

La radioprotezione nelle attività di ricerca INFN



Alessandro Tofani

Esperto di radioprotezione INFN Pisa

Definizioni e tassonomia delle radiazioni ionizzanti - I

energie di prima ionizzazione (eV)

IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	o
H 13.59	<i>Ionization energy increasing order</i> →						He 24.58
Li 5.39	Be 9.32	B 8.30	C 11.26	N 14.53	O 13.61	F 17.42	Ne 21.58
Na 5.14	Mg 7.64	Al 5.98	Si 8.15	P 10.48	S 10.36	Cl 13.01	Ar 15.75
K 4.38	Ca 6.11	Ga 6.00	Ge 7.88	As 9.81	Se 9.75	Br 11.84	Kr 14.00
Rb 4.18	Sr 5.69	In 5.78	Sn 7.34	Sb 8.64	Te 9.01	I 10.45	Xe 12.13
Cs 3.89	Ba 5.21	Tl 6.10	Pb 7.41	Bi 7.29	Po 8.43	At	Rn 10.75

Le energie di prima ionizzazione atomiche vanno da qualche eV a poche decine di eV, quindi non esiste una soglia univoca per definire le radiazioni ionizzanti. Si ricorre quindi alla seguente convenzione:

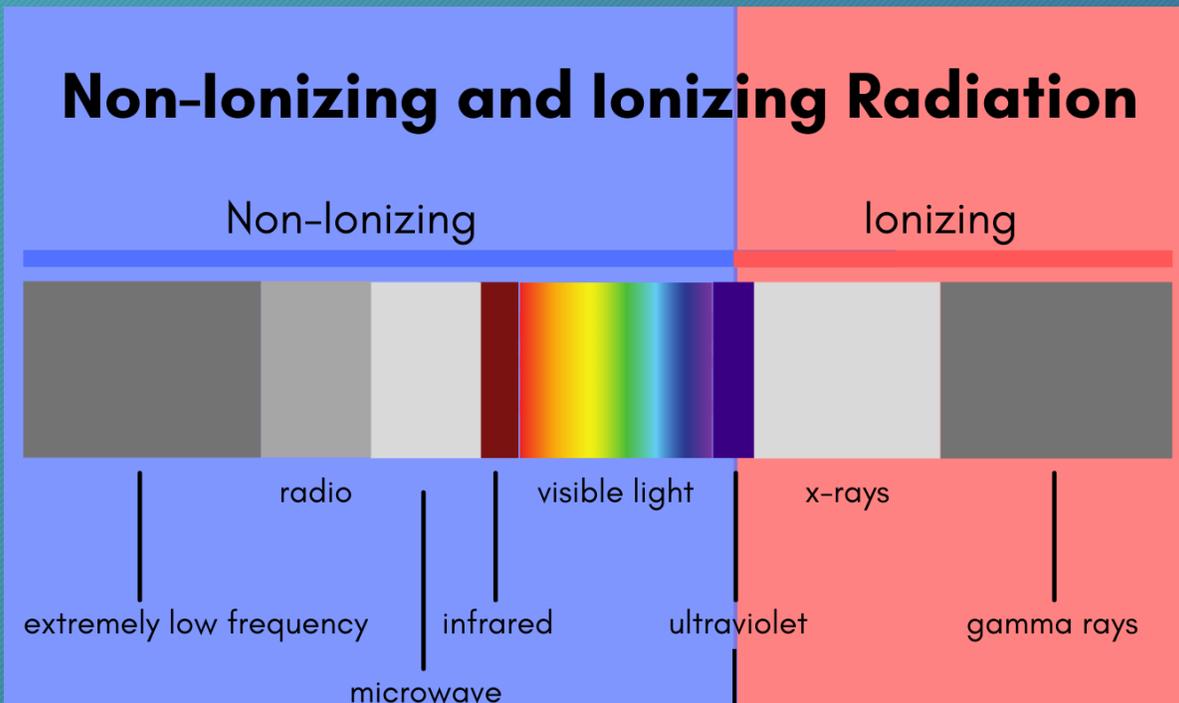
un qualsiasi tipo di radiazione si dice ionizzante se possiede un'energia $E > 10$ eV

Radiazioni e.m. $E = h\nu$

Radiazioni corpuscolari $E = (\gamma - 1)mc^2$

Definizioni e tassonomia delle radiazioni ionizzanti - II

radiazioni e.m.



$$h \frac{c}{\lambda} = 1.602 \cdot 10^{-18} \rightarrow \lambda = 124 \text{ nm (UV lontano)}$$

radiazioni corpuscolari

cariche leggere

β^-

μ^\pm

$q = \pm e$
 $m = 0.511$
 MeV/c^2

cariche pesanti

\bullet **p** $q = +e, m = 938.3 \text{ MeV}/c^2$

\bullet **α** $q = +2e, m = 3.727 \text{ GeV}/c^2$

muoni

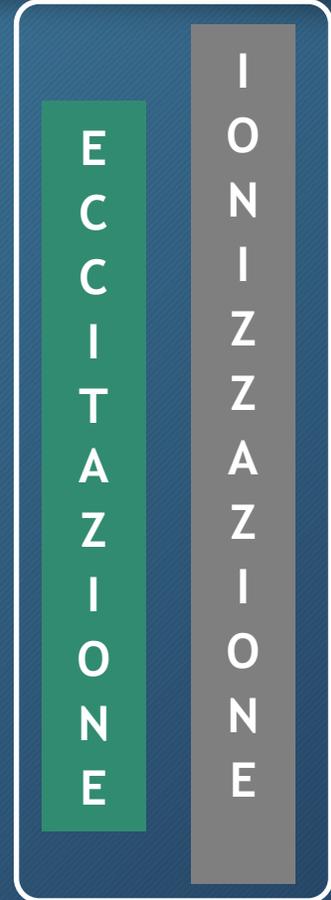
$q = \pm e, m = 105.7 \text{ MeV}/c^2$

fissione

neutre

\bullet **n** $q = 0, m = 939.6 \text{ MeV}/c^2$

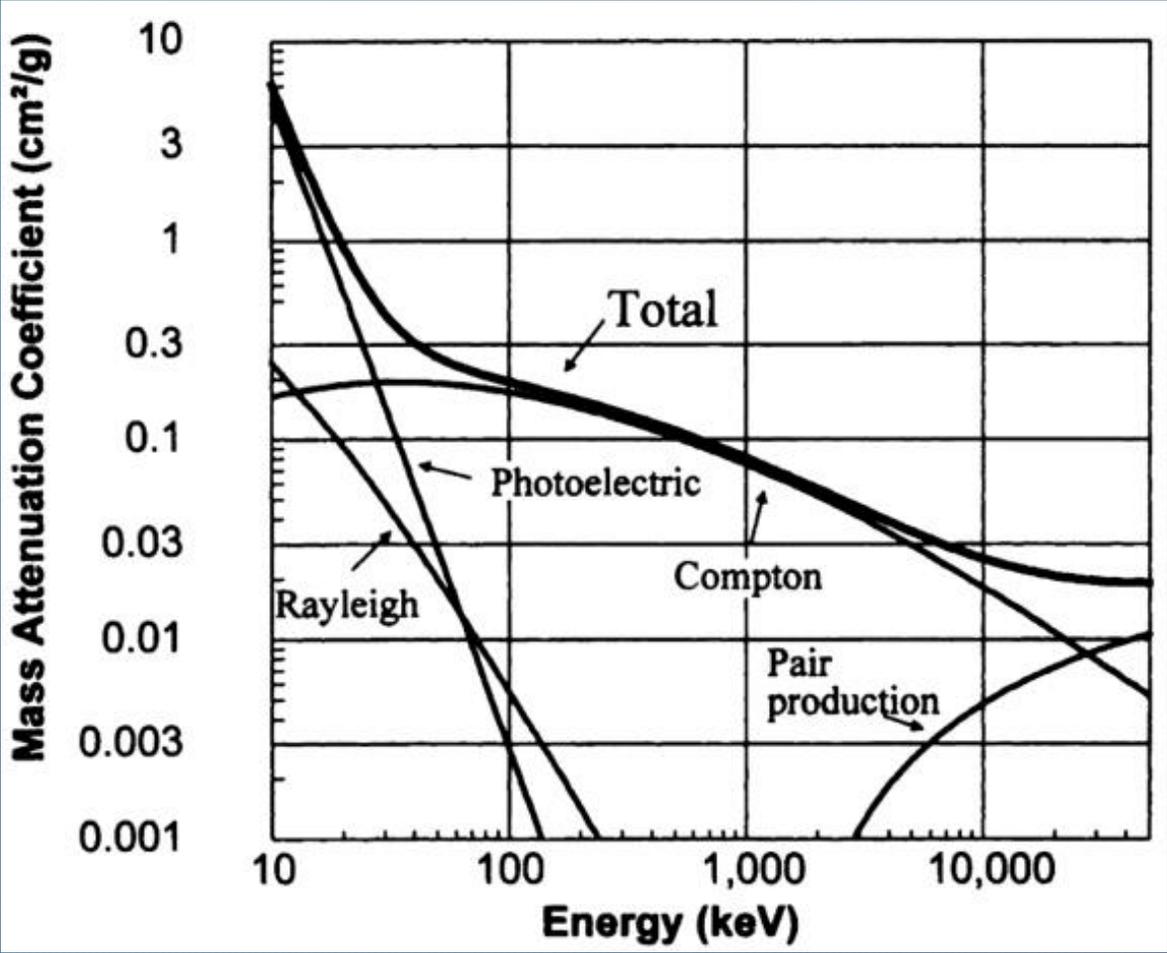
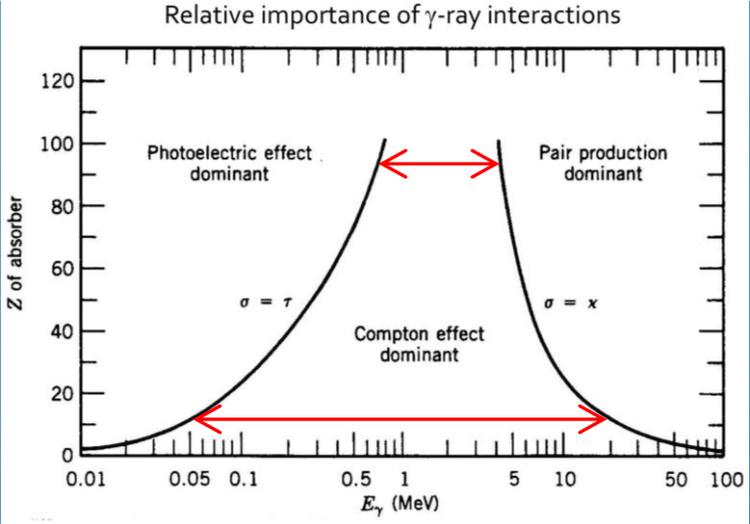
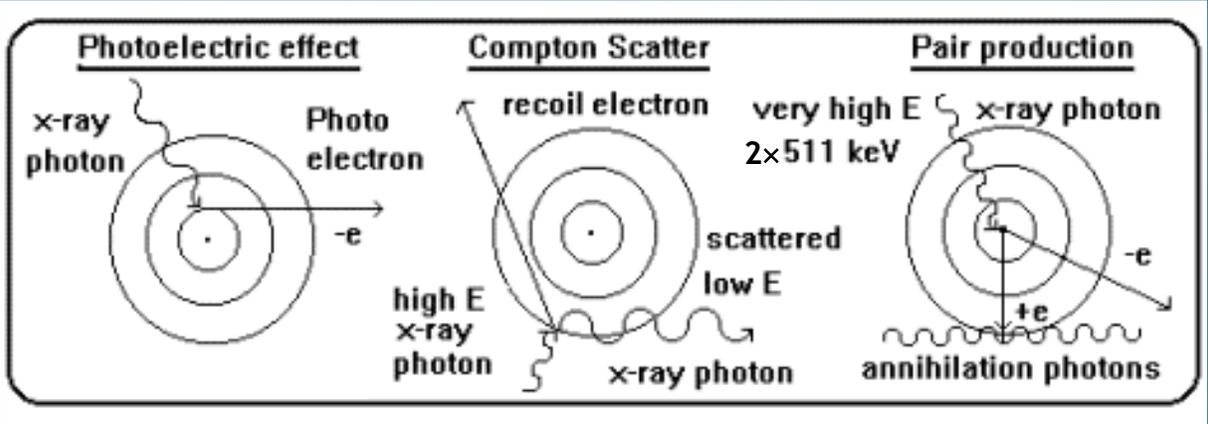
Definizioni e tassonomia delle radiazioni ionizzanti - III



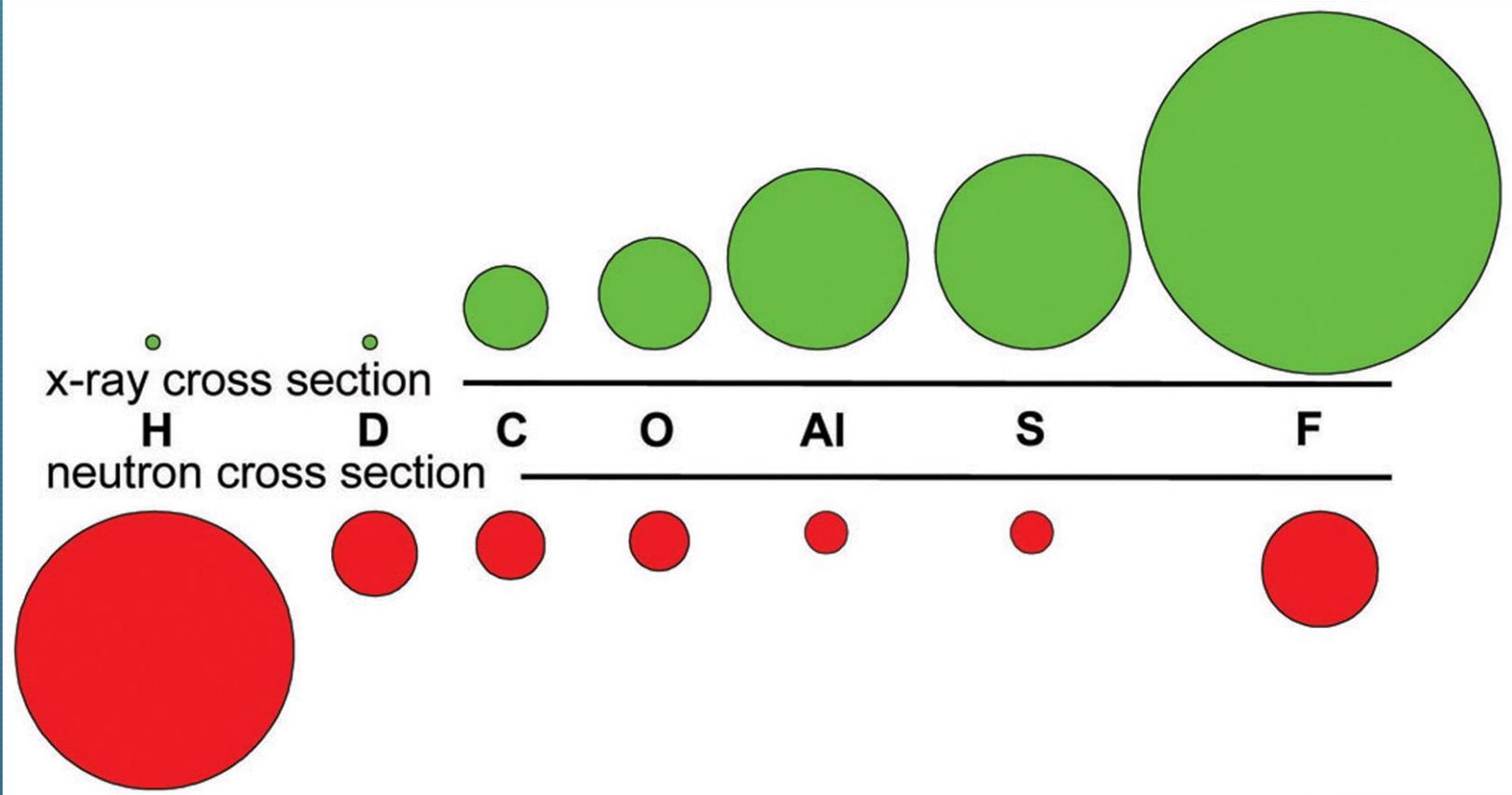
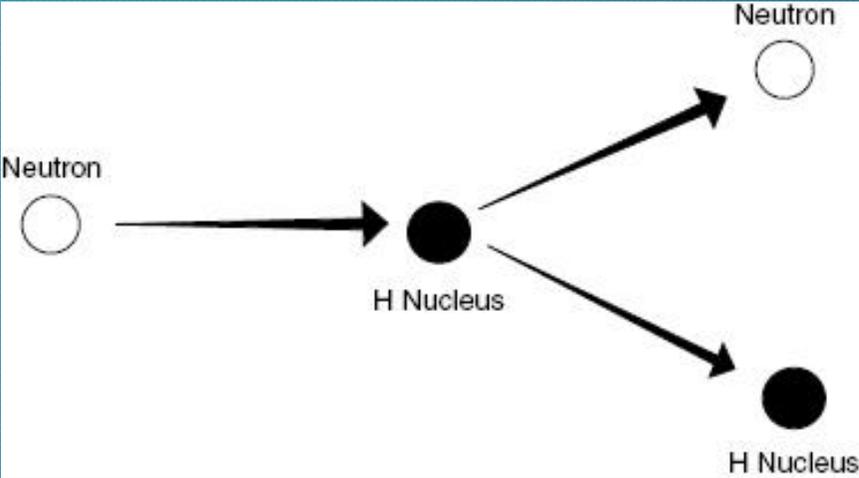
radiazioni direttamente ionizzanti

radiazioni indirettamente ionizzanti

Meccanismi di creazione dei secondari carichi - I



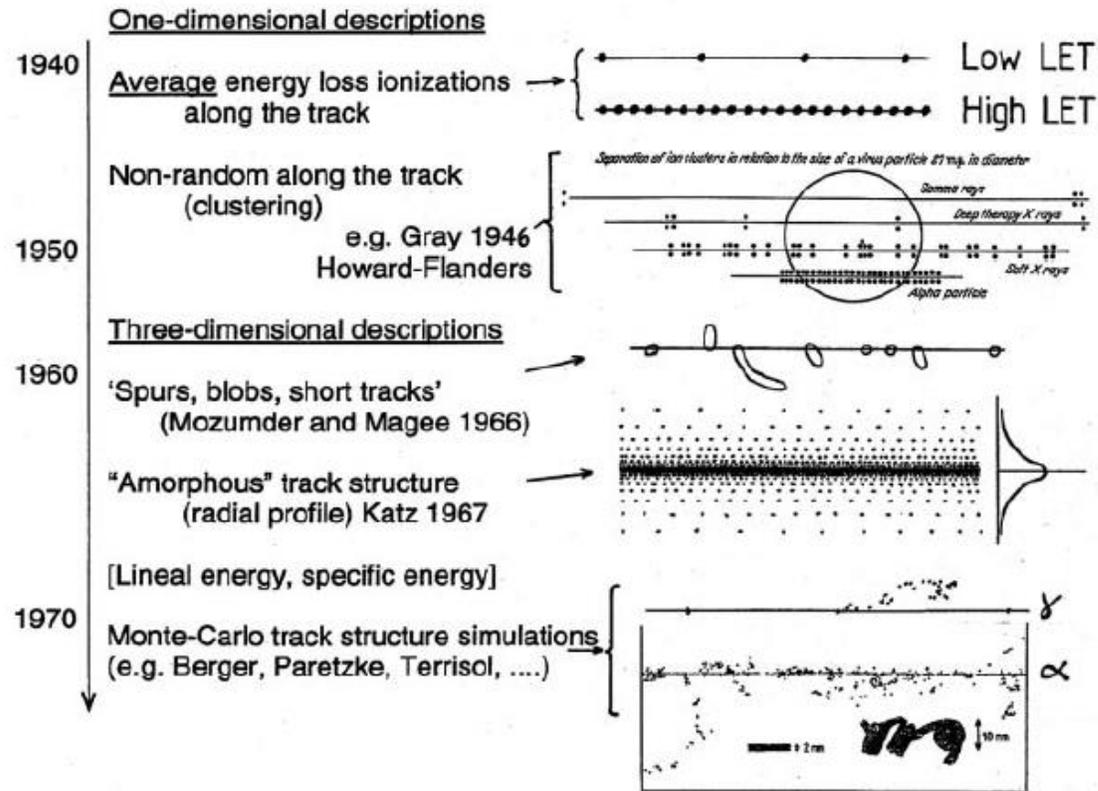
Meccanismi di creazione dei secondari carichi - II



Traiettorie delle particelle cariche

Radiation Protection Dosimetry (2006), Vol. 122, No. 1-4, pp. 3-15
 Advance Access publication 2 February 2007

Partial history of track descriptions



Heavy-ion effects: from track structure

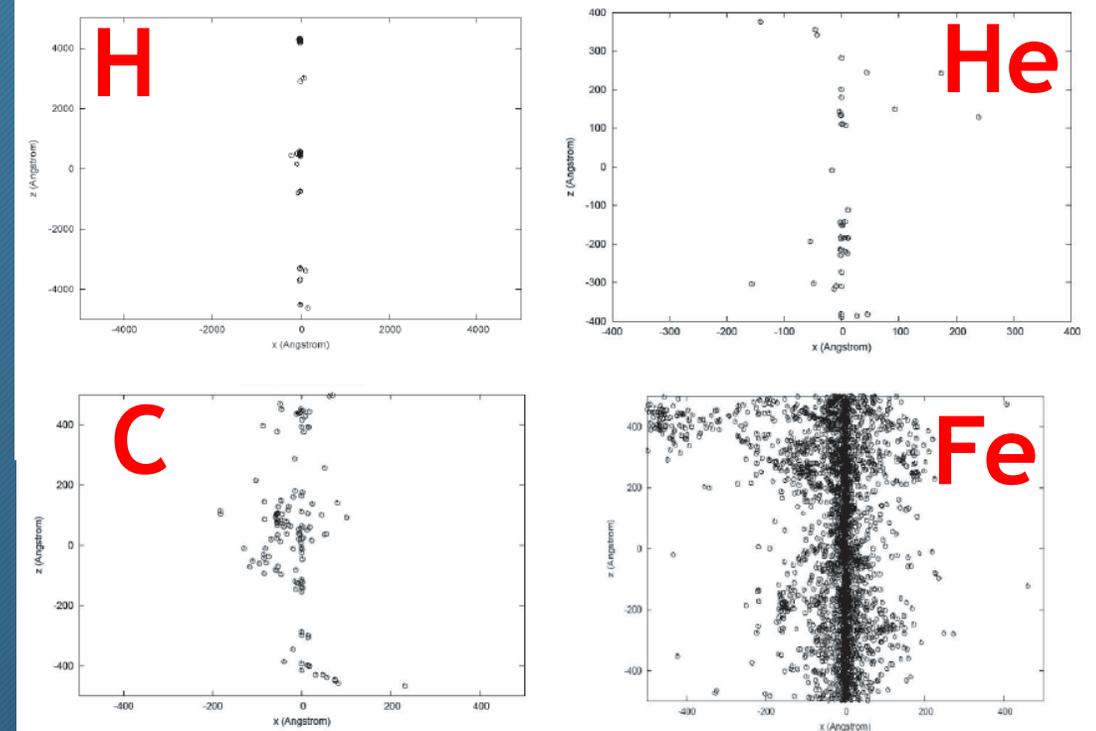
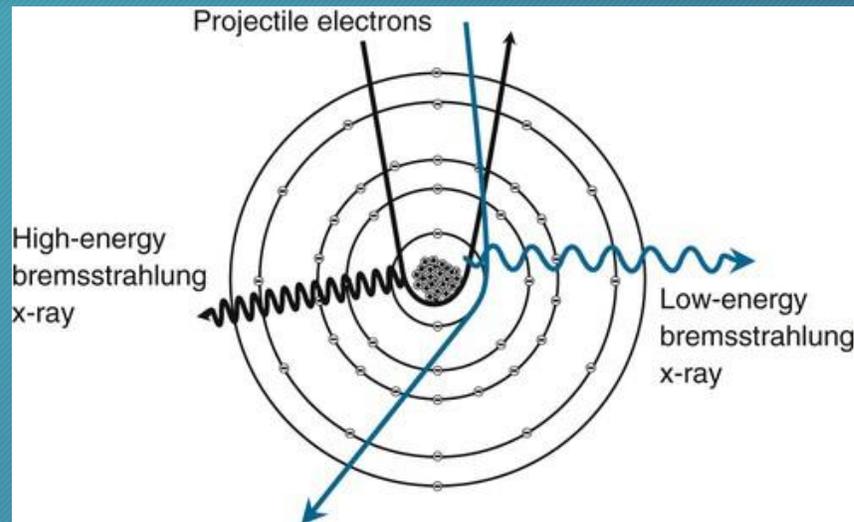


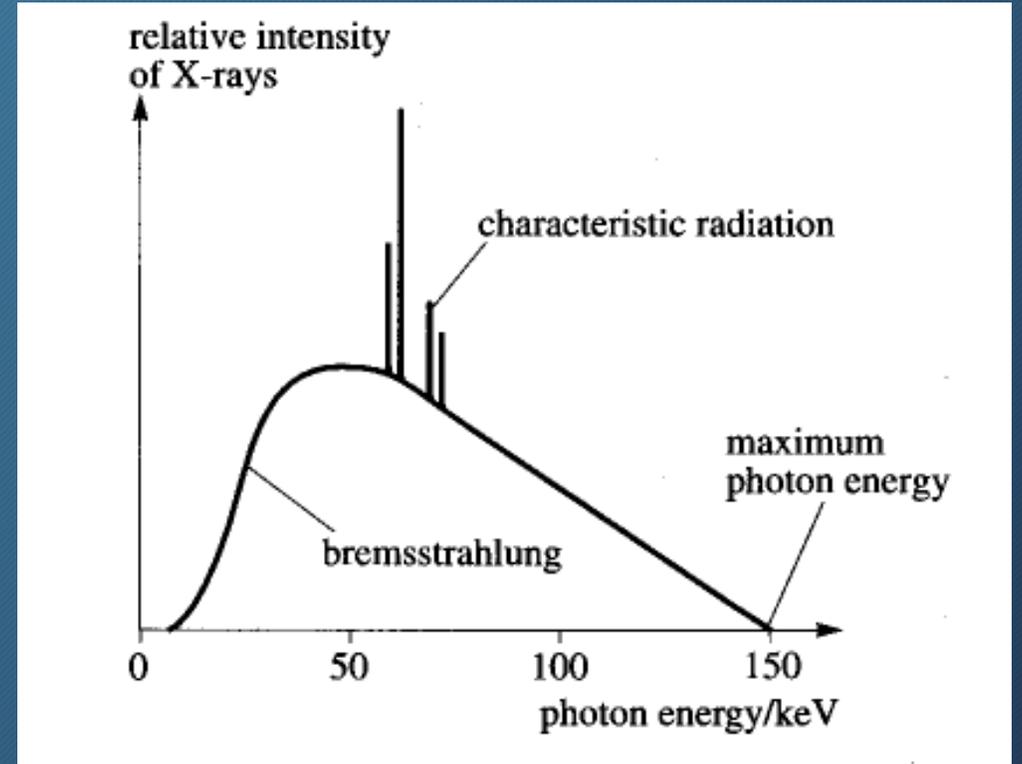
Figure 1. 2D projection of track-structure segments in liquid water for different ions with the same velocity ($115 \text{ MeV nucleon}^{-1}$) as calculated with the PARTRAC code (from top to bottom and from left to right: H, He, C and Fe; note the different scale for the proton track).

Radiazione di frenamento (bremsstrahlung)



Alle basse energie è prevalente il contributo delle particelle cariche leggere.
Per i protoni inizia a manifestarsi al di sopra dei 100 MeV.

spettro



potenza irradiata

$$P_{\parallel} = \frac{q^2 \dot{v}^2 \gamma^6}{6\pi \epsilon_0 c^3} \quad \text{velocità parallela ad accelerazione}$$

$$P_{\perp} = \frac{q^2 \dot{v}^2 \gamma^4}{6\pi \epsilon_0 c^3} \quad \text{velocità perpendicolare ad accelerazione}$$

Perdita di energia delle particelle cariche

Stopping power $S = -\frac{dE}{dl}$ [J/m] dE =energia persa nel tratto dl di traiettoria

Particella carica pesante (carica ze): $\frac{dE}{dl} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} N \cdot B(v, Z, I) \approx \frac{1}{v^2}$

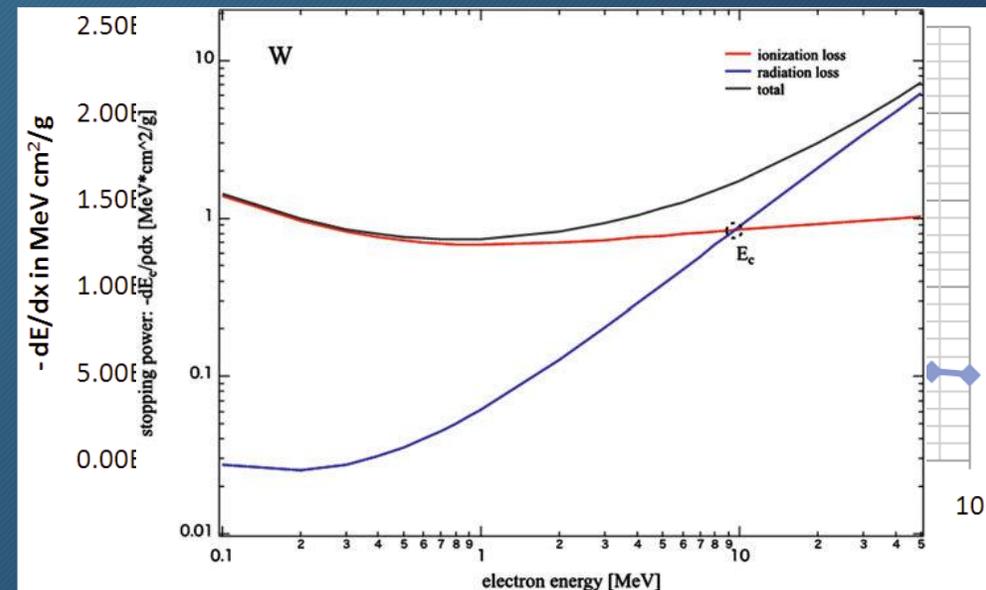
Particella carica leggera: $\frac{dE}{dl} = \left(\frac{dE}{dl}\right)_{coll} + \left(\frac{dE}{dl}\right)_{rad}$

$$\left(\frac{dE}{dl}\right)_{coll} = \frac{2\pi e^4 NZ}{m_0 v^2} B'(v, I)$$

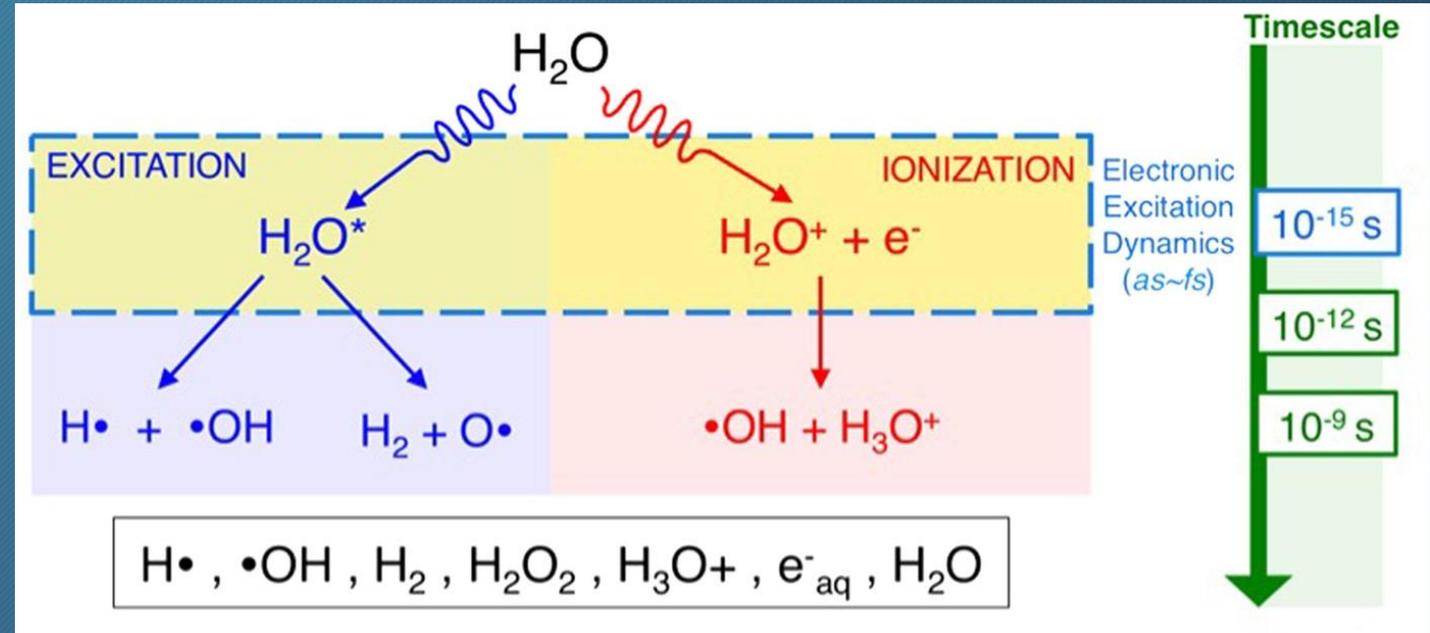
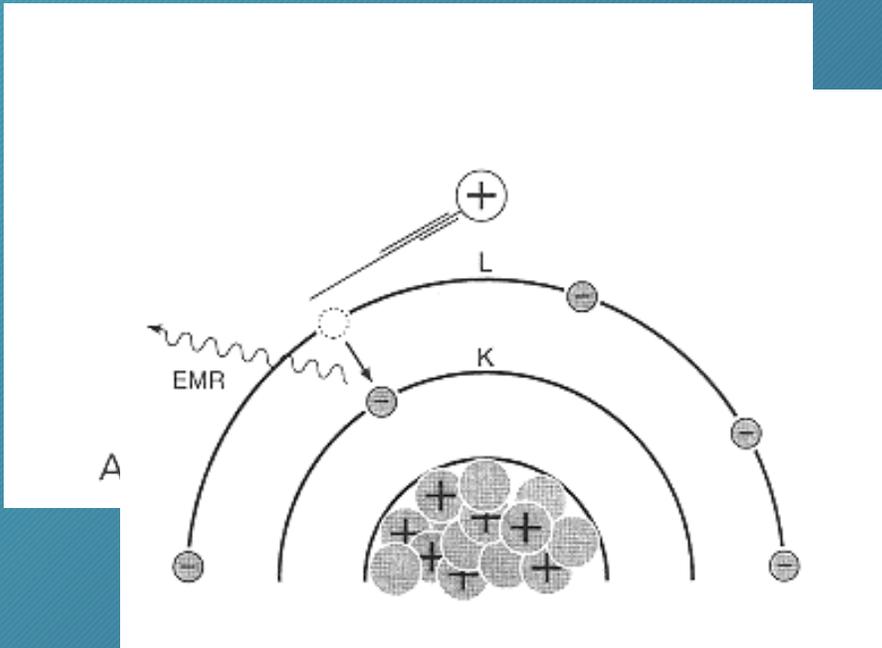
$$S_{rad}/S_{coll} \approx E[\text{MeV}]Z/700$$

vicino alla traiettoria

a distanza dalla traiettoria

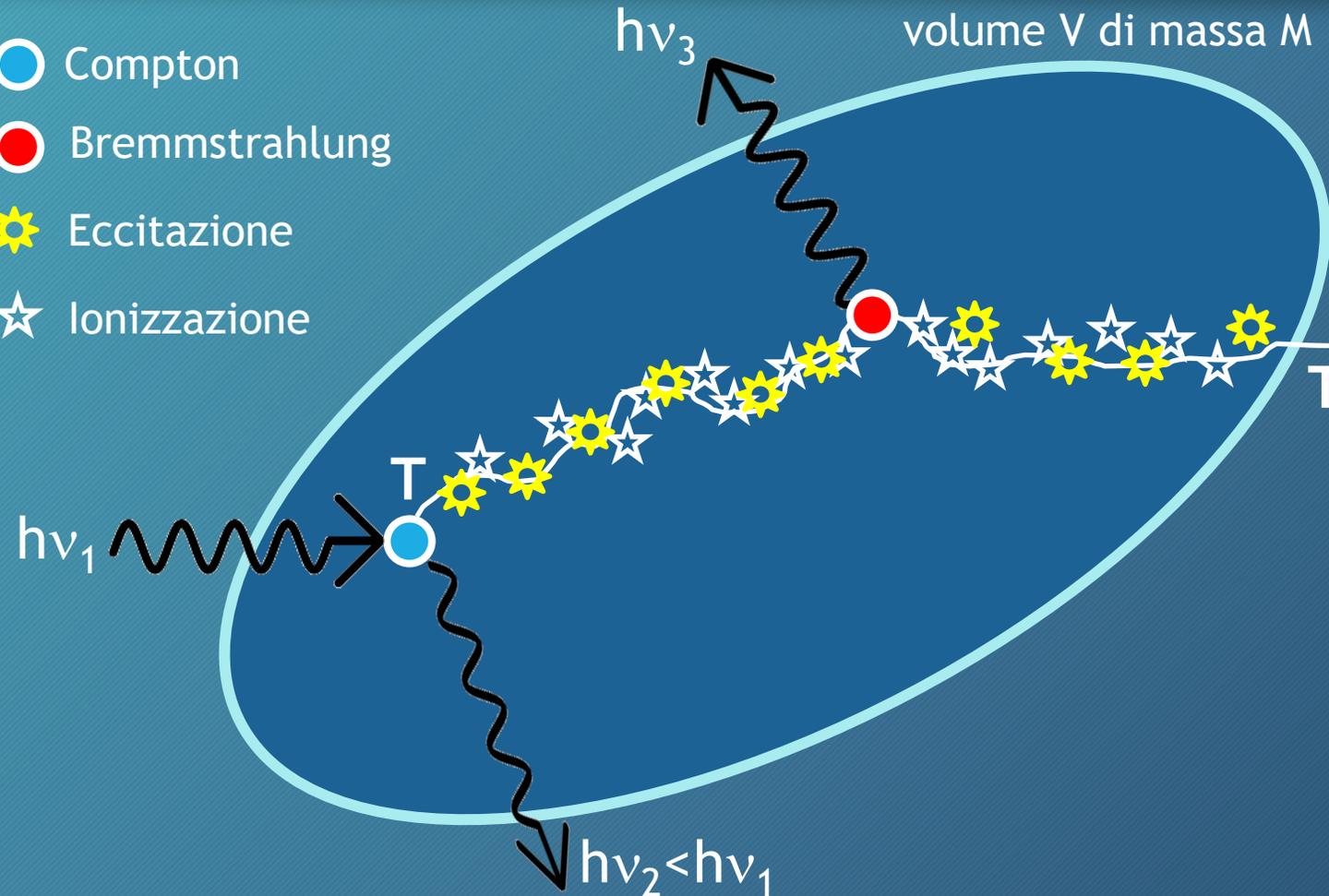


Eccitazioni e ionizzazioni



Energia impartita ε

-  Compton
-  Bremsstrahlung
-  Eccitazione
-  Ionizzazione



ε = somma delle energie in ingresso in V - somma delle energie in uscita da V (sia fotoni che particelle)

$$\varepsilon = h\nu_1 - h\nu_2 - h\nu_3 - T'$$

$$T' = T - h\nu_3 - N_i \bar{W}_i - N_e \bar{W}_e$$

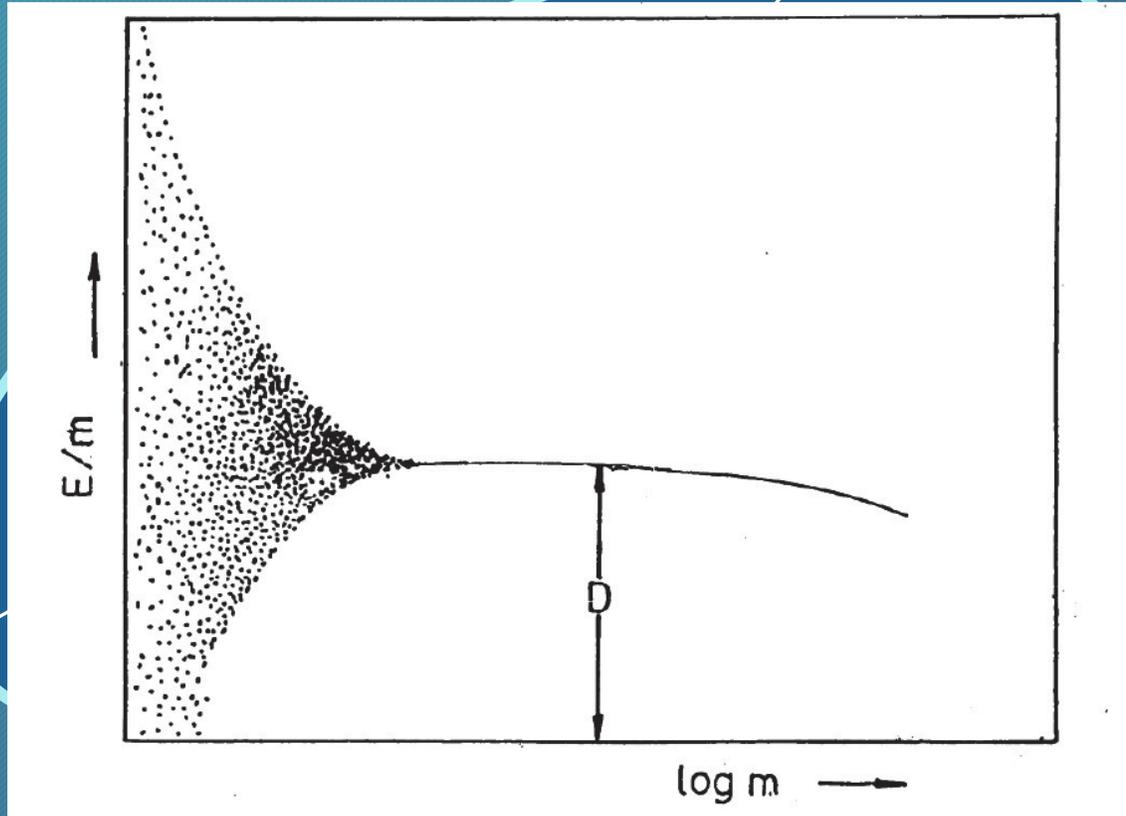
$$T = h\nu_1 - h\nu_2$$

$$\varepsilon = N_i W_i + N_e \bar{W}_e$$

Dose assorbita D

dose media nel volume V

$$\bar{D} = \frac{\varepsilon}{M}$$

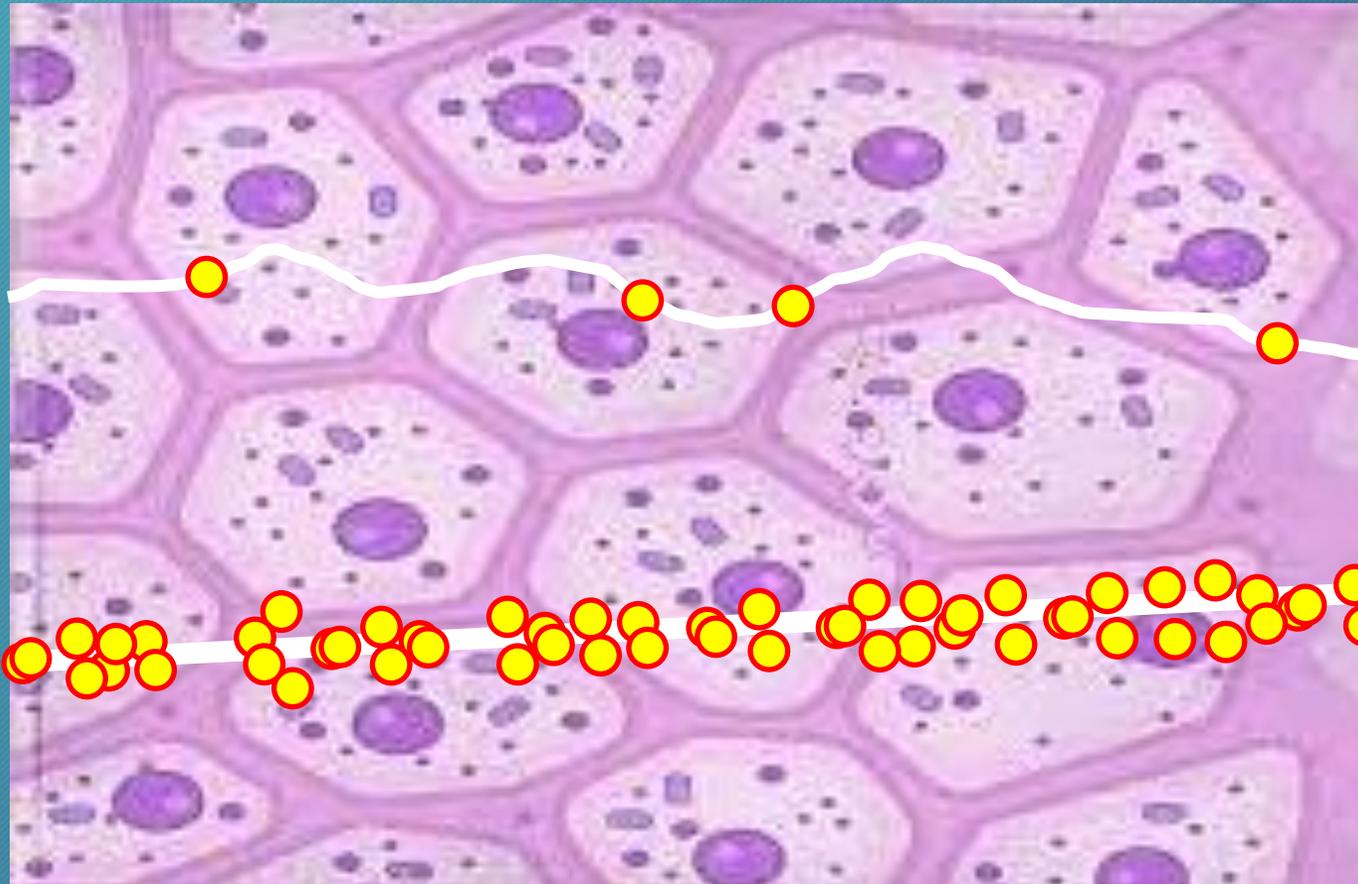


per $V \rightarrow 0$ si può definire la dose nel punto P come:

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

$$[D] = \frac{\text{J}}{\text{kg}} = \text{gray [Gy]}$$

Efficacia radiobiologica relativa (RBE) - I



$$RBE = \frac{D_{250}}{D_r}$$

D_{250} =dose di fotoni X da 250 kV che produce un dato effetto radiobiologico

D_r =dose della radiazione r che produce lo stesso effetto radiobiologico

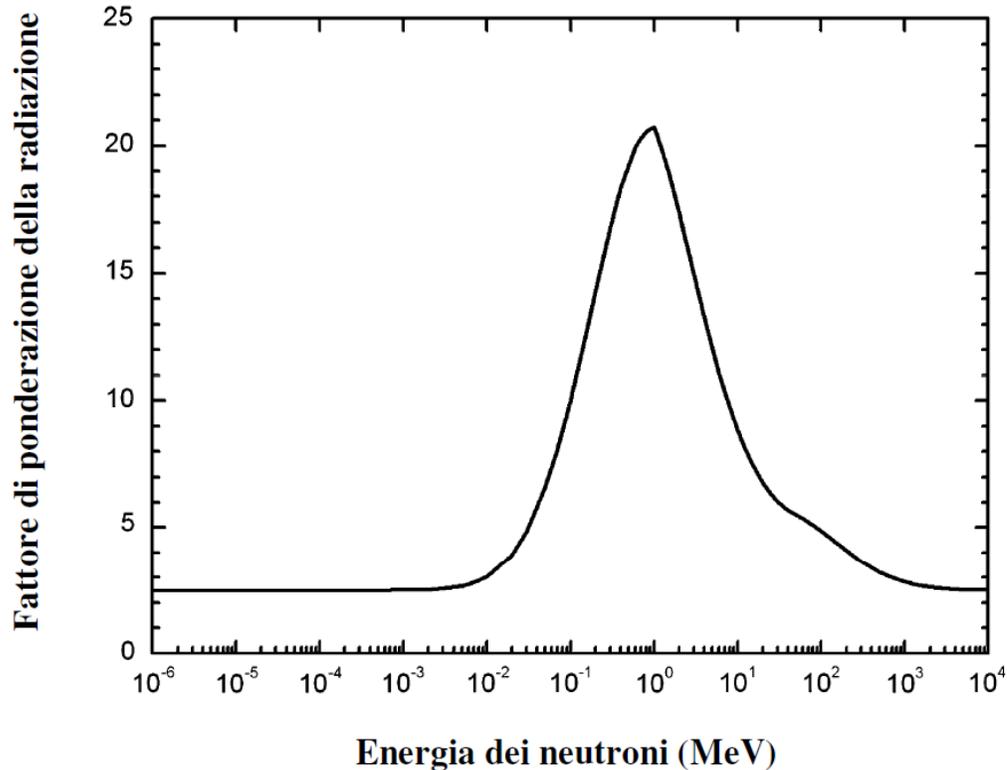
basso LET

alto LET

$$LET = \frac{dE}{dl} \text{ [keV}/\mu\text{m}]$$

Ad esempio, se $D_r = \frac{1}{2} D_{250}$, allora $RBE = 2$

Efficacia radiobiologica relativa (RBE) - II



Fattori di ponderazione per la radiazione w_R

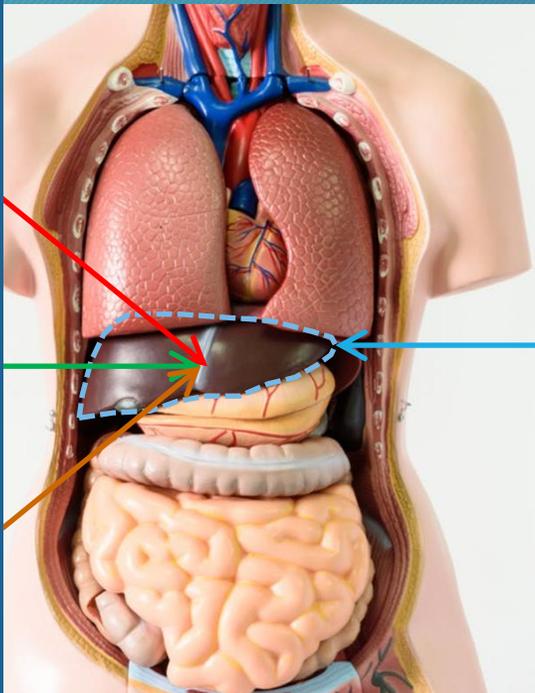
Tipo di radiazione	Fattore di ponderazione della radiazione, w_R
Fotoni	1
Elettroni ^a e muoni	1
Protoni e pioni carichi	2
Particelle alfa, frammenti di fissione, ioni pesanti	20
Neutroni	Funzione continua dell'energia del neutrone (vedi Fig. 1 e Eq. 4.3)

Tutti i valori si riferiscono alla radiazione incidente sul corpo o, per sorgenti di radiazione interne emessa dai radionuclidi incorporati.

Dose equivalente in un organo o tessuto

c
a
m
p
o

m
i
s
t
o



organo o
tessuto T

$D_{R,T}$ = dose (media) assorbita da T dovuta alla radiazione R

dose equivalente nell'organo o tessuto T

$$H_T = \sum_R w_R D_{R,T} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right] = [\text{Sv}] \text{ (sievert)}$$

Esempio: T=fegato, campo misto gamma - n (1 MeV)

$D_g = 0.4 \text{ Gy}$, $D_n = 0.15 \text{ Gy}$

$w_g = 1$, $w_n(1 \text{ MeV}) = 20$

$$H_{fegato} = w_g D_g + w_n D_n = 1 \cdot 0.4 + 20 \cdot 0.15 = 3.4 \text{ Sv}$$

Radiosensibilità relativa

Solid Cancer Incidence 1958–2009	Cancer diagnosis	No. of cases	Survivors
Author(s): Eric J. Condeelis, Elizabeth K. Cahoon, Mabuchi and Kotani Source: Radiation Effects Research Foundation	Oral cavity and pharynx	394	Sadakane, Mai Utada, ... Preston, Kiyohiko
	Esophagus	486	
	Stomach	5,661	
	Colon	1,914	
	Rectum	1,022	
	Liver	2,016	
	Gallbladder	694	
	Pancreas	723	
	Lung	2,446	
	Non-melanoma skin	516	
	Breast	1,480	
	Cervix	886	
	Uterine corpus	244	
	Uterus, NOS	121	
	Ovary	288	
	Prostate	851	
	Bladder	626	
	Kidney and renal pelvis	292	
	Brain and CNS	285	
	Thyroid	502	
	Other solid cancer	1,091	
	Total	22,538	

A parità di dose equivalente assorbita, organi diversi mostrano una diversa suscettibilità allo sviluppo di tumori radioindotti \Rightarrow organi diversi hanno radiosensibilità relative diverse

Fattori di ponderazione per i tessuti w_T

Tessuto	w_T	$\sum w_T$
Midollo osseo (rosso), Colon, Polmone, Stomaco	0,12	0,72
Seno, Tessuti rimamenti *		
Gonadi	0,08	0,08
Vescica, esofago, fegato, tiroide	0,04	0,16
Superficie dell'osso, cervello, ghiandole salivari, pelle	0,01	0,04
	Totale	1,00

* Tessuti rimanenti: ghiandole surrenali, regione extratoracica, cistifellea, cuore, reni, linfonodi, muscolo, mucosa orale, pancreas, prostata (σ), intestino tenue, milza, timo, utero/cervice (σ).

Dose efficace - I

La dose efficace E è definita dall'equazione:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T \sum_R w_T w_R D_{R,T} \quad [\text{Sv}]$$

Criticità:

- non tiene conto né dell'età né del sesso della persona esposta
- è stata ideata per valutare esposizioni lavorative croniche (piccole dosi a intervalli relativamente regolari) e al corpo intero (esposizioni globali)
- non è direttamente misurabile, quindi a rigore non è una vera grandezza fisica

Dose efficace - II

La dose efficace E può essere utilizzata:

- per la valutazione prospettica ai fini della pianificazione e dell'ottimizzazione
- per l'analisi retrospettiva di dose al fine di verificare il rispetto dei limiti

Tabella A.4.4 Coefficienti di rischio nominale modificati per il detrimento per cancro ed effetti ereditari
(10^{-2} Sv^{-1})¹.

ICRP 103 (2007)

Popolazione esposta	Cancro		Effetti ereditari		Total e	
	Presente	ICRP 60	Presente	ICRP 60	Presente	ICRP 60
Intera	5.5	6.0	0.2	1.3	5.7	7.3
Adulta	4.1	4.8	0.1	0.8	4.2	5.6

Valori da tabelle A.4.1 a, A.4.1 b e *Pubblicazione 60*.

P_e = probabilità dell'effetto in eccesso rispetto all'incidenza naturale

C_r = coefficiente di rischio

$$P_e = C_r \cdot E$$

Sorgenti di radiazioni ionizzanti presso INFN

4

T
I
P
O
L
O
G
I
E

tubi radiogeni

Pisa

acceleratori di particelle

Altre sedi INFN e non INFN

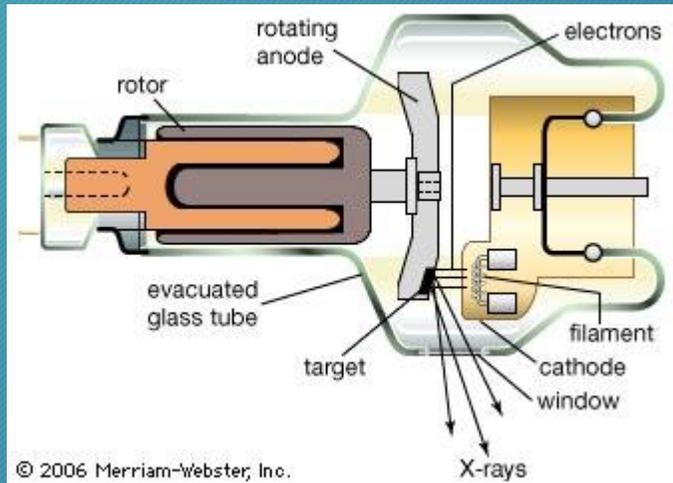
sorgenti radiattive

Pisa, San Piero a Grado

prodotti di attivazione

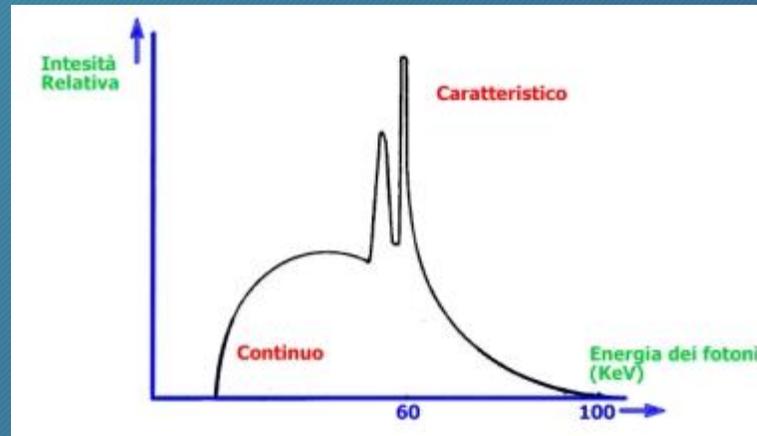
materiali attivati presso altri
enti

Tubi radiogeni

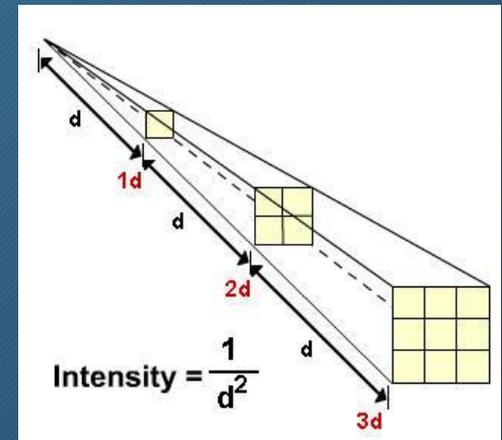


© 2006 Merriam-Webster, Inc.

spettro della radiazione emessa



dipendenza dalla distanza



emissione di tipo «grafia»

dose in aria

$$D_a = K \left(\frac{V}{d}\right)^2 \cdot (i_a t_e) \quad [\text{Gy}]$$

i_a =corrente anodica
 t_e =durata dell'emissione

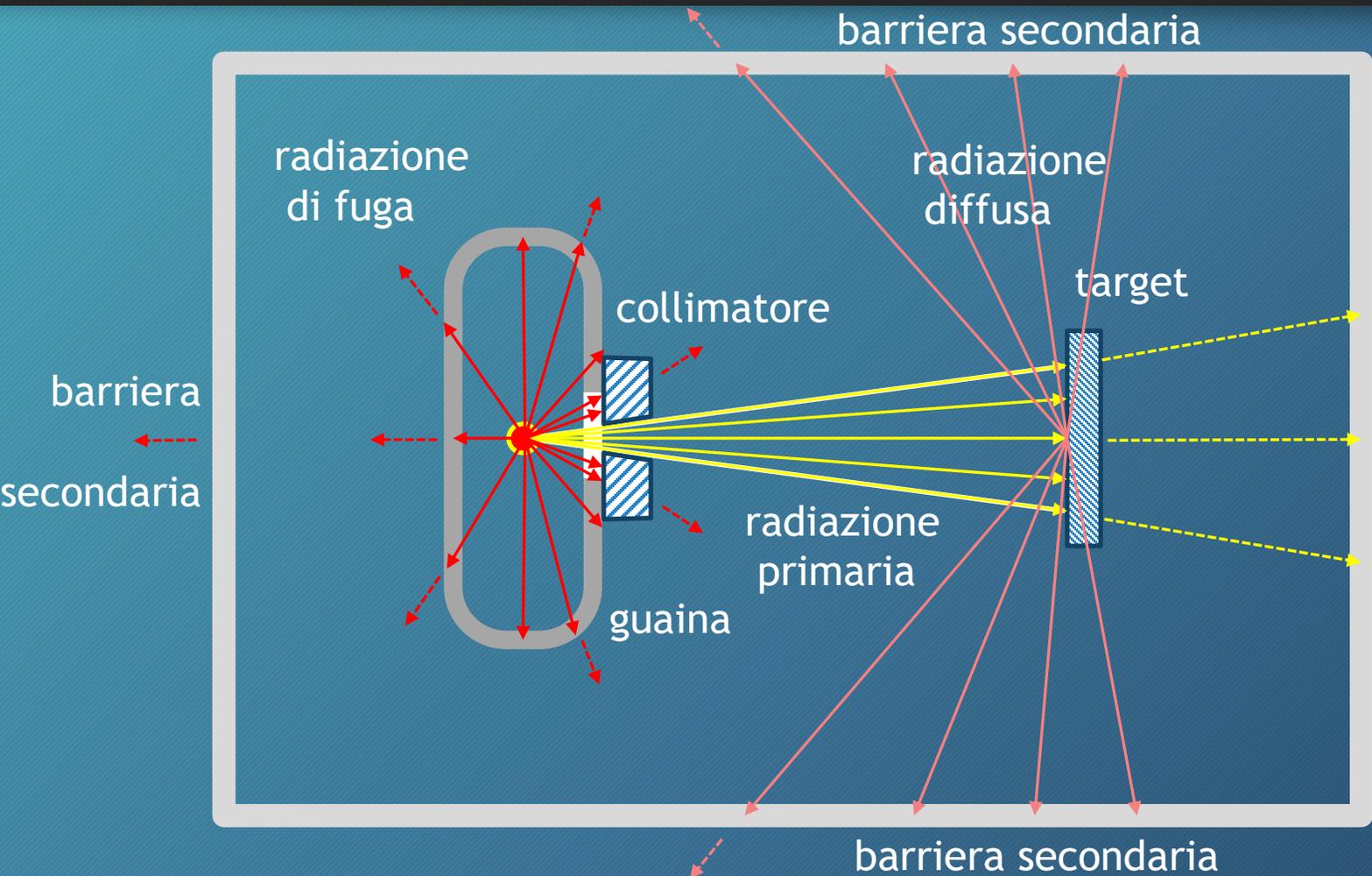
emissione di tipo «scopia»

rateo di dose in aria

$$\dot{D}_a = K \left(\frac{V}{d}\right)^2 \cdot i_a \quad [\text{Gy/s}]$$

$Q=i_a \cdot t_e$ =carico anodico

Campo di radiazione presso un tubo radiogeno



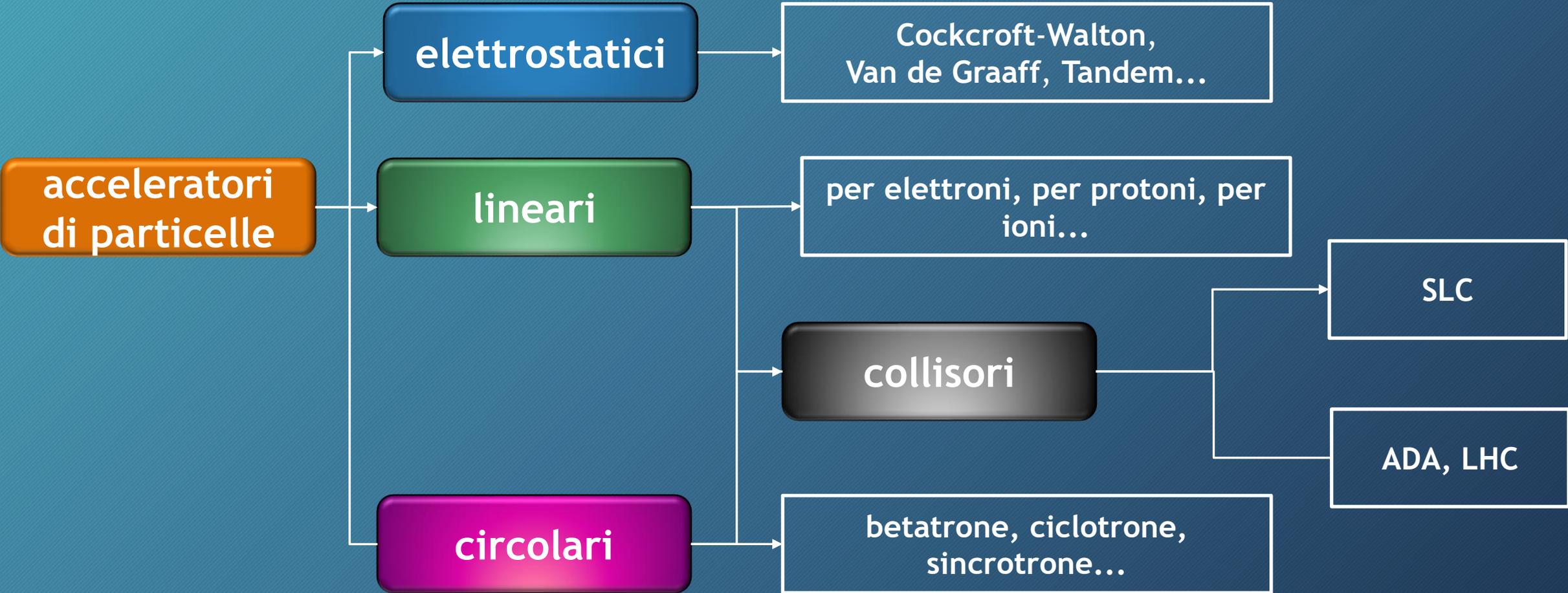
attenuazione dei raggi X

$$I(x) = I(0)B(\mu x)e^{-\mu x}$$

barriera primaria

radiazione secondaria = radiazione di fuga + radiazione diffusa

Acceleratori di particelle



Campi di radiazione presso acceleratori di particelle



tipologie di esposizione

Those radiations of most concern for radiological protection at low and intermediate energies are:

- bremstrahlung x radiation due to the transfer of energy from the moving charged particle to a photon in the electromagnetic field of an atom³
 - characteristic x radiation due to the transfer of energy from the moving charged particle to an electron in a bound atomic state followed by the subsequent decay of that state by photon emission
 - prompt gamma radiation from the interactions of ions or neutrons with matter
 - neutron, charged particles, ions, and nuclear fragments emitted as a result of the transformation of energy from the moving charged particle to an atomic nucleus
 - delayed radiation due to the de-excitation of radioactive nuclei (i.e., induced radioactivity) that have been produced by means of nuclear reactions of the moving particle with atomic nuclei
- In addition to those radiations listed above, muons and other particles, such as pions and kaons, may be of concern.

classificazione delle esposizioni



Esposizioni potenziali

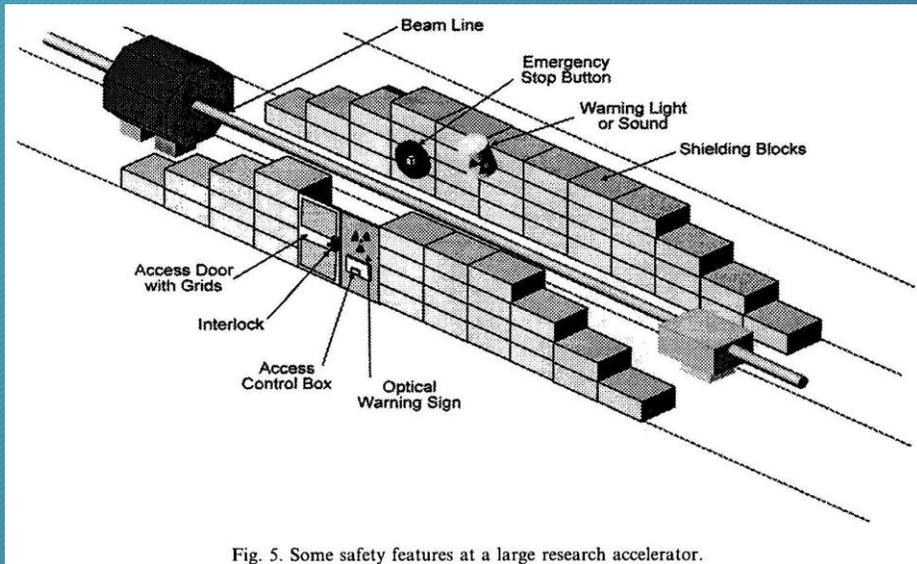


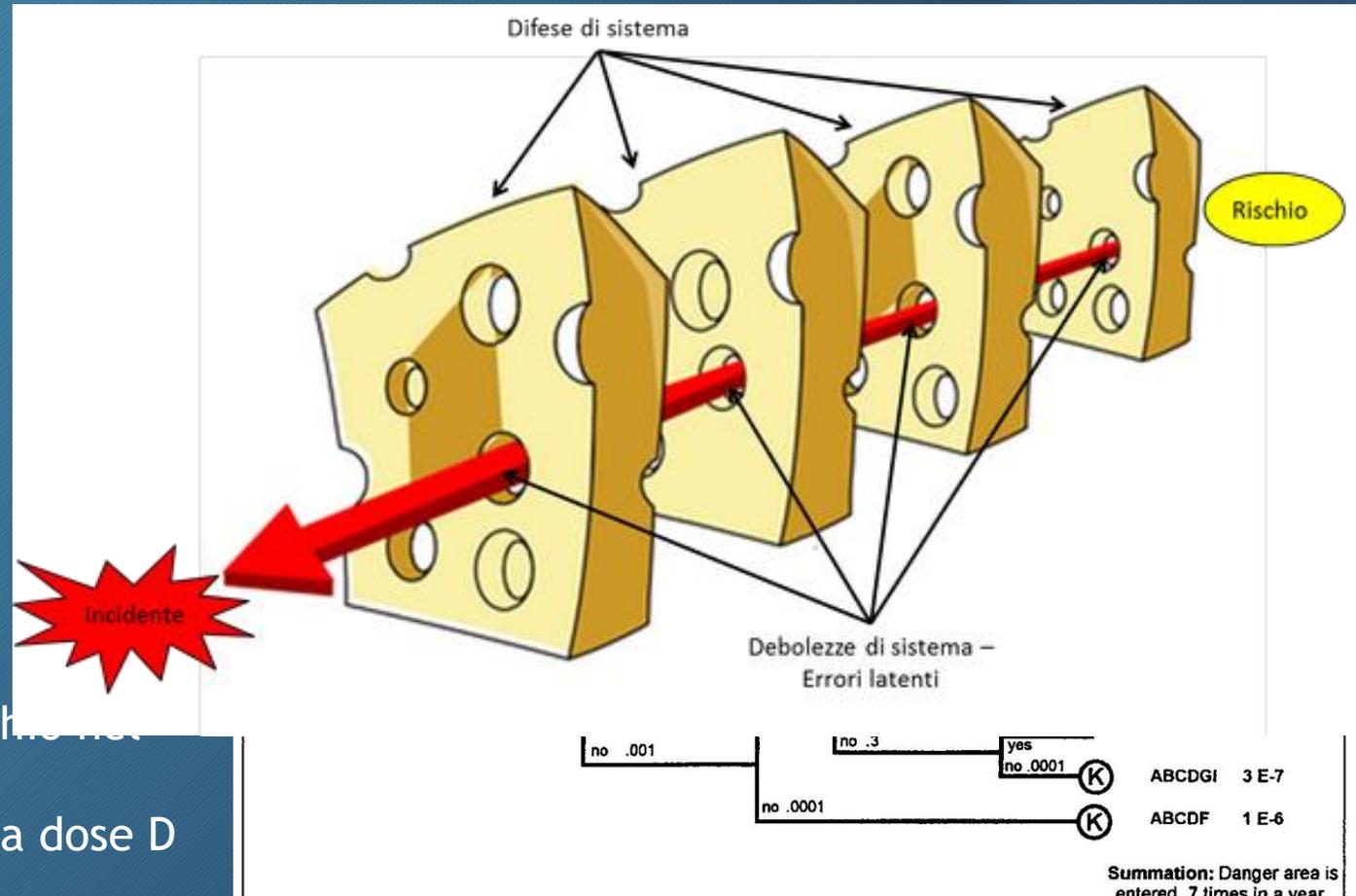
Fig. 5. Some safety features at a large research accelerator.

$$P(T) \cdot f(D) \leq R_0$$

P(T)=probabilità di avere uno o più accessi a rischio nel tempo T

f(D)=probabilità di morte per assorbimento di una dose D

R₀=rischio di riferimento=2·10⁻⁴≅5 mSv/anno



Bremsstrahlung ad alte energie

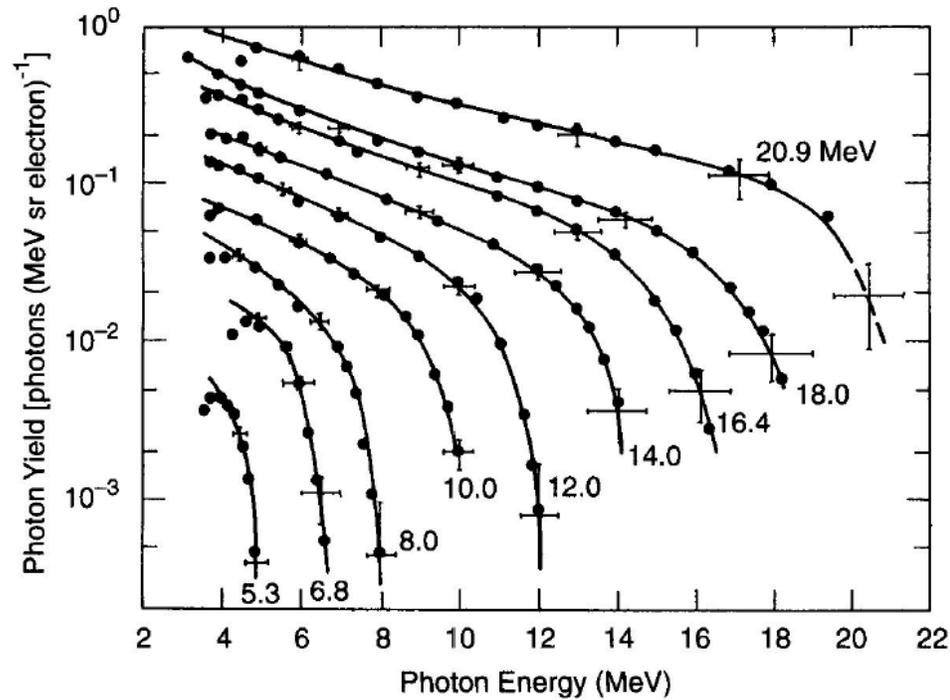


Fig. 3.7. Bremsstrahlung spectra measured at zero degrees from intermediate-thickness ($0.2 X_0$) targets of high- Z material. The data points are measurements of O'Dell *et al.* (1968) (adapted from IAEA, 1979a).

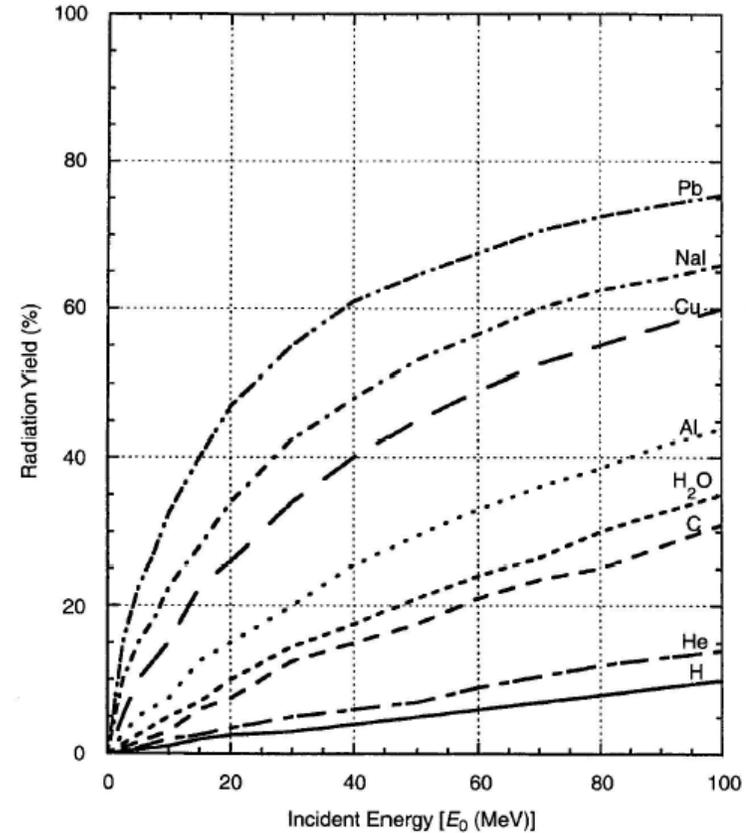


Fig. 3.3. Bremsstrahlung efficiency for electrons stopped in various materials. Fraction (in percent) of kinetic energy of incident electrons (E_0) converted to radiation, as a function of incident energy (E_0). The remainder is transferred to the medium by ionization and manifests itself ultimately as heat (adapted from IAEA, 1979a).

Produzione di muoni

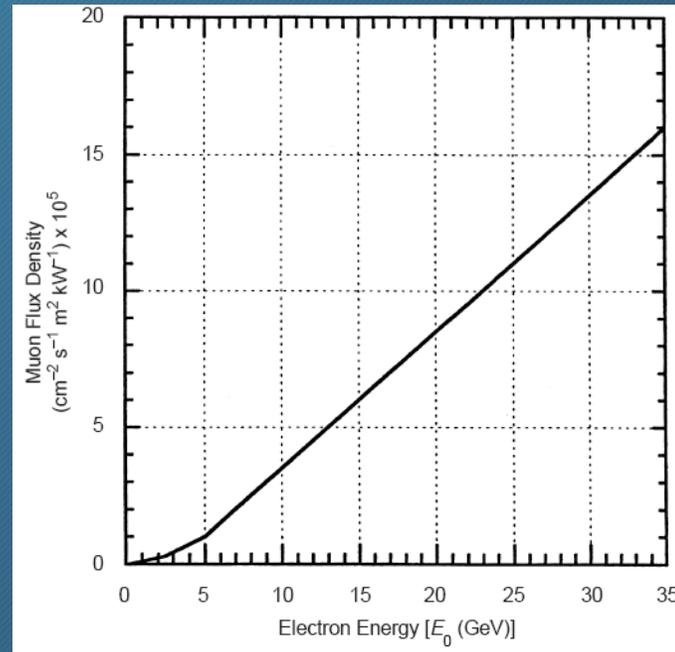
possibile per $h\nu \geq 211 \text{ MeV}$

altri meccanismi:

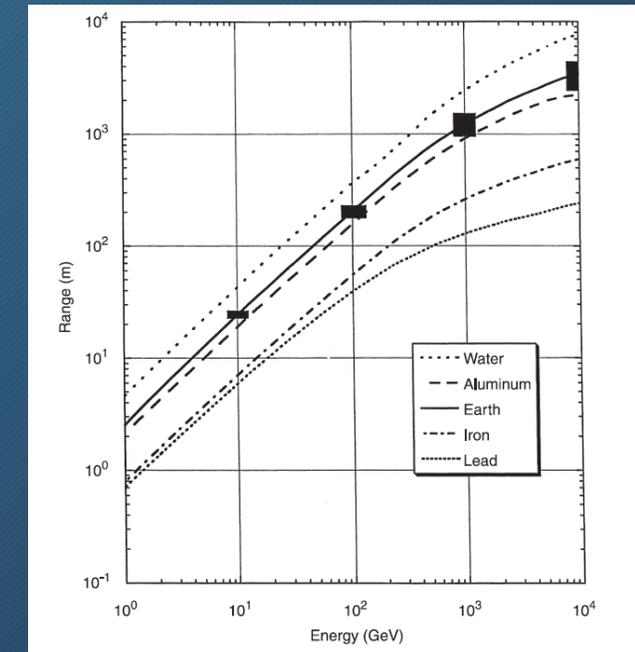
- decadimento π^\pm
- decadimento K^\pm

$$\frac{\sigma(e^-, e^+)}{\sigma(\mu^-, \mu^+)} \approx \frac{m_\mu}{m_e} \approx 4 \times 10^4$$

densità di flusso



range



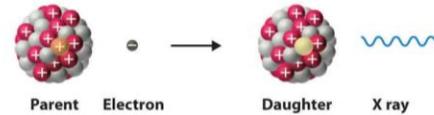
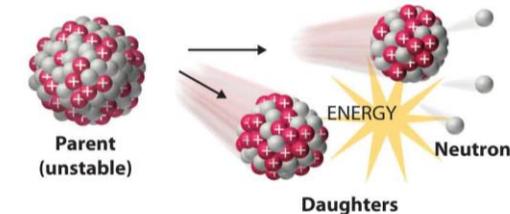
Radioattività

Radioattività=fenomeno che comporta la trasformazione di un nucleo (nuclide padre) in un altro (nuclide figlio) accompagnato dall'emissione di radiazioni ionizzanti.

La trasformazione può avvenire spontaneamente o a seguito del bombardamento con particelle altrimenti sarebbe stabile

radioattività naturale



Decay Type	Radiation Emitted	Generic Equation	Model
Electron capture	X rays	${}_Z^A X + {}_{-1}^0 e \rightarrow {}_{Z-1}^A X' + \text{X ray}$	
Gamma emission	${}_0^0 \gamma$	${}_Z^A X^* \xrightarrow{\text{Relaxation}} {}_Z^A X' + {}_0^0 \gamma$	
Spontaneous fission	Neutrons	${}_Z^{A+B+C} X \rightarrow {}_Z^A X' + {}_Y^B X' + {}_0^1 n$	

) oppure a seguito di un nucleo che

radioattività artificiale



il nuclide figlio non è stabile

il nuclide figlio non è stabile

Tempo di dimezzamento

Indichiamo con dN la variazione del numero di nuclidi padre nel tempo dt

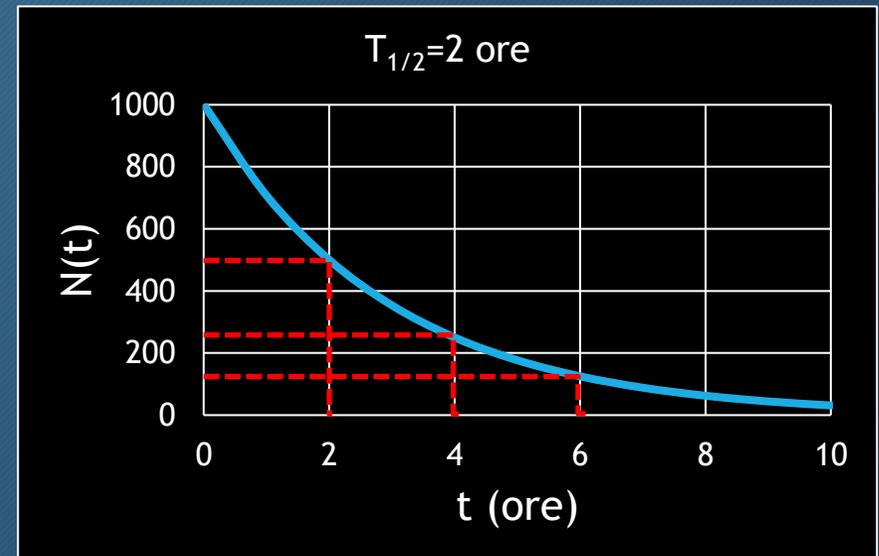
Risulta: $dN = -\lambda \cdot N \cdot dt \rightarrow N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$ $\lambda[s^{-1}]$ =costante di decadimento radioattivo

Il tempo $T_{1/2}$ in corrispondenza del quale il numero di nuclidi padre è la metà del numero iniziale viene detto tempo di dimezzamento:

$$\frac{1}{2} = \frac{N(T_{1/2})}{N(0)} = e^{-\lambda T_{1/2}} \rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

La legge del decadimento radioattivo può anche scriversi come:

$$N(t) = N(0)e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}}t}$$



Attività

Con il termine attività si indica il numero di decadimenti radioattivi che avvengono nell'unità di tempo:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N(0)e^{-\lambda t} = A(0) e^{-\lambda t}$$

Osserviamo che il tempo di dimezzamento è anche il tempo trascorso il quale l'attività si è dimezzata rispetto al valore iniziale.

L'unità di misura dell'attività è il bequerel (Bq), dove 1 Bq = 1 decadimento al secondo [Bq]=[s⁻¹]

Per motivi storici è ancora molto utilizzato il curie (Ci), dove:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

Attivazione neutronica - I

avviene principalmente per cattura di neutroni termici (0.025÷0.5 eV)

la sezione d'urto per attivazione σ_{act} esprime la probabilità che una certa sostanza sia attivata se assorbe un neutrone termico

al tempo t_{stop} in cui cessa l'irraggiamento l'attività del materiale (disintegrazioni s^{-1}) è:

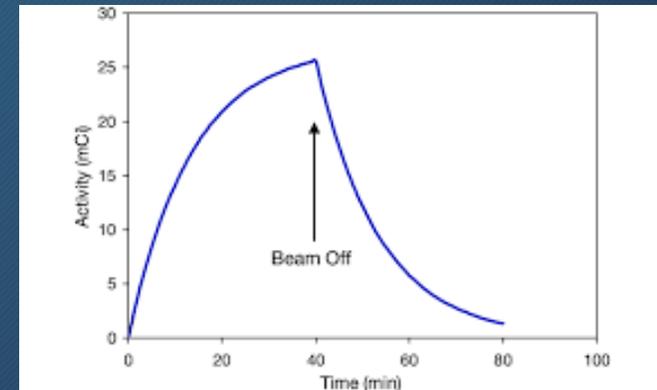
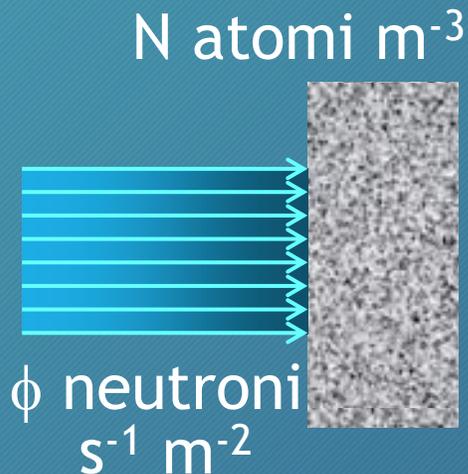
$$A_t = \phi \cdot \sigma_{act} \cdot N \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{stop}}) = A_s \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{stop}})$$

← costante di decadimento

↑ attività di saturazione

dopo un tempo t_1 dalla cessazione dell'irraggiamento l'attività è:

$$A = A_s \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t_{stop}}) \cdot e^{-\lambda \cdot t_1}$$



Attivazione neutronica - II

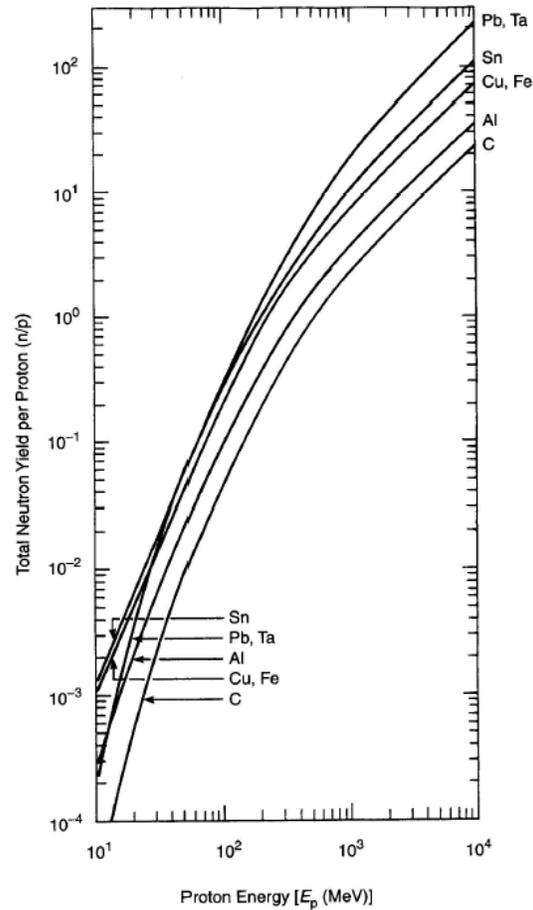


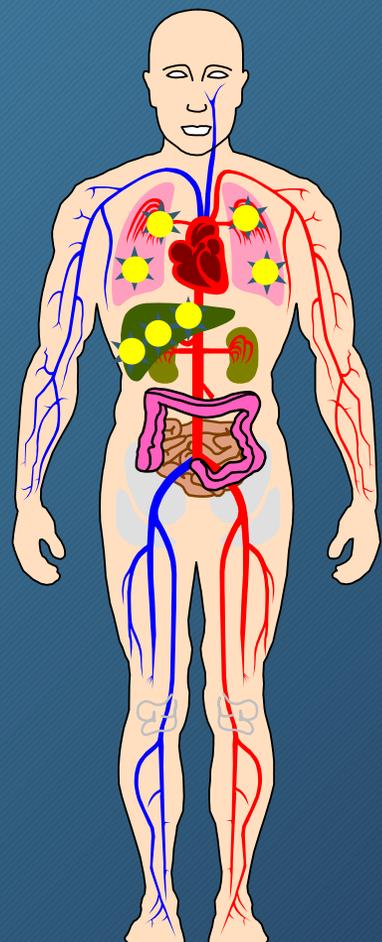
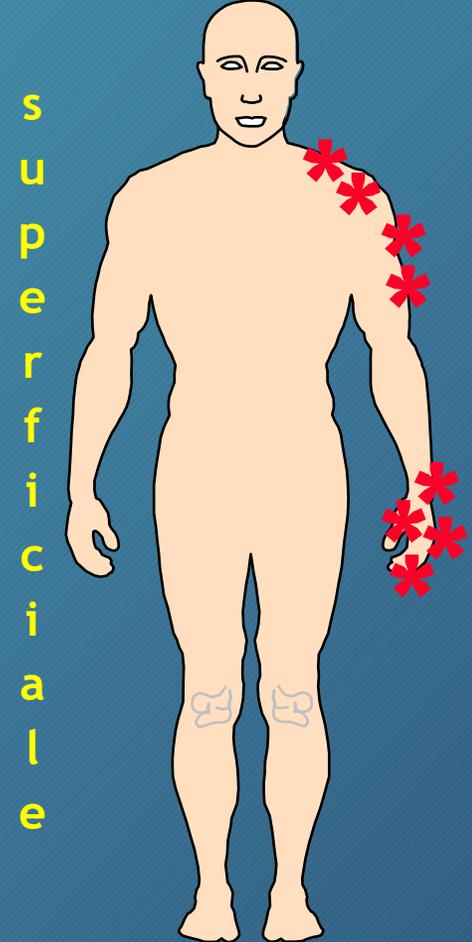
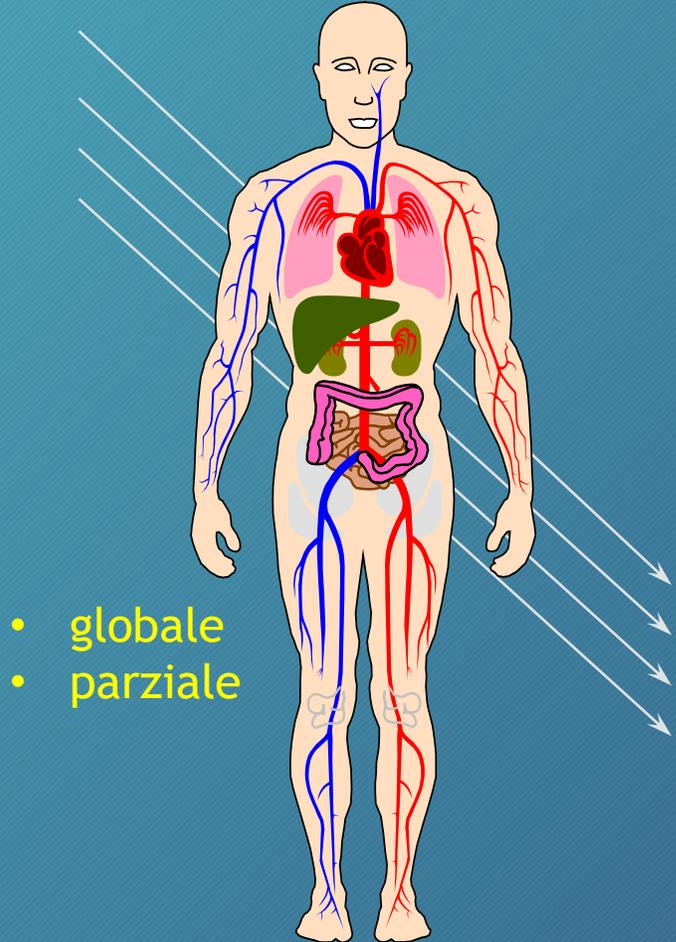
Fig. 3.21. Total neutron yield per proton for different target materials (Tesch, 1985).

TABLE 3.9—A summary of the radionuclides commonly identified in materials irradiated in radiation environments.

Irradiated Material	Radionuclides Produced	Half-Life
Water, plastics, oils	⁷ Be	53.3 d
	¹¹ C	20.3 min
Aluminum	All of those above plus:	
	¹⁸ F	110 min
	²² Na	2.60 y
	²⁴ Na	15.0 h
Steel	All of those above plus:	
	⁴² K	12.4 h
	⁴³ K	22.3 h
	⁴⁴ Sc	3.93 h
	^{44m} Sc	2.44 d
	⁴⁶ Sc	83.8 d
	⁴⁷ Sc	3.35 d
	⁴⁸ Sc	1.82 d
	⁴⁸ V	16.0 d
	⁵¹ Cr	27.7 d
	⁵² Mn	5.59 d
	^{52m} Mn	21.1 min
	⁵⁴ Mn	312 d
	⁵⁶ Co	77.3 d
	⁵⁷ Co	272 d
	⁵⁸ Co	70.9 d
	⁵⁶ Fe	2.73 y
⁵⁹ Fe	44.5 d	
Stainless steel	All of those above plus:	
	⁶⁰ Co	5.27 y
	⁵⁷ Ni	35.6 h
	⁶⁰ Cu	23.7 min
Copper	All of those above plus:	
	⁶⁰ Ni	2.52 h
	⁶¹ Cu	3.35 h
	⁶² Cu	9.74 min
	⁶⁴ Cu	12.7 h
	⁶³ Zn	38.5 min
⁶⁵ Zn	244 d	

Modalità di esposizione

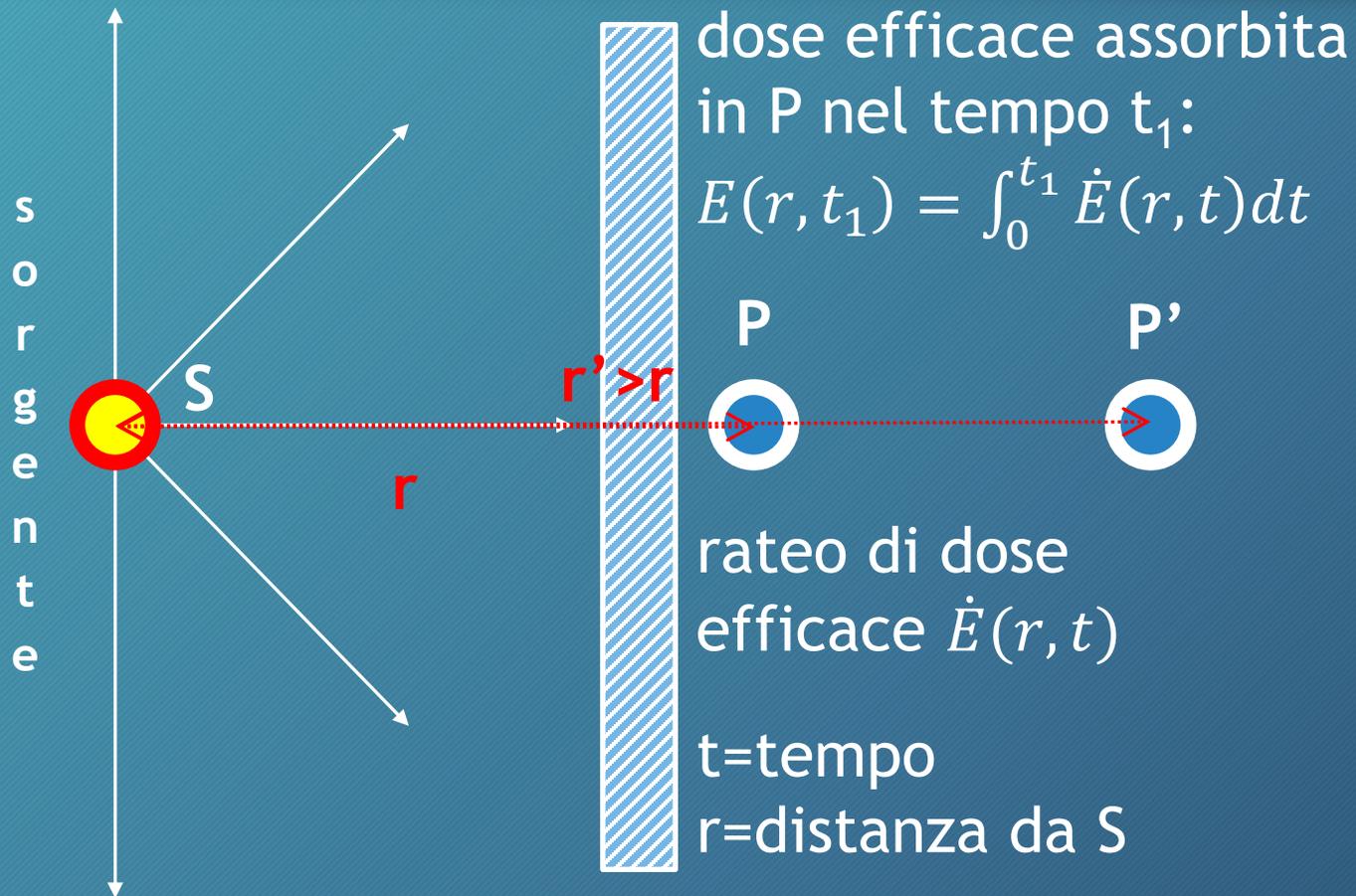
irraggiamento esterno contaminazione esterna ----> contaminazione interna



- per inalazione
- per ingestione
- per assorbimento transdermico
- attraverso ferite

irraggiamento interno

Modalità di protezione dall'irraggiamento esterno



riduzione del tempo di esposizione
 $t_2 < t_1 \rightarrow E(r, t_2) < E(r, t_1)$
addestramento

barriera protettiva (spessore s)

$$\dot{E}'(r, t) = T(s)\dot{E}(r, t) < \dot{E}(r, t)$$

$T(s) < 1$ = trasmissione barriera

allontanamento dalla sorgente

$$r' > r \rightarrow E(r', t) < E(r, t)$$

non sempre vero per campi di radiazione complessi

Attenuazione dei fotoni - I

probabilità di interazione

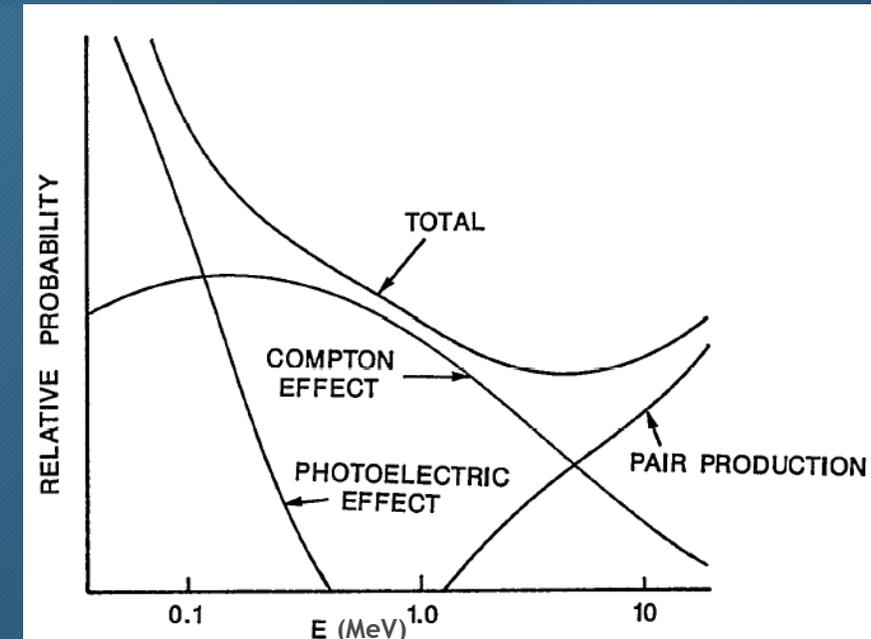
coefficiente di attenuazione lineare

$$\mu = \frac{\sigma_{tot} N_A \rho}{A} \text{ [m}^{-1}\text{]}$$

σ_{tot} = sezione d'urto totale
 N_A = numero d'Avogadro
 ρ = densità
 A = peso atomico

coefficiente di attenuazione massico

$$\frac{\mu}{\rho} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]} \quad \text{indipendente dalla densità del mezzo}$$

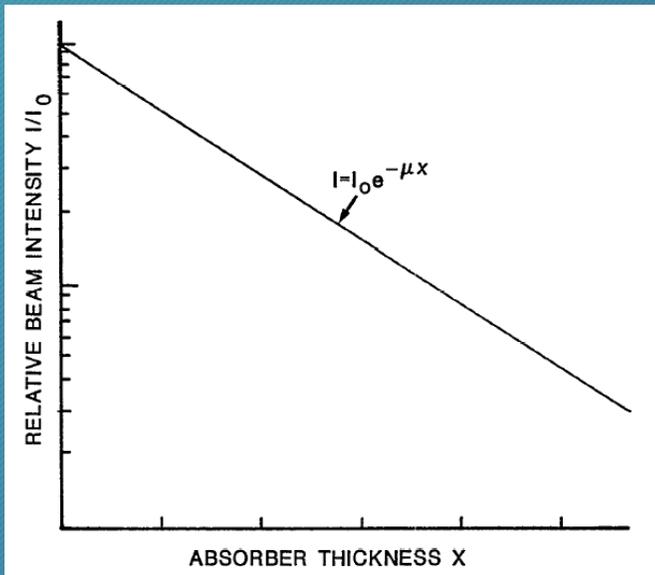


$$\mu = \tau + \sigma + \pi$$

effetto fotoelettrico scattering Compton creazione di coppie

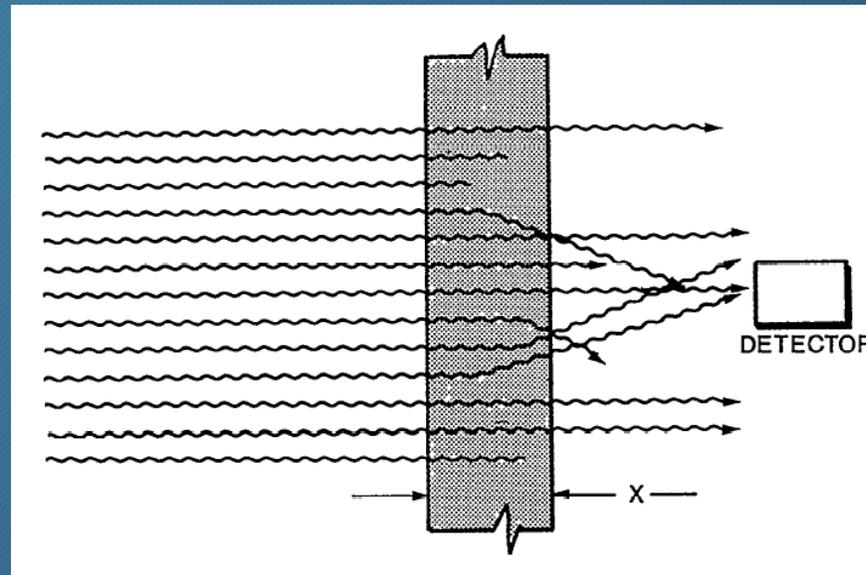
Attenuazione dei fotoni - II

buona geometria
(fascio sottile)



$$I(x) = I(0) \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

cattiva geometria
(fascio largo)



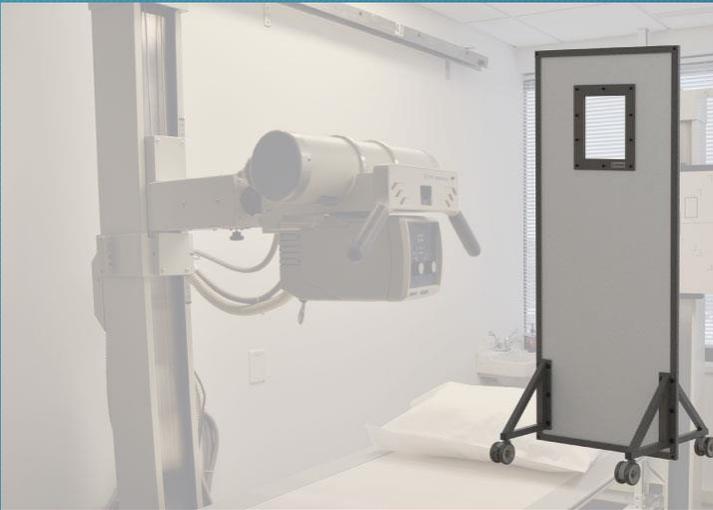
$$I(x) = I(0) \cdot B(\mu x) \cdot e^{-\mu x}$$

$B(\mu x) \geq 1$ = build-up factor

Attenuazione dei fotoni - III

raggi X

pochi mm di Pb



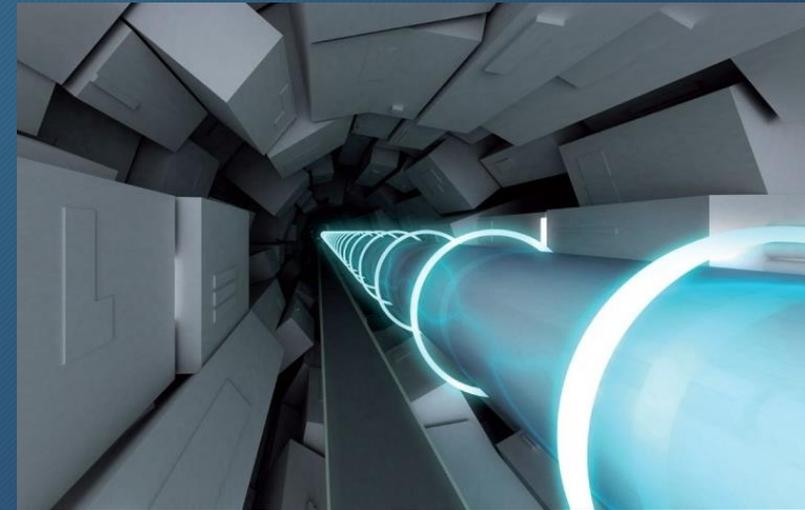
sorgenti radioattive

da qualche mm a
diversi cm di Pb



acceleratori

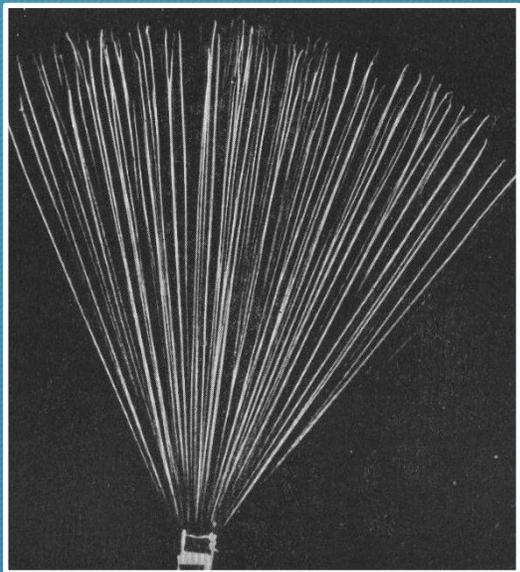
calcestruzzo
materiali speciali



Attenuazione di altre tipologie di radiazioni

particelle α

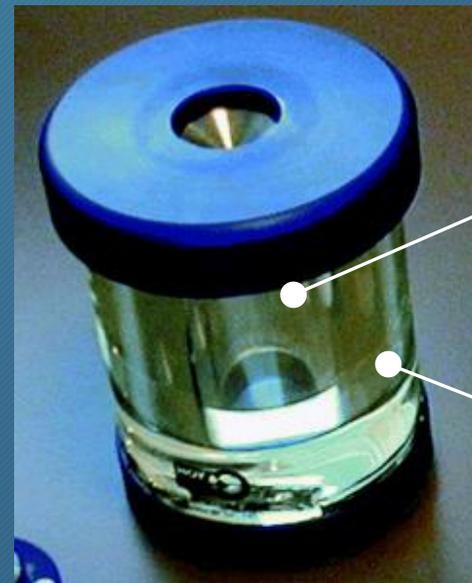
completamente
arrestate dopo
pochi mm in aria



elettroni e positroni

materiale a basso Z (Al, plastica) + Pb
per attenuare il bremsstrahlung residuo

contenitore
per sorgente
di $^{177}_{71}\text{Lu}$



interno:
perspex

esterno:
vetro
piombifero

neutroni

schermo composito

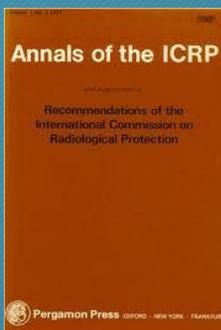
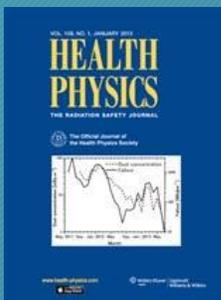
materiale a basso Z
(paraffina) per rallentare
i neutroni veloci
+
materiale borato
(polietilene, Al)
+
Pb per schermare i γ di
cattura

Genesi della legislazione di radioprotezione (RP)

Livello delle conoscenze

letteratura scientifica

organizzazioni scientifiche



europeo



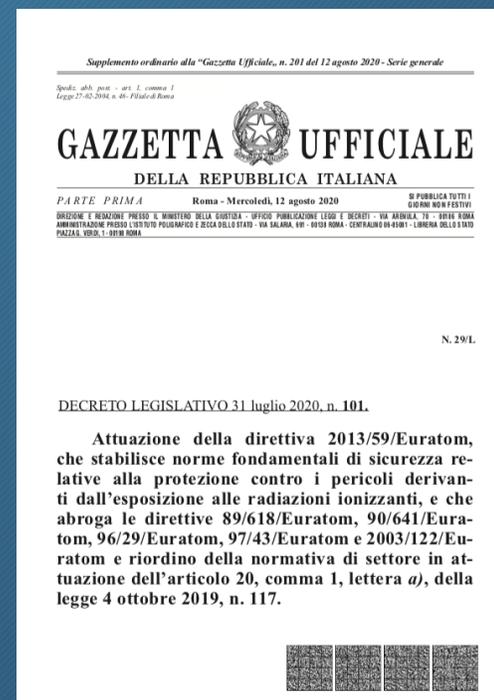
direttive Euratom



Livello politico

nazionale

regionale



Evoluzione della legislazione RP

RP lavoratori
e popolazione



RP esposizioni
mediche

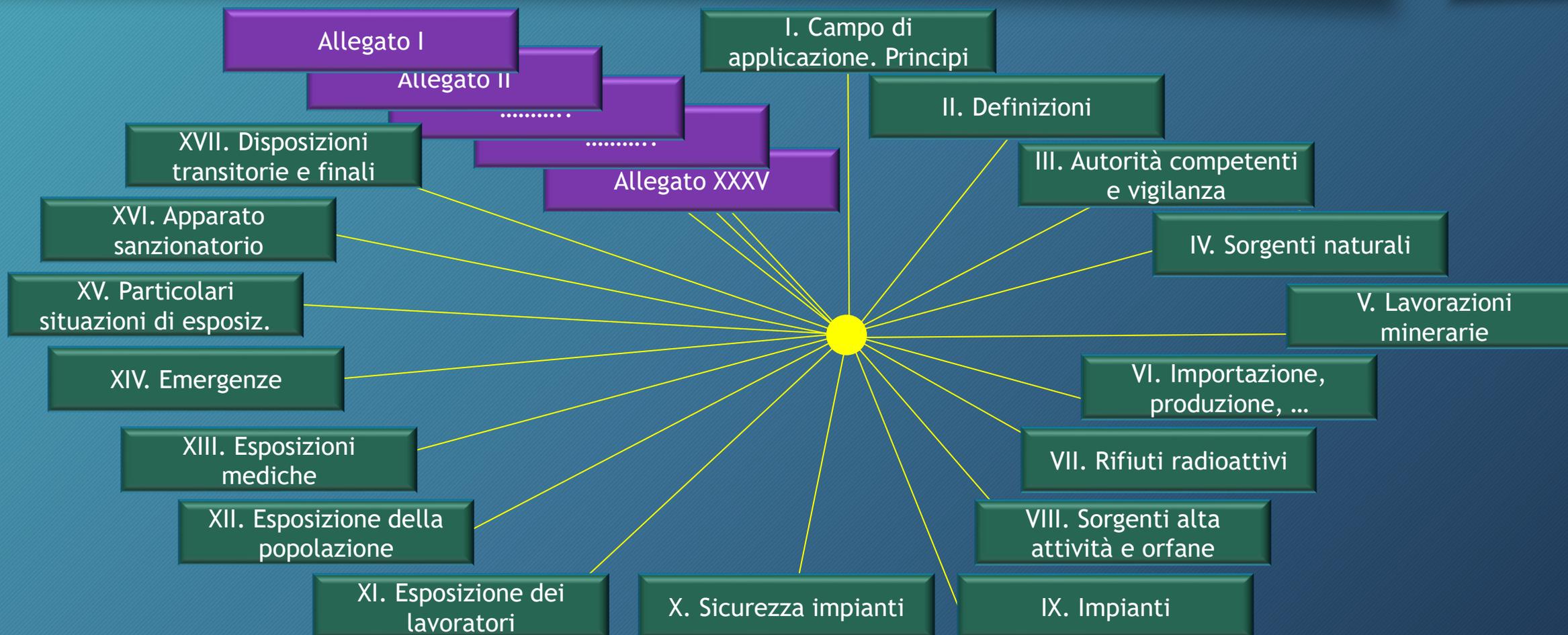
Il decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101

1 / 2

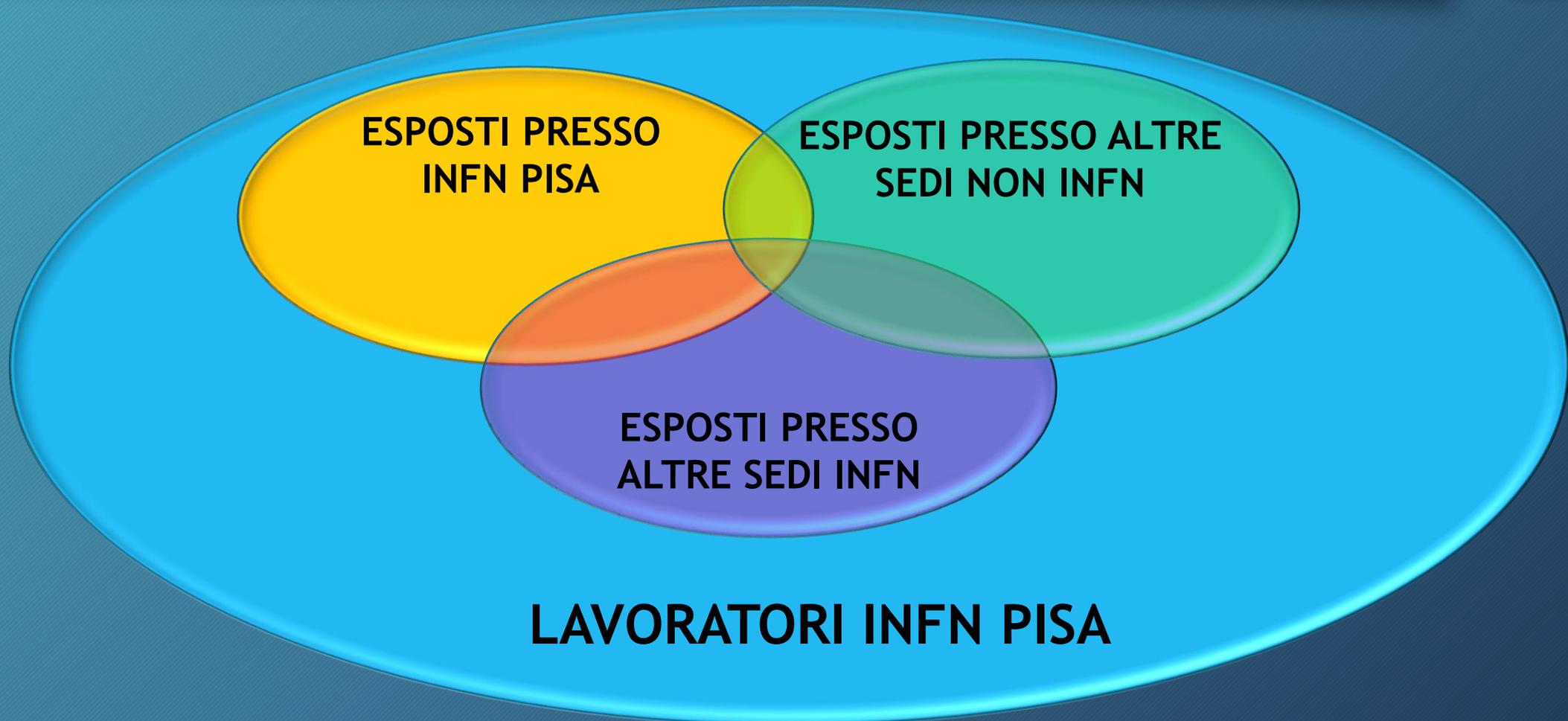
- Attua la direttiva 2013/59/Euratom
- Pubblicato nel supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 201 del 12 agosto 2020
- Entrato in vigore il 27 agosto 2020
- Alcuni adempimenti da espletarsi a 18 e 24 mesi dall'entrata in vigore
- Abroga D.Lgs. 230/95 e s.m.i., D.Lgs. 187/00 e D.Lgs. 52/07 nonché gli artt. 3÷5 della Legge 1860/62

Il decreto legislativo 31 luglio 2020, n. 101

2/2



Peculiarità delle esposizioni INFN Pisa



Qualche definizione utile (art. 7)

Pratica: un'attività umana che può aumentare l'esposizione di singole persone alle radiazioni provenienti da una sorgente di radiazioni ed è gestita come una situazione di esposizione pianificata

Esercente: persona fisica o giuridica che ha la responsabilità giuridica ai sensi della legislazione vigente ai fini dell'espletamento di una pratica o di una sorgente di radiazioni ⇒ Direttore INFN Pisa

Esperto di radioprotezione : persona, incaricata dal datore di lavoro o dall'esercente, che possiede le cognizioni, la formazione e l'esperienza necessarie per gli adempimenti di cui all'art. 130 [...]

Lavoratore esposto: qualunque lavoratore, anche autonomo, che è soggetto a un'esposizione sul lavoro derivate da pratiche [...] e che può ricevere dosi superiori a uno qualsiasi dei limiti di dose fissati per l'esposizione degli individui della popolazione

Lavoratore esterno: qualsiasi lavoratore esposto [...] che non è dipendente dell'esercente responsabile delle zone sorvegliate e controllate, ma svolge la sua attività in queste zone

Obblighi del datore di lavoro



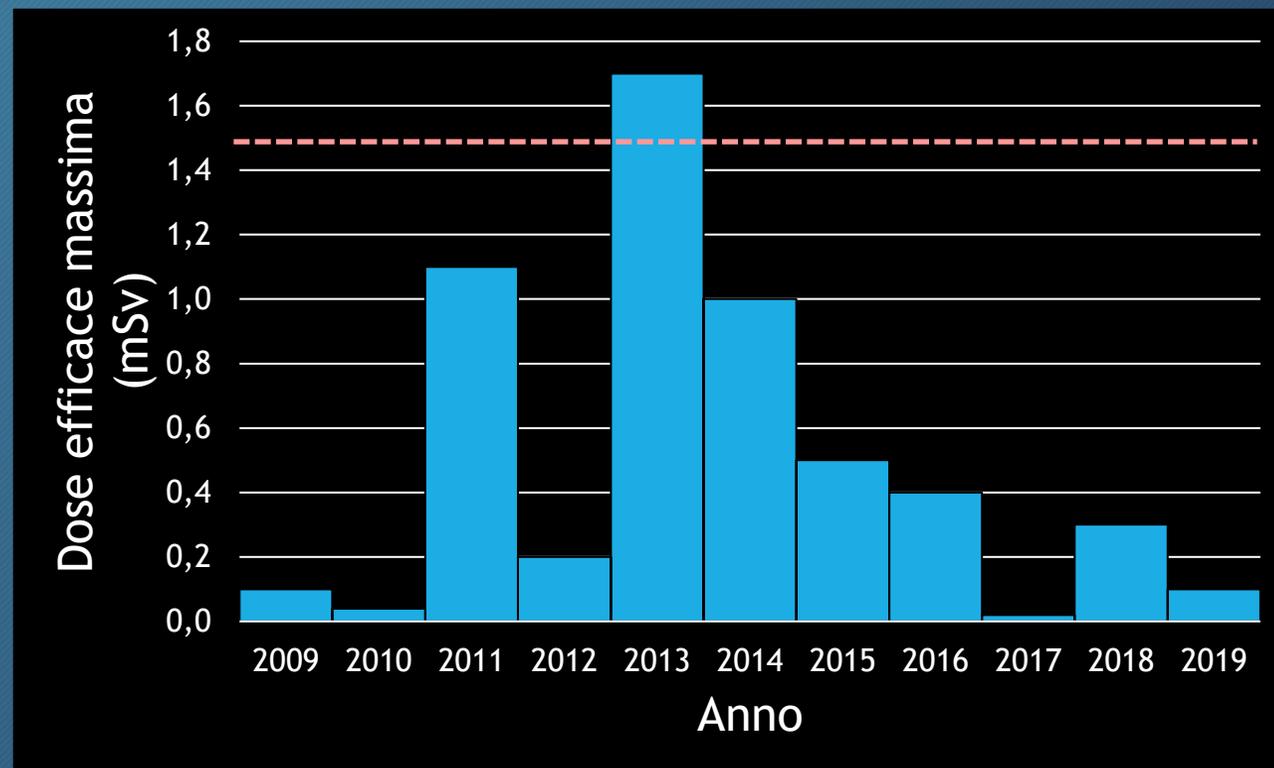
Vincolo di dose

Art. 7, c. 1, n. 159: vincolo fissato come margine superiore potenziale di una dose individuale, usato per definire la gamma di opzioni considerate nel processo di ottimizzazione per una data sorgente di radiazioni in una situazione di esposizione pianificata

Art. 122 Ottimizzazione della protezione (c. 2)

Per i lavoratori esterni di INFN Pisa è stato fissato il vincolo di dose di 1.5 mSv all'anno per esposizione globale (dose efficace)

Le statistiche di dose nel periodo 2009-2019 mostrano che tale valore è stato superato solo una volta nel 2013, anno dopo il quale il trend delle dosi assorbite ha assunto un carattere decrescente



Limiti di dose

valori in mSv/anno

POPOLAZIONE

VINCOLO $B \Rightarrow A$

LAVORATORI

Esposizione globale

1

1.5

6

20

Esposizione parziale
CRISTALLINO

15

20

Esposizione parziale
PELLE

50

150

500

Esposizione parziale
ESTREMITÀ

150

500

Principio di limitazione delle dosi (art. 1 c. 4 c)

Nelle situazioni di esposizione pianificata, la somma delle dosi cui è esposto un individuo non può superare i limiti fissati per l'esposizione professionale o del pubblico. Le esposizioni mediche non sono soggette a limitazione delle dosi.



lavoratore
limiti per i lavoratori esposti



membro della popolazione
limiti per la popolazione



paziente
nessun limite

Principio di giustificazione (art. 1 c. 4 a)

Gli atti giuridici che consentono lo svolgimento di una pratica garantiscono che il beneficio per i singoli individui e per la collettività sia prevalente rispetto al detrimento sanitario che esso potrebbe causare. Le determinazioni che introducono o modificano una via di esposizione e le determinazioni per le situazioni di esposizione esistenti e di emergenza devono apportare più benefici che svantaggi.

D.Lgs. 230/1995 e s.m.i.

$$\sum_i B_i > \sum_k D_k$$

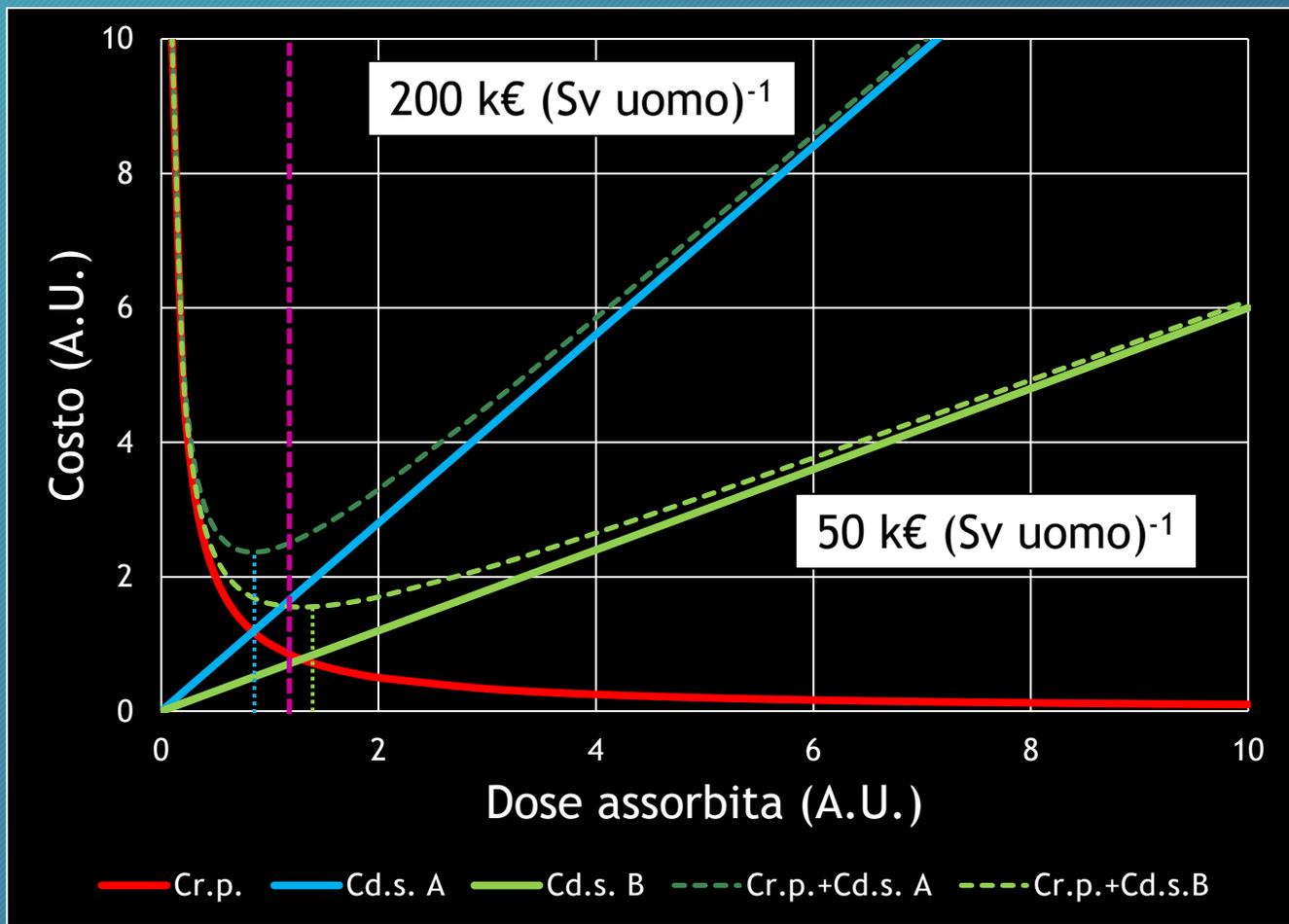
$$B_{economici} + B_{sociali} + B_{altri} > \\ > D_{radiologico} + D_{non\ radiologico} + D_{economico}$$

D.Lgs. 101/2020

$$\sum_i B_i > D_{sanitario}$$

$$B_{economici} + B_{sociali} + B_{altri} > D_{sanitario}$$

Principio di ottimizzazione (art. 1 c. 4 b)



La radioprotezione di individui soggetti a esposizione professionale e del pubblico è ottimizzata allo scopo di mantenere al minimo ragionevolmente ottenibile le dosi individuali, la probabilità di esposizione e il numero di individui esposti, tenendo conto dello stato delle conoscenze tecniche e dei fattori economici e sociali.

$$\partial(C_{rp} + C_{d.s.}) = 0$$

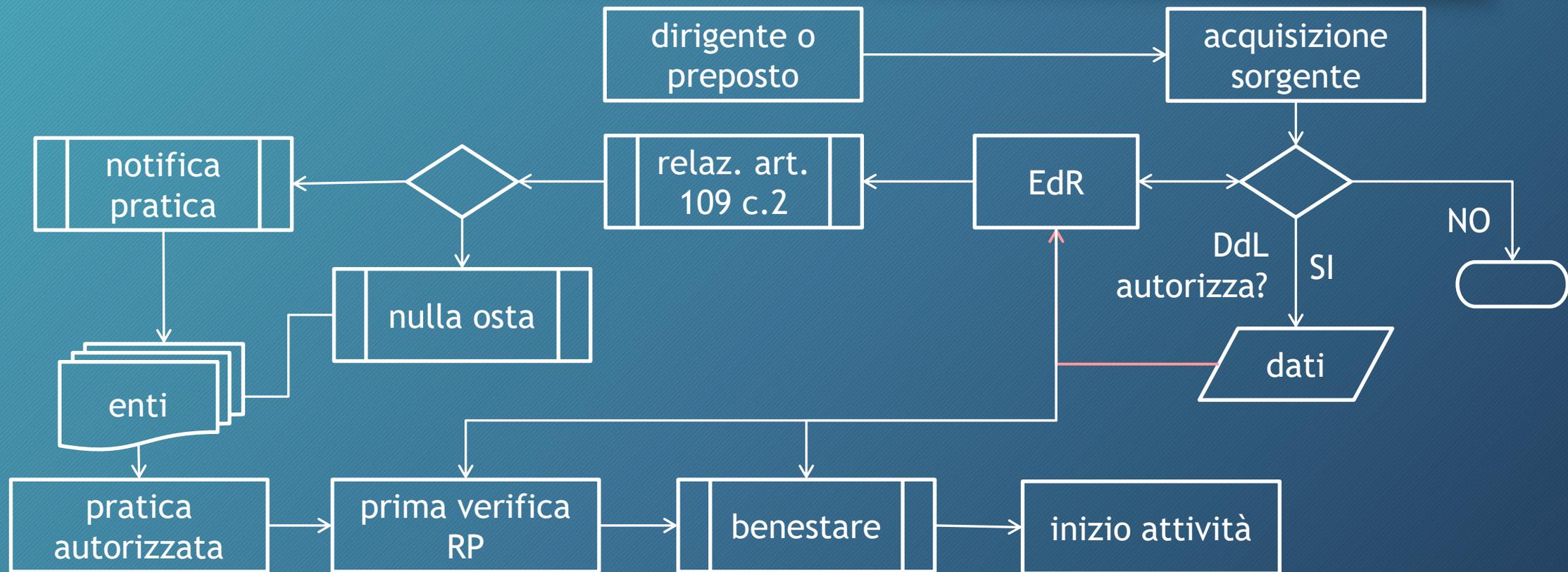
costo radioprotezione \Downarrow costo detrimento sanit.

modello LNT + variabilità $C_{d.s.} \Rightarrow$ minimo non univoco



vincolo di dose ---

Iter di radioprotezione: nuova sorgente radiogena



Zonizzazione del rischio: concetti generali

Zona controllata: ogni area di lavoro in cui sussiste per i lavoratori in essa operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei seguenti valori:

- 6 mSv/anno di dose efficace
- 15 mSv/anno di equivalente di dose al cristallino
- 150 mSv/anno di equivalente di dose per la pelle nonché per le estremità (mani, avambracci, piedi, caviglie)

Zona sorvegliata: ogni area di lavoro in cui sussiste per i lavoratori in essa operanti il rischio di superamento di uno qualsiasi dei limiti di dose fissati per la popolazione ma che non è zona controllata

- 1 mSv/anno di dose efficace
- 15 mSv/anno di equivalente di dose al cristallino
- 50 mSv/anno di equivalente di dose per la pelle



Valutazione del rischio in altre sedi

PSI

Different measures (shielding, safety interlock systems, etc.) guarantee the radiation protection of people at PSI, so that the expected doses for the researchers are below 1 mSv per year. People that have access to PSI radiation protection areas for more than 8 weeks per year (collectively) are considered exposed workers. For external users with a typical stay up to few weeks the expected individual doses are typically below 0.1 mSv. Measured doses above 0.1 mSv are rare and are individually investigated by the radiation protection personnel.

8 settimane/anno in zone classificate ⇒ lavoratore esposto

per la zonizzazione del rischio si utilizzano valori di rateo di dose anziché valori annui di dose

Zonage radioprotection		Exposition externe corps entier (à 30 cm et au-delà)	Exposition interne	Exposition extrémité (à 10 cm et en-deçà)	Exposition cristallin (à 30 cm et au-delà)	
Zone	Couleur	Valeurs opérationnelles pour le suivi du zonage radiologique résultant des limites de doses efficaces (1)		Valeurs opérationnelles pour le suivi du zonage radiologique résultant des limites de doses équivalentes		
Non Réglementée	Sans objet	0,5 µSv/h				
Surveillée	Gris Bleu	< 7,5 µSv/h	< 0,3 RCA	< 200 µSv/h	< 60 µSv/h	
Contrôlée	-	Verte	< 25 µSv/h	< 1 RCA	< 650 µSv/h	< 200 µSv/h
	Spécialement réglementée	Jaune	< 2 mSv/h	< 80 RCA	< 50 mSv/h	< 15 mSv/h
		Orange	< 100 mSv/h	< 4000 RCA	< 2500 mSv/h	< 750 mSv/h
Interdite	Rouge	≥ 100 mSv/h	≥ 4000 RCA	≥ 2500 mSv/h	≥ 750 mSv/h	

1) : Lorsque le risque d'exposition externe et le risque d'exposition interne coexistent, ils doivent être combinés pour vérifier la classification.

Grandezze dosimetriche operative

- sono misurabili a partire da grandezze di campo (kerma in aria, fluenza neutronica, ecc.)
- dosimetri personali e strumenti di radioprotezione possono essere tarati in termini di esse
- sovrastimano la dose efficace (non sempre vero nel caso dei neutroni)

dosimetria personale

equivalente di dose personale, $H_p(d)$ (d=profondità in mm)

$H_p(10)$

esposizione globale
(corpo intero)

$H_p(3)$

esposizione parziale
(cristallino)

$H_p(0.07)$

esposizione parziale
(pelle)

dosimetria ambientale

equivalente di dose
ambientale alla profondità
di 10 mm

$H^*(10)$

Esempio di record dosimetrico personale

Periodo	Cognome	Nome	$H_p(10)$ fotoni [mSv]	$H_p(10)$ neutroni [mSv]	$H_p(3)$ fotoni [mSv]	$H_p(0.07)$ fotoni [mSv]
1/1/2020 31/12/2020	Rossi	Mario	0.3	0.1	0.0	0.0
1/1/2020 31/12/2020	Verdi	Antonio	0.1	0.1	0.2	1.7

Esempio di misure ambientali

Data misure		27/07/2020
Strumento per radiazione gamma		Automess Scintomat 6134
Strumento per radiazione n		Berthold LB6411
Posizione	$\dot{H}^*(10)$ gamma [nSv/h]	$\dot{H}^*(10)$ n [nSv/h]
porta cassaforte aperta, a contatto	440	0
contenitore Am/Be senza paraffina	0	1000
a contatto schermatura sorgente Am/Be	0	2600
a contatto sorgente Am/Be	0	3000

Esempio di valutazione preventiva per ^{106}Ru

N. esposizioni/giorno	10
Durata esposizione	10 min
"	0,167h
Giorni/mese	22
Mesi/anno	2
Durata complessiva esposizione	7,333h
Rateo di dose gamma ipotizzato a 1 m	0,0331 (uSv/h)/MBq
Rateo di dose beta ipotizzato a 1 m	9,36 (uSv/h)/MBq
Attività sorgente	0,037MBq
Rateo di dose atteso a 1 m	0,35 uSv/h
Rateo di dose misurato a 1 m	0,12 uSv/h
Rateo di dose misurato a contatto contenitore	0,04 uSv/h

Carico di lavoro

Parametri sorgente

Durata trasporto sorgente in contenit.	1 min
"	0,0167h
Distanza corpo	0,5m
Dose corpo	0,00267 uSv
Durata estrazione e messa in opera	2 min
"	0,0333h
Distanza corpo	0,5m
Distanza mani	0,1m
Dose corpo	0,0463 uSv
Dose mani	1,158 uSv
Durata esposizione	7,333h
Distanza corpo	3m
Dose corpo	0,283 uSv
N. operazioni trasporto sorg.	88
Dose corpo	0,235 uSv
N. operaz. estraz. e messa in opera	88
Dose corpo	4,078 uSv
Dose mani	101,947 uSv
Dose totale corpo	4,596 uSv
Dose totale mani	101,947 uSv
Fattore occupazione gruppo di riferimento	0,2
Dose corpo gruppo riferimento	0,919 uSv
N. operazioni movimentaz./anno addetto	12
N. operaz. controllo sorg. /addetto	1
Dose corpo addetto sorg.	0,0783 uSv
Dose mani addetto sorg.	1,158 uSv

Stima dose per personale INFN

Stima dose per gruppo riferimento

Stima dose per addetto sorgenti

Procedure operative per sorgenti sigillate



NORME DI RADIOPROTEZIONE

Distanza da osservare durante la manipolazione: ≥ 50 cm

La sorgente deve essere manipolata con: **telepinze** di lunghezza ≥ 30 cm



Radionuclide ^{106}Ru	Matr. 2141-26 n. 60 (elenco interno)
Emissioni principali: gamma [512(21%), 622(10%), 1050(2%) keV], beta [39(100%), 2407(10%), 3541(79%) keV]	
Attività al 15/03/2020 37.15 kBq	$T_{1/2}$ 372.6 giorni

Accorgimenti generali per sorgenti sigillate

- In caso di non utilizzo, conservare la sorgente nel luogo (cassaforte, armadio, cassetto) a lei dedicato
- Il cartello con le caratteristiche della sorgente deve essere sempre posto in vicinanza della sorgente
- Durante il trasporto della sorgente, questa va sempre conservata all'interno del proprio contenitore schermato
- È sempre buona norma massimizzare la distanza della sorgente dal corpo e dalle estremità, anche mediante l'utilizzo di telepinze
- Non porre mai la sorgente e/o il suo contenitore vicino a fonti di calore o a contatto con esse
- Non porre mai la sorgente e/o il suo contenitore a contatto con sostanze chimiche
- Non sottoporre mai la sorgente e/o il suo contenitore a stress meccanici
- Non immergere mai la sorgente in un liquido a meno che non sia stata fatta una valutazione preventiva
- Non toccare mai la sorgente radioattiva direttamente con le mani o altre parti del corpo
- Avisare l'addetto alle sorgenti e l'esperto di radioprotezione ogniqualvolta si sospettino segni di deterioramento della sorgente e/o del suo contenitore schermato

Per ulteriori informazioni

Alessandro Tofani

Cell. 3473666318

E-mail *alessandro.tofani@gmail.com*

Stanza 255 1° piano edificio C - Polo Fibonacci

Per approfondire

<http://www.nukeworker.com/study/hp/moe/>

Environment, Safety, and Health Division
Operational Health Physics Training
by H. J. Moe
E. J. Vallario
DOE Project Manager

ANL-88-26
Corrected

Received October 30 1988

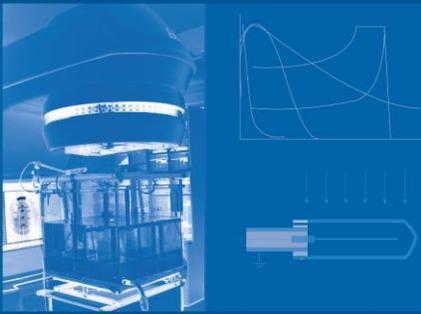
Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439
operated by The University of Chicago
for the United States Department of Energy under Contract W-31-109-Eng-38

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT

R. F. Laitano

Fondamenti di dosimetria delle radiazioni ionizzanti

4ª edizione



ENEA
Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

THE PHYSICS OF RADIATION PROTECTION



B. Dörsche
V. Schurich
J. Steuer

Nuclear Technology Publications

Maurizio Pelliccioni

Fondamenti fisici della radioprotezione



Pitagora Editrice Bologna

NCRP REPORT No. 144

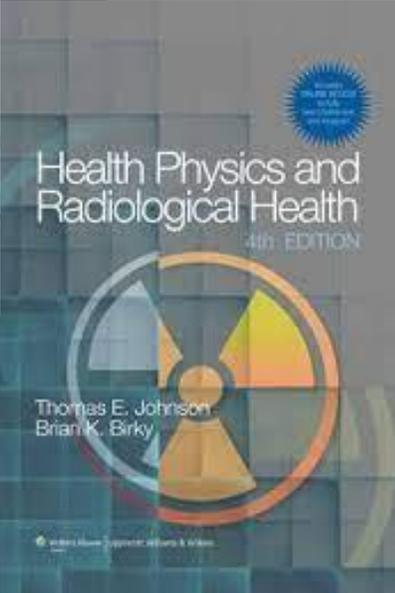
RADIATION PROTECTION FOR PARTICLE ACCELERATOR FACILITIES

INCI

Council on Radiation Protection and Measurement

Health Physics and Radiological Health

4th EDITION

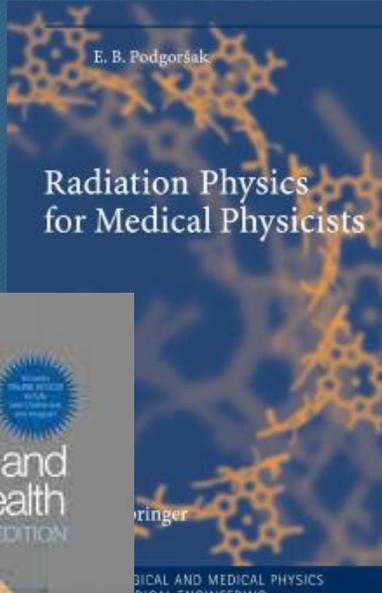


Thomas E. Johnson
Brian K. Birky

Springer

E. B. Podgoršak

Radiation Physics for Medical Physicists



Springer

BIOLOGICAL AND MEDICAL PHYSICS
MEDICAL ENGINEERING