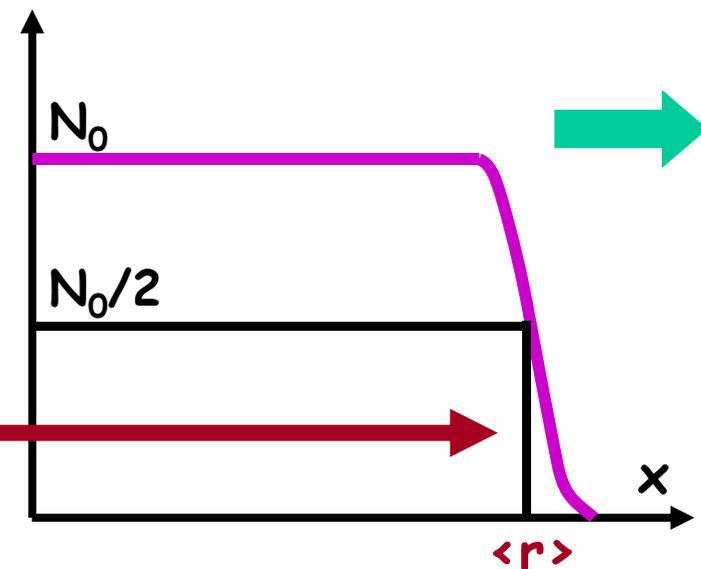
è definito solo per particelle cariche!

**Range** = distanza media percorsa dalla radiazione incidente nella materia

Indica la capacità di penetrare a fondo nella materia. E' tanto più alto quanto maggiore è l'energia (una particella si ferma quando esaurisce la propria energia).

Per un fascio di particelle cariche di data energia, si verifica sperimentalmente che il numero di particelle trasmesse rimane pressoché costante fino a un certo spessore, dopo il quale crolla bruscamente.

**Range medio  $\langle r \rangle$**   
distanza percorsa dal 50% delle particelle



# $dE/dx$

Ionizzazione specifica / potere frenante / stopping power = perdita di energia per unità di percorso

$dE/dx \rightarrow$  energia/lunghezza  
Misurata in eV/cm (spesso keV/ $\mu\text{m}$  o MeV/mm)

Utile per l'identificazione di particelle cariche  
Se si dispone di una misura indipendente di impulso

Dividendo per la densità del mezzo  $\rho$ :  $(dE/dx)/\rho$   
misurata in MeV $\cdot$ cm<sup>2</sup>/g

## Elettroni:

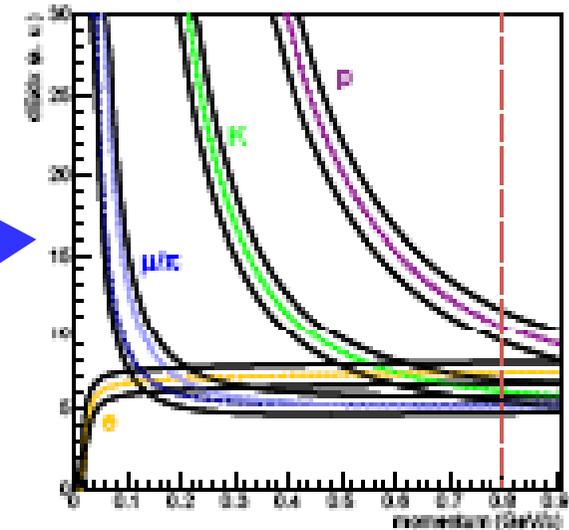
Piccola massa  $\rightarrow$  grandi deviazioni  
 $\rightarrow$  traiettoria a zig-zag  
 $\rightarrow$  range molto variabile

## Particelle cariche pesanti:

Grande massa  $\rightarrow$  piccole deviazioni  
 $\rightarrow$  traiettoria quasi rettilinea  
 $\rightarrow$  range quasi costante

Per particelle cariche pesanti (p,  $\alpha$ ):  
 $(dE/dx)/\rho \propto (q^2/v^2) \cdot (Z/A)$   
dipende quasi solo ( $Z/A \sim 0.5$ )  
dalla particella incidente (carica e velocità)

$$(dE/dx)_{\alpha} \sim 4 (dE/dx)_p$$

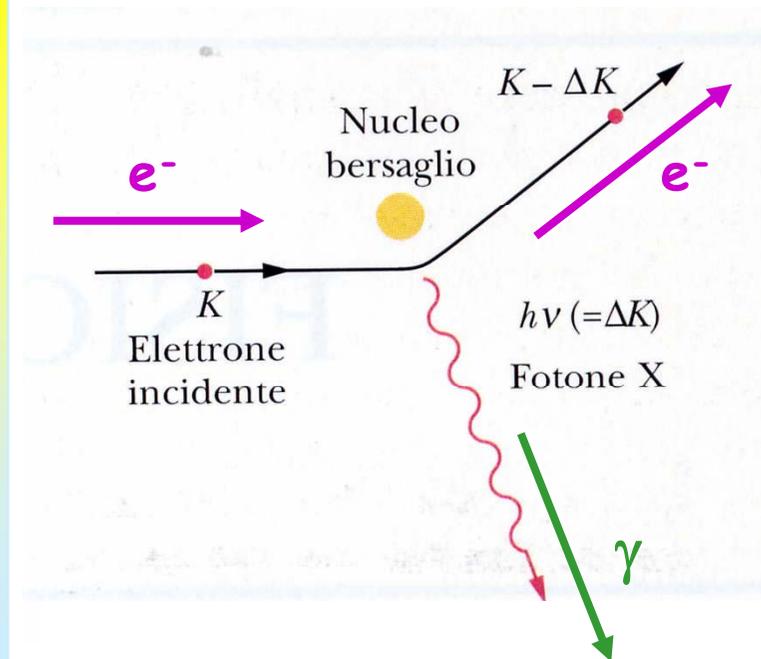


# Bremsstrahlung

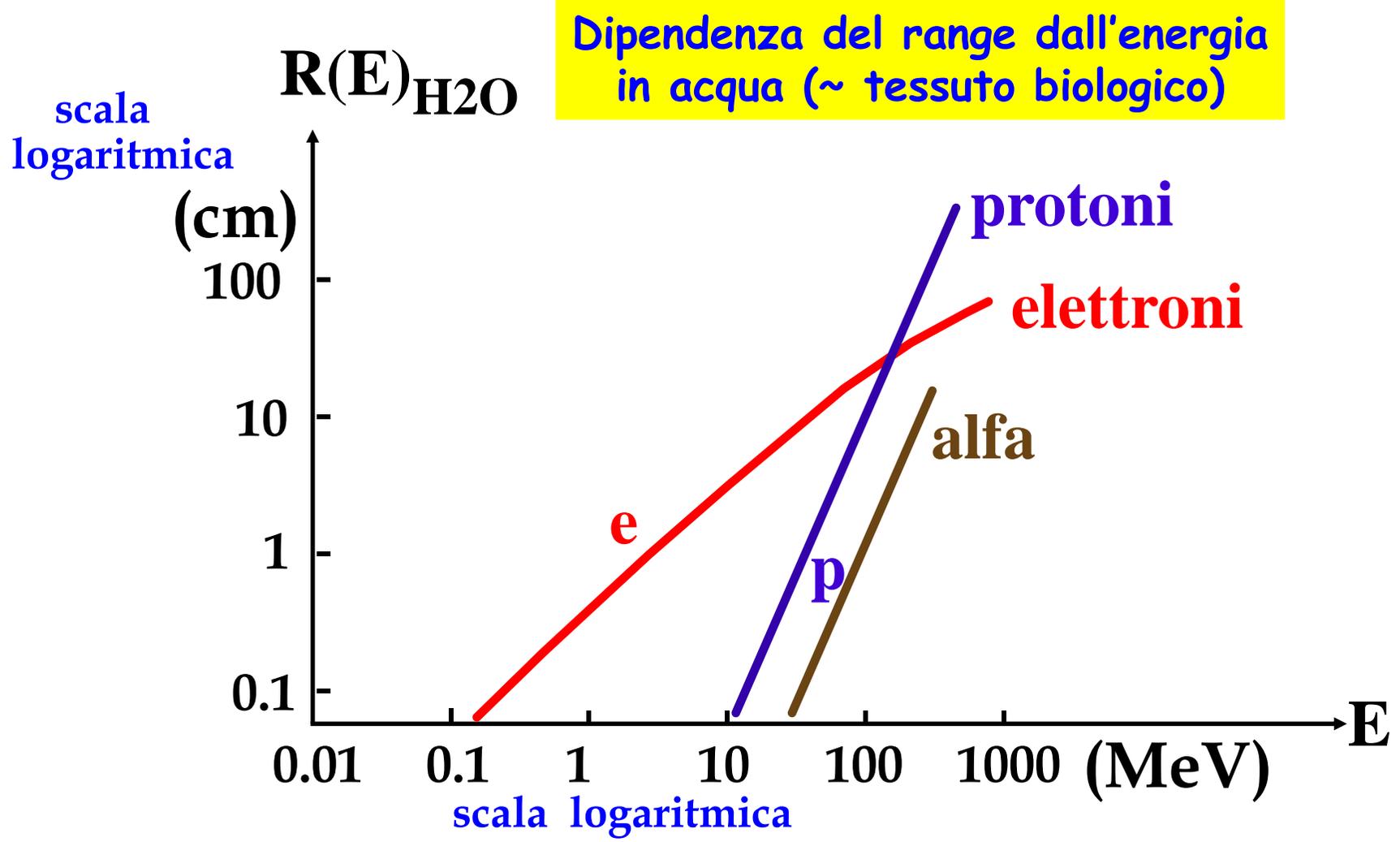
Le particelle cariche perdono energia, oltre che per ionizzazione, anche per irraggiamento ("radiazione di frenamento" o bremsstrahlung)

Questo processo è particolarmente importante per gli **elettroni**. Essi sentono forte repulsione coulombiana dagli elettroni atomici, possono perdere anche notevoli quantità di energia a ogni urto e venire fortemente deviati.

Pertanto subiscono successive **accelerazioni e decelerazioni**, e - come tutte le particelle cariche accelerate - **emettono radiazioni elettromagnetiche**, sotto forma di fotoni di energia  $h\nu$ , sempre minore o al limite uguale all'energia degli elettroni incidenti.



# Range ed energia di particelle diverse



# Interazione di particelle neutre

Al contrario delle particelle cariche, neutroni e fotoni possono essere assorbiti completamente in un'unica collisione (il neutrone da un nucleo, il fotone da un elettrone atomico o da un nucleo).

Al contrario delle particelle cariche, non esistono distanze che fotoni o neutroni non possano attraversare.



L'assorbimento di neutroni e fotoni nella materia - e quindi l'attenuazione di un fascio - ha un comportamento **probabilistico**.

## Neutroni:

- Cattura neutronica
- Urti elastici
- Urti anelastici

## Fotoni:

- Effetto fotoelettrico
- Effetto Compton
- Produzione di coppie

# Neutroni

Classificazione delle interazioni secondo l'energia dei neutroni:  
freddi ( $E \sim \text{meV}$ ), termici ( $E \leq 0.01 \text{ eV}$ ), epitermici ( $E \leq 100 \text{ keV}$ ), veloci ( $E \sim \text{MeV}$ )

**Cattura neutronica:**  $n + {}^A_Z X \rightarrow {}^{A+1}_Z X$

- spesso seguita da decadimento  $\gamma$  ( $\rightarrow$  reazioni n. $\gamma$  o di cattura radiativa)
- spesso con nucleo finale radioattivo
- più probabile a bassa energia ( $\sim 1/E^2$ )

I materiali sottoposti a bombardamento neutronico diventano radioattivi!

Es.  $n + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + p + 0.63 \text{ MeV} \rightarrow$  rilascio energia nel corpo umano  
 $n + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \alpha + 2.79 \text{ MeV} \rightarrow$  Boron Neutron Capture Therapy

**Urti con nucleoni:**

- cessione di energia a protoni
- eccitazione dei nuclei con successiva emissione di raggi  $\gamma$

In tutti i processi l'effetto è la ionizzazione secondaria

# Fotoni

I fotoni possono interagire con la materia in modi diversi a seconda dell'energia che trasportano:

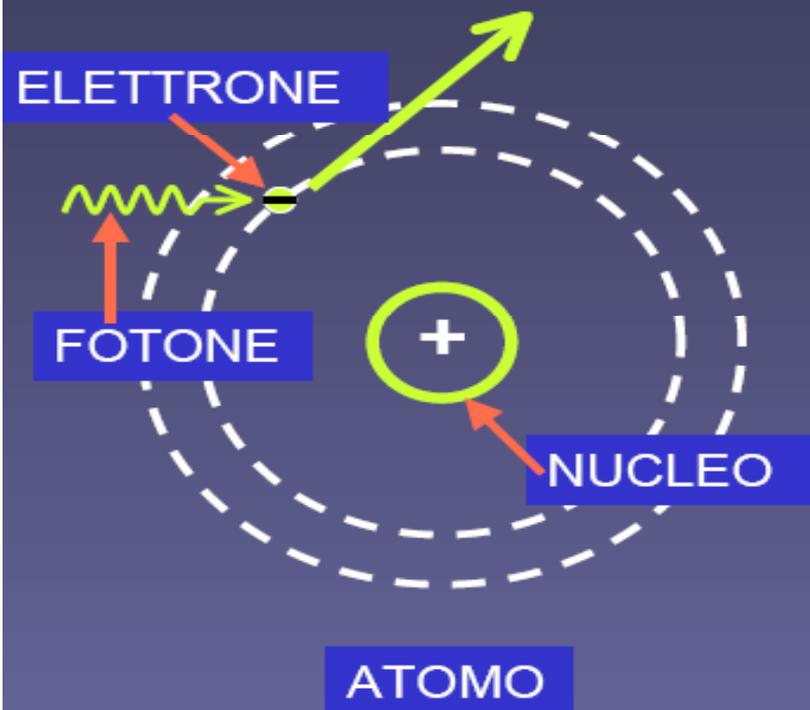
- Fotoni a **bassa** energia → effetto fotoelettrico
- Fotoni ad **media** energia → interazione Compton
- Fotoni ad **alta** energia → produzione di coppie

- Bassa energia  $< 500$  keV
- $500$  keV  $<$  media energia  $< 1$  MeV
- Alta energia  $> 1,022$  MeV



# Effetto fotoelettrico

## Effetto fotoelettrico



- Un fotone di bassa energia può **collidere** con un elettrone orbitale ed **espellerlo** dall'atomo. Il fotone viene totalmente assorbito;
- L'elettrone viene espulso con una **energia** uguale all'energia del fotone meno l'energia di legame dell'elettrone all'atomo.
- Vengono espulsi gli elettroni degli **orbitali più interni**;
- Gli elettroni degli orbitali superiori scendono a ricoprire la vacanza e nello spostamento vengono emessi **raggi x**.

*Servizio di Fisica Sanitaria e Radioprotezione - Università di Cagliari*

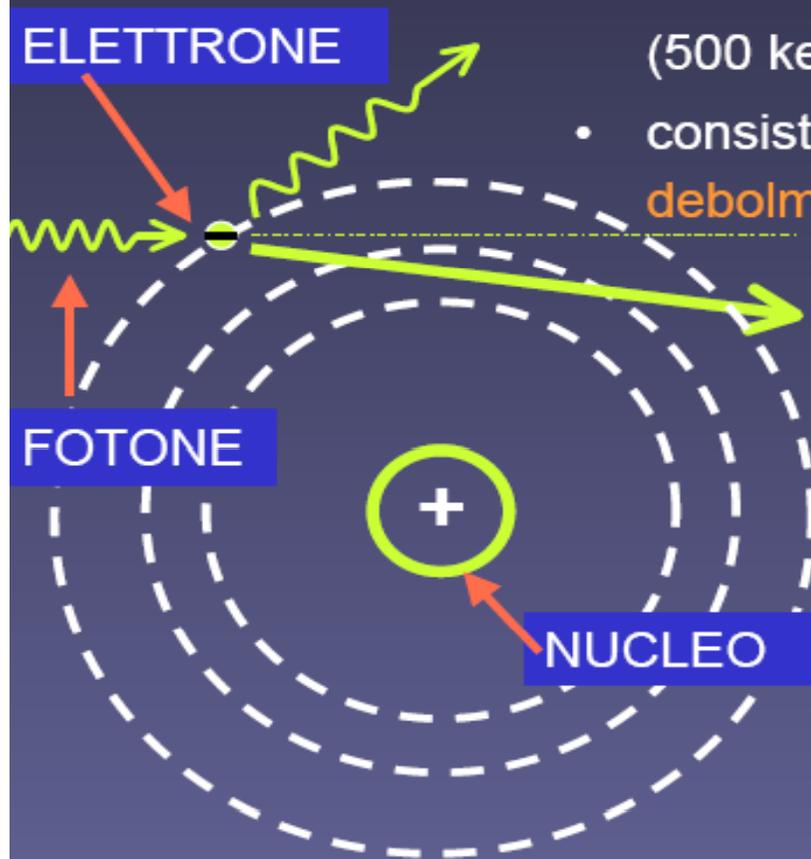
# Effetto Compton

## Interazione Compton

- Avviene per fotoni di **energia media** ( $500 \text{ keV} < e < 1 \text{ MeV}$ );
- consiste nella collisione di un fotone con un **elettrone debolmente legato**; (come gli elettroni degli orbitali più esterni);

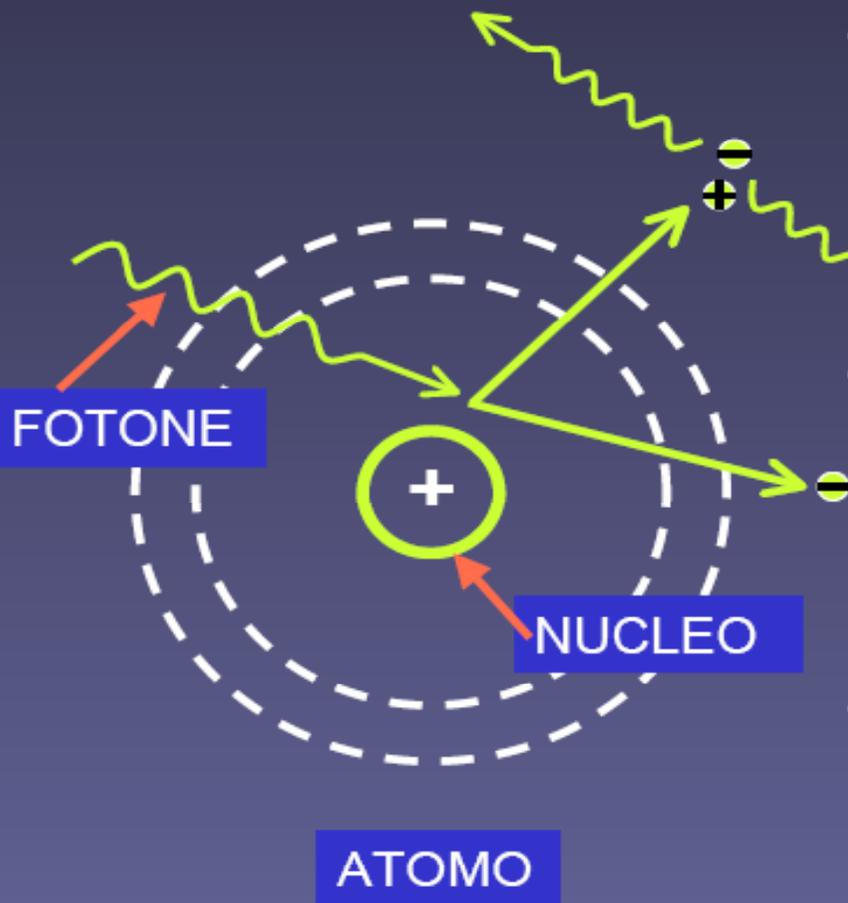
Dalla collisione emerge:

- un nuovo **fotone** con energia inferiore e traiettoria diversa da quella originale;
- l'**elettrone** con energia pari all'energia persa dal fotone incidente;



# Produzione di coppie

## Produzione di coppie



- Consiste nella creazione di una coppia **elettrone** – **positrone** (particella del tutto simile all'elettrone ma di carica +)
- E' un effetto a soglia, pertanto si verifica solo per fotoni con **energie superiori a 1,022 MeV** (massa dell'elettrone = 0,511 MeV);
- Si verifica nelle **vicinanze di un nucleo** a causa dell'interazione del fotone con il campo elettrico creato dal nucleo;

# Produzione di coppie

Visualizzazione in camera a bolle  
(rivelatore di particelle cariche)  
di due esempi di produzione di coppie  
 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ :

1) "tripletto":  
nel campo di un elettrone atomico

2) "coppia":  
nel campo di un protone

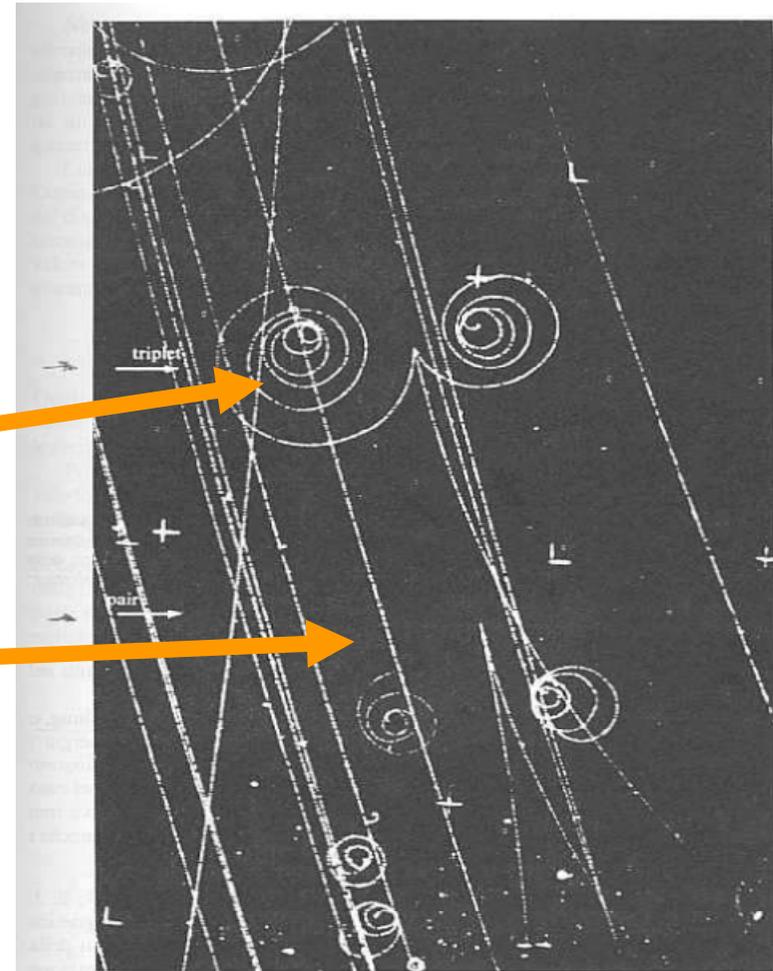


Figura 2.28. Formazione di una coppia elettrone-positrone nel campo di un elettrone (tripletto). Formazione di una coppia nel campo di un protone (coppia). (Camera a bolle a idrogeno). [Foto gentilmente concessa dal Lawrence Radiation Laboratory].



# Annichilazione di antimateria e materia

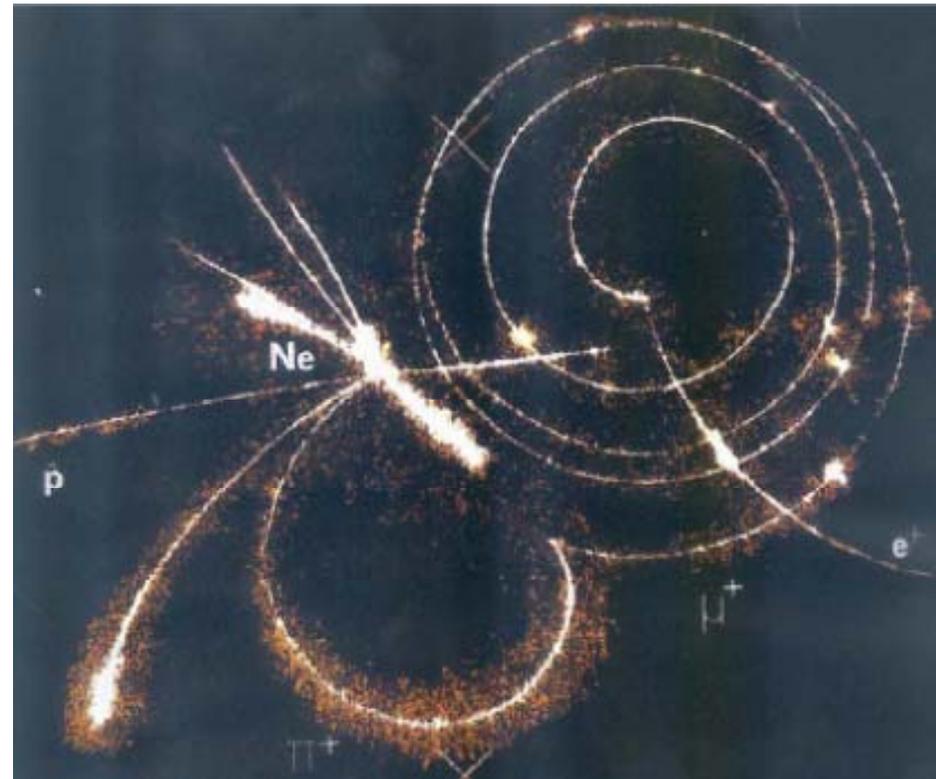
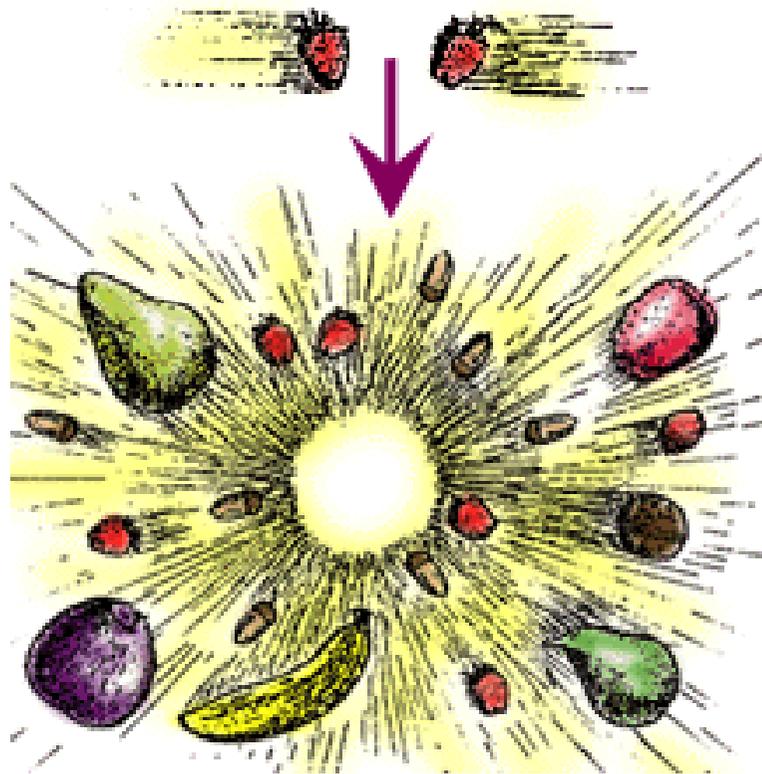


Fig. 3. Annichilazione di un antiprotone su un nucleo di neon, osservata in camera a stramer dall'esperimento Tofradupp al Cern di Ginevra. Essendo attivo un campo magnetico, le particelle cariche emesse vengono deviate e danno le caratteristiche "spirali" a curvatura sempre più piccola al calare dell'energia. Tra esse, si distingue chiaramente la traccia di un pione carico che decade secondo la catena  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ,  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ .

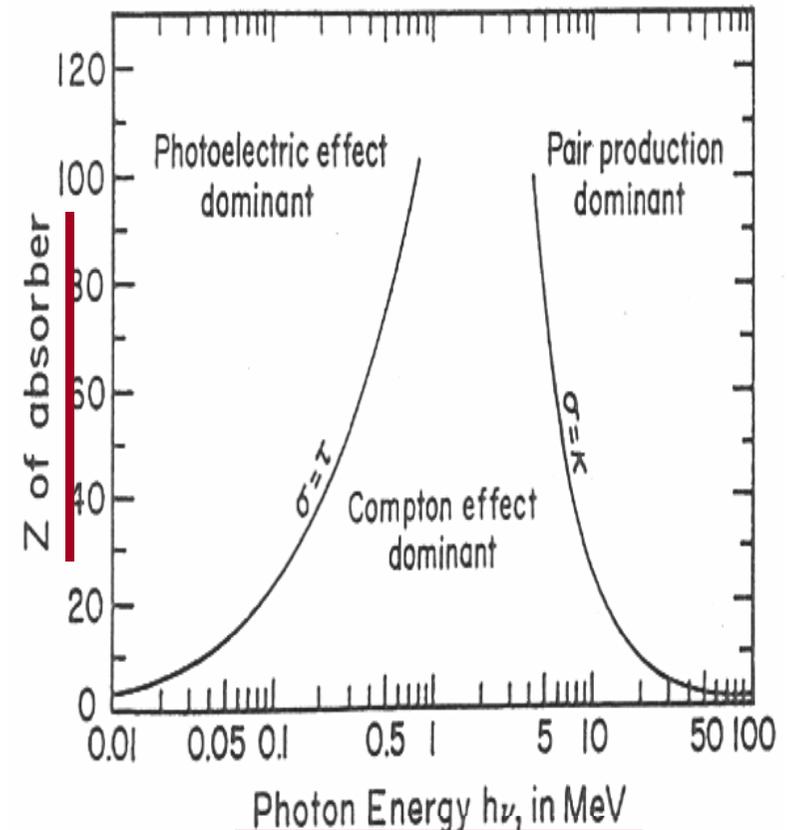
(da F.Balestra et al., *Experimental apparatus for studying the interaction of antiprotons with light nuclei*, Nuclear Instruments and Method in Physics Research A234(1985)30 ).

# Fotoni

I fotoni possono interagire con la materia in modi diversi a seconda dell'energia che trasportano:

- Fotoni a **bassa** energia → effetto fotoelettrico
- Fotoni ad **media** energia → interazione Compton
- Fotoni ad **alta** energia → produzione di coppie

- Bassa energia < 500 keV
- 500 keV < media energia < 1 MeV
- Alta energia > 1,022 MeV



In dipendenza da:

- energia dei fotoni
- n.atomico del materiale



Figura VII-14: Dipendenza dell'effetto fotoelettrico, dell'effetto Compton e della produzione di coppie dall'energia (E) dei fotoni e dal numero atomico (Z) del materiale. (da: F.H. Attix: Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry - A. Wiley-Interscience Publication)

# Assorbimento/Attenuazione

Un fascio di  $N_0$  fotoni, attraversando uno spessore  $\Delta x$  di materiale, viene attenuato in quanto i singoli fotoni vengono assorbiti o deviati secondo i tre processi descritti.

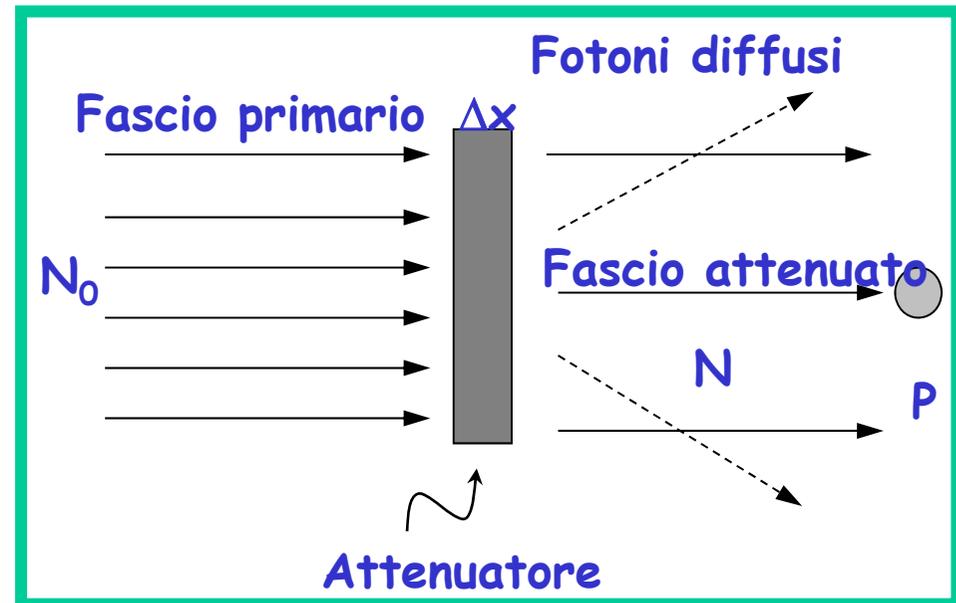
Il n° di fotoni che interagiscono nello spessore di materiale  $\Delta x$  (e che quindi vengono sottratti al fascio originario) è

$$\Delta N \propto -N_0 \Delta x$$

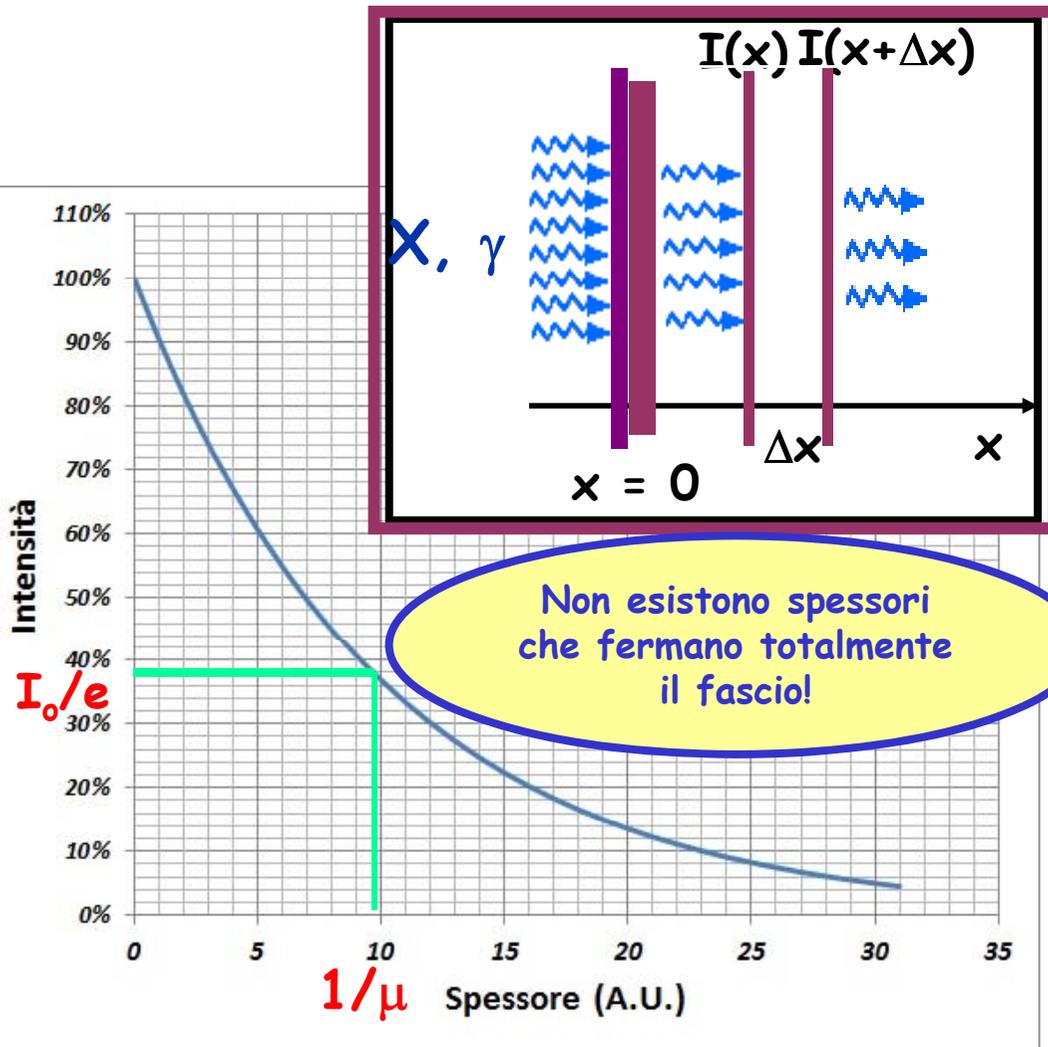
$$\Delta N = -\mu N_0 \Delta x$$

Il numero di fotoni ancora presenti nel fascio alla profondità  $x$  è:

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x}$$



# Assorbimento esponenziale



$\mu$  = coefficiente di attenuazione lineare del materiale ( $\text{cm}^{-1}$ )

$1/\mu$  = spessore dopo il quale il fascio si riduce a  $I_0/e = 37\% I_0$

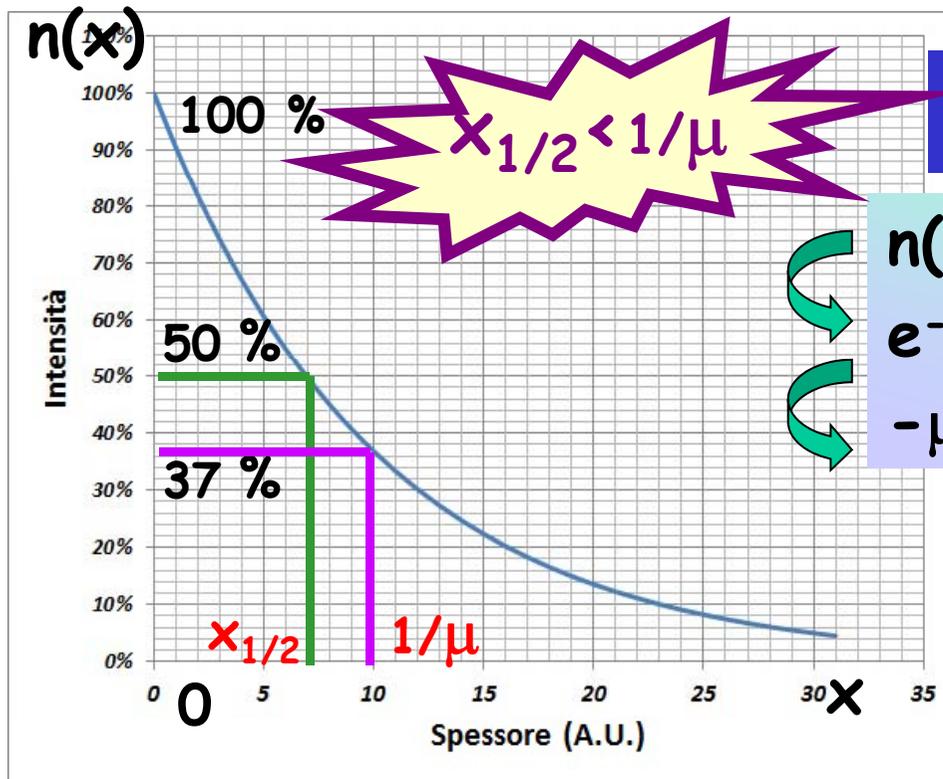
Dipende dal materiale e dall'energia del fascio

$\mu/\rho$  = coefficiente di attenuazione di massa del materiale ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

Dipende quasi soltanto dall'energia del fascio

# Spessore di dimezzamento

$1/\mu$  = spessore dopo il quale rimane il 37 % dell'intensità del fascio ( $=1/e$ )  
Spessore di dimezzamento  $x_{1/2}$  = spessore dopo il quale rimane il 50 % dell'intensità del fascio



Relazione tra  $1/\mu$  e  $x_{1/2}$ :

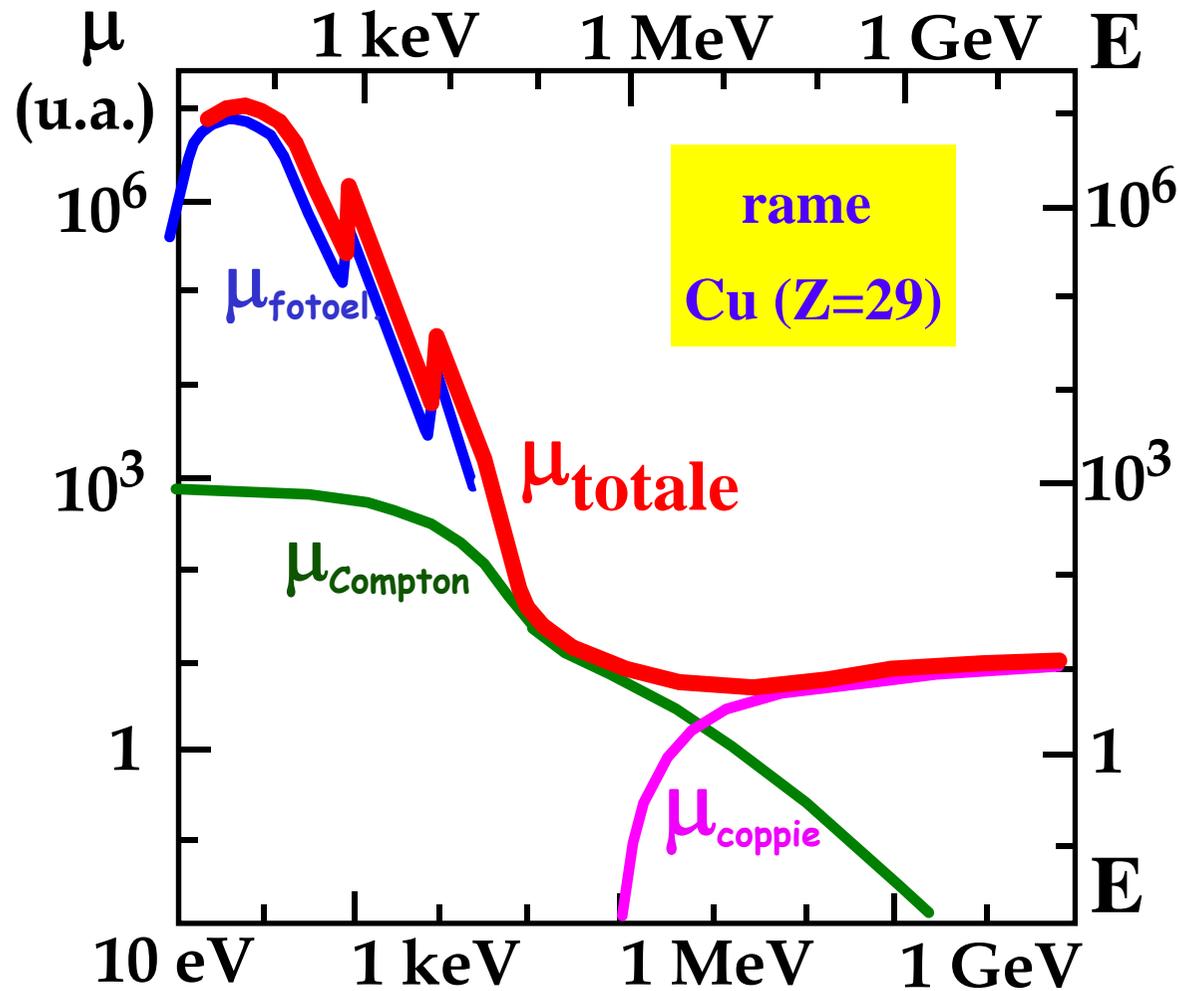
$$n(x_{1/2}) = n_0/2 = n_0 e^{-\mu x_{1/2}}$$

$$e^{-\mu x_{1/2}} = 1/2$$

$$-\mu x_{1/2} = \ln \frac{1}{2} = -\ln 2 = -0.693$$

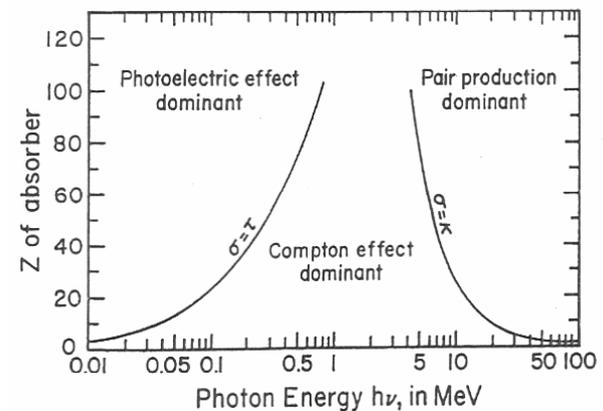
$$x_{1/2} = 0.693/\mu$$

# Assorbimento complessivo



$$\mu = \mu_{\text{fotoel}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{coppie}}$$

$\mu_{\text{fotoel}}$	$\propto \rho Z^4/E^3$
$\mu_{\text{Compton}}$	$\propto \rho Z/E$
$\mu_{\text{coppie}}$	$\propto \rho Z^2 \ln E$



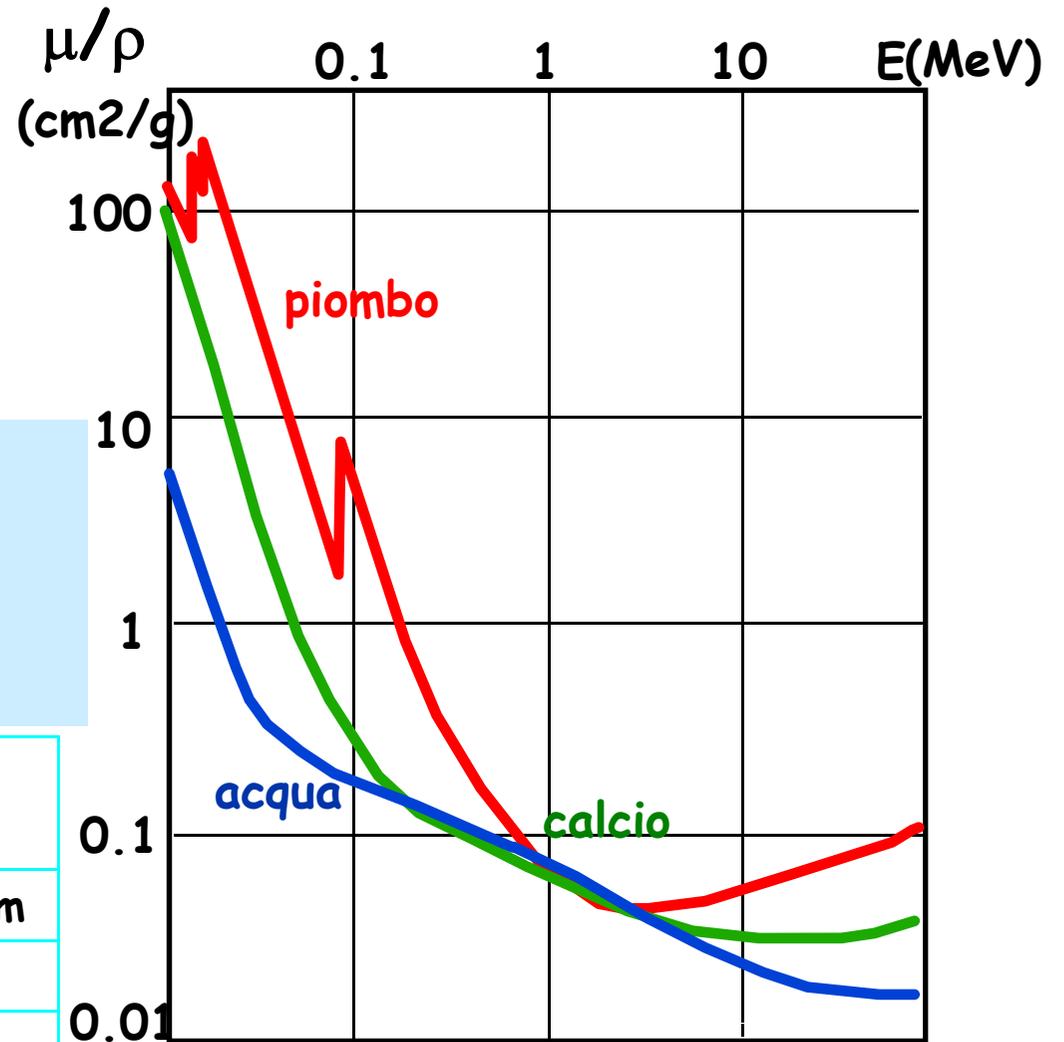
# Assorbimento in diversi materiali

$\mu/\rho$  = coefficiente di attenuazione di massa del materiale ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

Quasi indipendente dal tipo di materiale

Es. raggi X da 25 keV

L'intensità si riduce di un fattore 7 (~14%) in 30 m di ossigeno  
 oppure 0.12 mm di rame  
 oppure 32  $\mu\text{m}$  di piombo



Raggi X da	$X_{\frac{1}{2}}$ in tessuto	$X_{\frac{1}{2}}$ in piombo
10 keV	0.131 cm	0.00076 cm
100 keV	4.05 cm	0.012 cm
1 MeV	9.8 cm	0.89 cm

# In laboratorio...

**Sorgente radioattiva:**  $^{22}_{11}\text{Na}$  ( $T_{1/2} = 2.6 \text{ y}$ )

**Decadimento:** 90%  $\beta^+$ , 10% cattura elettronica; entrambi seguiti da dec.  $\gamma$



Sistema di scintillatori interfacciati a un calcolatore.  
Misura della frazione di  $\gamma$  incidenti e della loro energia.

Piombo:

$x_{1/2} = 1 \text{ cm}$  per  $\gamma$  da 1274 keV

Spessore di piombo da 5 cm  
(=  $5 x_{1/2}$ ):  
riescono ad attraversarlo  
circa il 3 % dei  $\gamma$  emessi.

