

Dosimetria delle radiazioni ionizzanti

Misura quantitativa della radiazione ionizzante per stabilire relazioni tra radiazione ed effetti:

- fisici
- chimici
- **biologici**

sul mezzo irradiato.

Grandezza principale:

$$\text{Dose Fisica} = \frac{\text{ENERGIA ASSORBITA}}{\text{MASSA IRRADIATA}}$$

In genere

Grandezza dosimetrica = grandezza di campo x coefficiente di interazione

Sorgenti di radiazione

Tubi a raggi X, acceleratori, materiale radioattivo sono caratterizzati dall'intensità delle particelle cariche o neutre che emettono.

➤ Radiazioni direttamente ionizzanti

particelle cariche che interagiscono con atomi e molecole con forze di natura elettrica intense e variabili nel tempo producendo ionizzazione e/o eccitazione
 e^- , e^+ , p , α , ioni

➤ Radiazioni indirettamente ionizzanti

rilasciano elettroni, nuclei di rinculo ed altre particelle cariche che, a loro volta ionizzano

Raggi X, γ , n

RASSEGNA DEI PROGRESSI DELLA RADIOTERAPIA

50 % dei pazienti vengono trattati mediante radioterapia

18 % dei pazienti sono guariti mediante radioterapia sia da sola (12 %) che
in combinazione (6 %)

DATA	PROCESSO	ENERGIA [MeV]
TERAPIA CON RAGGI-X		
1905	Tubo a Raggi-X	0.05 - 0.2
1947	Van de Graaff	3
1948	Betrone	20
1935	Linac	6 - 20
TERAPIA CON RAGGI-GAMMA		
1910	Aghi di radio	1-3
1951	Teleterapia con cobalto 60	2
	Cesio 137	0.66
	Iridio 192	0.3
TERAPIA CON ELETTRONI		
1947	Van de Graaff	3
1948	Betrone	20
1963	Linac	6 - 20
	Iodio 131	0.19
TERAPIA CON NEUTRONI		
1969	Ciclotrone	30
1975	Acceleratore di deuterio e trizio	14
1968	Californio 252	
TERAPIA CON PROTONI		
	Ciclotrone [e sincrotrone]	60 - 250
NUOVE TERAPIE IN FASE DI SVILUPPO:		
TERAPIA PER CATTURA NEUTRONICA NEL BORO		
TERAPIA CON IONI LEGGERI		
		5000 - 10000

Grandezze di campo

Caratterizzano la sorgente le distribuzioni in energia , direzione e tempo per le particelle emesse.

Fluenza di particelle: $\Phi = \frac{dN}{da} \quad [m^{-2}]$

- dN: numero di particelle incidenti su una sfera infinitesima di sezione massima da da con centro nel punto di misura
- la radiazione e' perpendicolare a da e da e' orientata in tutte le possibili direzioni
- in campi non uniformi Φ varia da punto a punto
- N e' una variabile stocastica
- dN e' il differenziale del numero atteso di particelle

Intensita' o **rateo di fluenza** di particelle (densita' di flusso):

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d^2N}{dadt} \quad [m^{-2}s^{-1}]$$

Grandezze di campo

Considerando l'energia trasportata dalla particelle si definisce:

Fluenza di energia delle particelle: $\Psi = \frac{dR}{da}$ [J m⁻²]

- dR: energia incidente su una sfera infinitesima...
- energia radiante, somma di tutte le energie meno quella di riposo di tutte le particelle che incidono...

Intensita' (o densita') di fluenza di energia:

$$\varphi = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d^2R}{dadt} \quad [W m^{-2}]$$

Grandezze di campo

Per particelle che si propagano in una direzione fissata entro un angolo solido $d\Omega$ (i.e. provenienti da una sorgente di posizione nota e misurate con un rivelatore che accetta radiazione in un angolo solido definito)

radianza di particelle:
$$p = \frac{d\phi}{d\Omega} = \frac{d^3N}{dadtd\Omega} \quad [m^{-2}s^{-1}sr^{-1}]$$

radianza di energia:
$$r = \frac{d\psi}{d\Omega} = \frac{d^3R}{dadtd\Omega} \quad [W m^{-2}sr^{-1}]$$

Intensita' (o rateo) di fluenza di energia che si propaga in una direzione fissata entro un angolo solido $d\Omega$

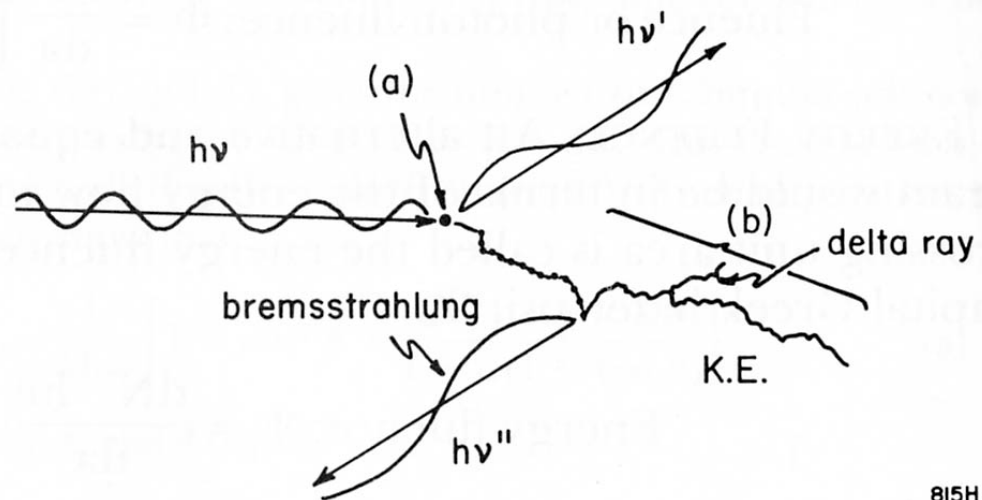
Kerma e Dose

Kerma (Kinetic Energy Released in the Medium): $K = \frac{d\bar{E}_{tr}}{dm}$ [J kg⁻¹]

$d\bar{E}_{tr}$ e' l'energia cinetica trasferita dai fotoni agli elettroni in un elemento di volume di massa dm .

Per un fascio di fotoni di energia $h\nu$: $K = \Phi \left(\frac{\mu_{att}}{\rho} \right) \bar{E}_{tr} = \Psi \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)$

\bar{E}_{tr} e' l'energia media trasferita agli elettroni nelle interazioni



Kerma: energia trasferita **ad** (a)
Dose assorbita: energia trasferita
lungo (b)

Kerma

Per un fascio di spettro energetico $d\Phi(h\nu)/d h\nu$:

$$K = \int_0^{h\nu_{\max}} \frac{d\Phi(h\nu)}{d h\nu} \left(\frac{\mu_{\text{att}}}{\rho} \right) \bar{E}_{\text{tr}}(h\nu) d h\nu$$

Esempio: un fascio di fotoni di 10.0 MeV con fluensa $10^{14}/\text{m}^2$ incide su un piccolo blocco di carbonio. Si calcoli il Kerma.

$$\mu_{\text{att}}/\rho = 0.00196 \text{ m}^2/\text{kg}, \quad E_{\text{tr}} = 7.30 \text{ MeV}$$

$$K = \frac{10^{14}}{\text{m}^2} \times 0.00196 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \times 7.30 \text{ MeV} = 1.43 \times 10^{12} \frac{\text{MeV}}{\text{kg}} =$$

$$1.43 \times 10^{12} \frac{\text{MeV}}{\text{kg}} \times 1.602 \times 10^{-13} \frac{\text{J}}{\text{MeV}} = .229 \text{ J/kg}$$

Il Kerma e' facile da calcolare ma difficile da misurare!

TABLE A-4b RADIOLOGICAL PROPERTIES OF CARBON

Z=6		$\rho = 2250 \text{ kg/m}^3$		$3.008 \times 10^{26} \text{ elect./kg}$ $5.014 \times 10^{25} \text{ atom/kg}$		A=12.011		
Photon energy	Basic Coefficients in				Interaction coef. in		Av. energy transferred or absorbed	Stopping power \bar{S}
$h\nu$	$(10^{-24} \frac{\text{cm}^2}{\text{atom}})$ or $(10^{-28} \frac{\text{m}^2}{\text{atom}})$				$[\text{cm}^2/\text{g}]$ (To get $[\text{m}^2/\text{kg}]$ divide by 10)		\bar{E}_{tr} \bar{E}_{ab}	in $\frac{\text{MeV cm}^2}{\text{g}}$
[keV]	σ_{coh}	σ_{inc}	τ	κ	$(\frac{\mu}{\rho})$	$(\frac{\mu_{tr}}{\rho})$	$(\frac{\mu_{ab}}{\rho})$	\bar{S}^*
	coh.	incoh.	photo	pair				
1	21.57	.2525	43820.		2198.	2197.	1.00	
1.5	19.21	.5016	14130.		709.4	708.5	1.50	93.4
2	16.69	.7730	6107.		307.1	306.2	1.99	82.6
3	12.30	1.283	1793.		90.58	89.89	2.98	68.2
4	9.243	1.690	731.7		37.23	36.68	3.94	58.3
5	7.218	1.990	360.3		18.53	18.07	4.88	51.1
6	5.857	2.208	200.4		10.45	10.05	5.77	45.7
8	4.204	2.503	78.54		4.274	3.940	7.38	37.9
10	3.247	2.704	37.66		2.187	1.891	8.65	32.6
15	1.958	3.023	9.770		.7396	.4945	10.0	24.8
20	1.294	3.192	3.725		.4117	.1930	9.38	20.2
30	.6719	3.307	.9539		.2473	.0570	6.91	16.1
40	.4082	3.300	.3634		.2041	.0297	5.83	16.0
50	.2735	3.252	.1725		.1854	.0222	5.99	17.9
60	.1957	3.188	.0941		.1744	.0200	6.89	20.2
80	.1139	3.054	.0365		.1607	.0200	9.98	21.1
100	.0742	2.924	.0176		.1512	.0213	14.1	18.5
150	.0336	2.647	.0048		.1346	.0245	27.3	12.4
200	.0190	2.431	.0020		.1229	.0266	43.2	8.95
300	.0085	2.117	.0006		.1066	.0287	80.8	5.86
400	.0048	1.899	.0002		.0954	.0295	124.	4.53
500	.0031	1.734	.0001		.0871	.0297	171.	3.78
550	.0025	1.665	.0001		.0836	.0297	195.	3.53
662	.0018	1.535	.0001		.0771	.0294	253.	3.11
800	.0012	1.410			.0708	.0289	327.	2.78
[MeV]								
1	.0008	1.268			.0636	.0280	.440	2.49
1.25	.0005	1.134	.0001		.0569	.0268	.588	2.27
1.5	.0003	1.031	.0016		.0518	.0256	.742 .739	2.13
2	.0002	.8795	.0064		.0444	.0236	1.06 1.06	1.97
3	.0001	.6919	.0186		.0356	.0206	1.74 1.73	1.84
4		.5772	.0308		.0305	.0187 .0185	2.46 2.43	1.78
5		.4984	.0419		.0271	.0174 .0171	3.21 3.16	1.75
6		.4405	.0502		.0246	.0163 .0160	3.98 3.91	1.74
8		.3604	.0670		.0214	.0150 .0146	5.60 5.45	1.72
10		.3069	.0840		.0196	.0143 ✓ .0138	7.30 7.06	1.72
15		.2272	.1094		.0169	.0132 .0125	11.7 11.1	1.72
20		.1823	.1321		.0158	.0129 .0121	16.4 15.3	1.73
30		.1327	.1609		.0147	.0128 .0115	26.0 23.5	1.74
40		.1055	.1798		.0143	.0128 .0112	35.8 31.3	1.76
50		.0880	.1962		.0143	.0130 .0111	45.7 38.8	1.77
60		.0759	.2069		.0142	.0132 .0109	55.7 46.0	1.78
80		.0598	.2251		.0143	.0135 .0106	75.6 59.4	1.79
100		.0497	.2404		.0145	.0139 .0104	95.6 71.7	1.81

Tavola E_{tr}

*Av. Stopping Power in $[\text{MeV cm}^2 \text{g}^{-1}]$ for the spectrum of electrons produced in the medium by photons of energy $h\nu$

Dose assorbita

E' la grandezza dosimetrica di interesse radioterapico e radioprotezionistico. Tiene conto dell'energia effettivamente **impartita** al mezzo.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}_{ab}}{dm} \quad [\text{gray, Gy}]$$

dm dev'essere piccolo abbastanza per poter definire la dose in un punto, ma non cosi' piccolo che le fluttuazioni statistiche diventino rilevanti.

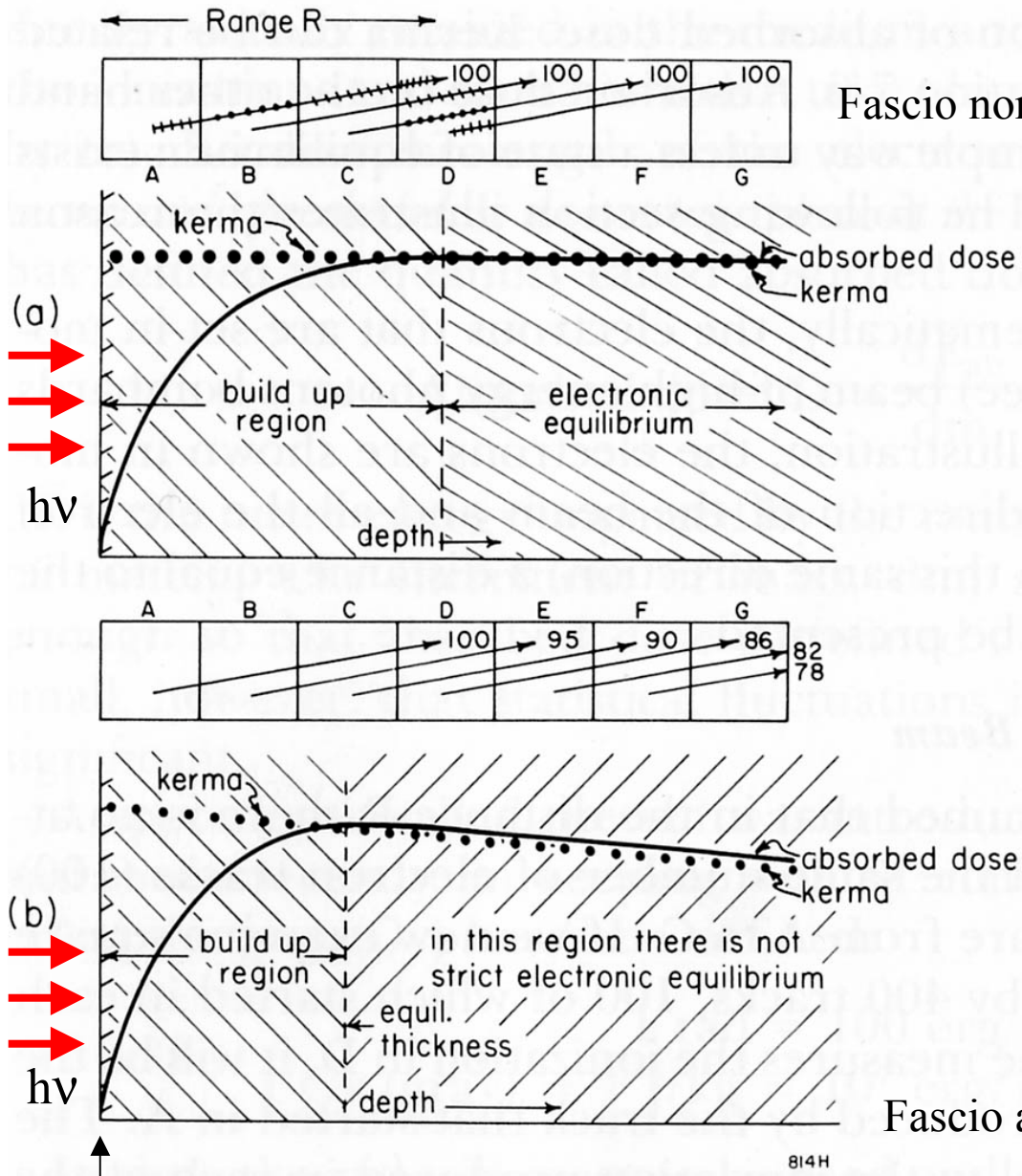
$$D = \lim_{m \rightarrow 0} \frac{\bar{\epsilon}_{ab}}{m} \quad [\text{gray, Gy}] \quad [\text{rad, } 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}]$$

Rateo di dose assorbita:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad [\text{Gy s}^{-1}]$$

La dose e' riferita ad una sostanza!

Equilibrio elettronico



Si ha equilibrio elettronico se la ionizzazione nel volume di interesse prodotta dagli elettroni generati nel mezzo circostante e' uguale alla ionizzazione prodotta nel mezzo da elettroni provenienti dal volume di interesse.

Allora:

$$D = K \quad (\text{se non ci sono perdite radiative})$$

Fascio attenuato

Esempi di equilibrio elettronico approssimato

fascio di fotoni in aria, $E \sim 1$ MeV: elevato λ , basso Range e^- secondari
 fascio di fotoni in acqua $E < 0.5$ MeV (vedi tavola)

fascio di α

NON equilibrio: in vicinanza di una sorgente ($1/r^2$), all'interfaccia tra due mezzi

TABLE 7-1
 Attenuation of Photons in Distance Equal to Range of Electrons in Water

(1) Photon Energy MeV	(2) Max. Electron Energy MeV	(3) Range R, in Water of Electrons with Energies given in Column 2 g/cm ²	(4) Total Attenuation Coeff. in Water cm ² /g	(5) Percent Attenuation in Range R	(6) Range in Air of Electrons with Energies given in Column 2 (cm)
0.1	0.1	.014	.1706	.24	13
0.2	0.2	.045	.1370	.62	42
0.5	0.4	.128	.0969	1.2	120
1.0	0.8	.329	.0707	2.3	308
2	1.8	.865	.0494	4.3	970
<u>3</u>	<u>2.8</u>	<u>1.40</u>	<u>.0397</u>	<u>5.7</u>	<u>1500</u>
5	4.76	2.40	.0303	7.3	
10	9.8	4.82	.0222	11.	
20	19.7	9.10	.0182	18.	
50	49.7	19.6	.0167	39.	
100	99.7	32.5	.0172	75.	

Energia impartita vs energia trasferita

Energia impartita: $\varepsilon = R_{\text{in}} - R_{\text{out}} + \Sigma Q \rightarrow \text{Dose } D$

- R_{in} energia incidente nel volume considerato: somma delle energie (escluse quelle di quiete) di tutte le particelle dir. ed indir. ionizzanti che entrano nel volume considerato
- R_{out} energia uscente
- ΣQ somma di tutte le energie liberate – la somma di tutte le energie consumate in trasformazioni di nuclei e particelle elementari ovvero energia spesa ad aumentare la massa del sistema
- ε grandezza stocastica di cui si prende la media

Energia trasferita: $\varepsilon_{\text{tr}} = (R_{\text{in}})_{\text{n}} - (R_{\text{out}})_{\text{n}}^{\text{non-r}} + \Sigma Q \rightarrow \text{Kerma } K$

- $(R_{\text{in}})_{\text{u}}$ energia radiante delle particelle neutre che entra in V
- $(R_{\text{out}})_{\text{u}}^{\text{non-r}}$ energia radiante delle particelle neutre che lascia V (eccetto perdite per irraggiamento)

Energia netta trasferita

$$\varepsilon_{\text{tr}}^{\text{n}} = \varepsilon_{\text{tr}} - R_{\text{n}}^{\text{r}} \rightarrow \text{Kerma di collisione } K_{\text{C}}$$

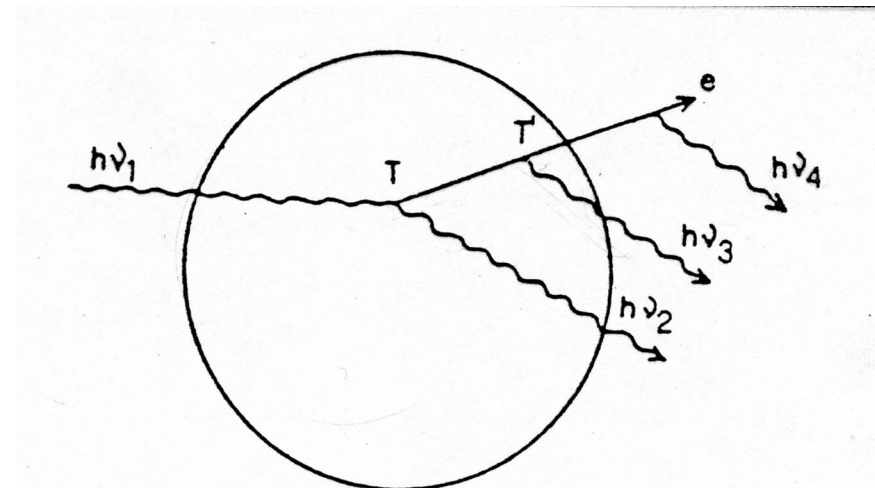
R_{n}^{r} energia radiante di irraggiamento emessa dalle particelle cariche originate in V, indipendentemente da dove e' avvenuto l'irraggiamento

$$\varepsilon = h\nu_1 - (h\nu_2 + h\nu_3 + T') + 0$$

$$\varepsilon_{\text{tr}} = h\nu_1 - h\nu_2 + 0 = T$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{tr}}^{\text{n}} &= h\nu_1 - h\nu_2 - (h\nu_2 + h\nu_3 + 0) \\ &= T - (h\nu_2 + h\nu_3) \end{aligned}$$

$\Sigma Q = 0$ (sarebbe $\neq 0$ se in V ci fosse una sorgente o se fosse prodotta una coppia e^+e^-)



diffusione Compton

eguita da Brehmstrahlung 14 14

Calcolo della dose

Fascio di fotoni:

In condizioni di equilibrio elettronico:

$$D = K_C = \frac{\mu_{en}}{\rho} \Psi$$

Teoria della cavita' di Bragg-Gray

Il solo metodo diretto di **misura** della dose e' quello calorimetrico, nella pratica vengono fatte misure basate sulla ionizzazione a cui si applicano fattori di correzione derivati dalla teoria di Bragg-Gray. **Elettroni prodotti nel mezzo circostante la cavita' (parete)** ionizzano il gas (aria) e la carica liberata viene misurata. Conoscendo il potenziale di ionizzazione:

$$W_{\text{aria}} = 33.85 \frac{\text{eV}}{\text{coppia di ioni}} = 33.85 \frac{\text{J}}{\text{coppia di ioni}}$$

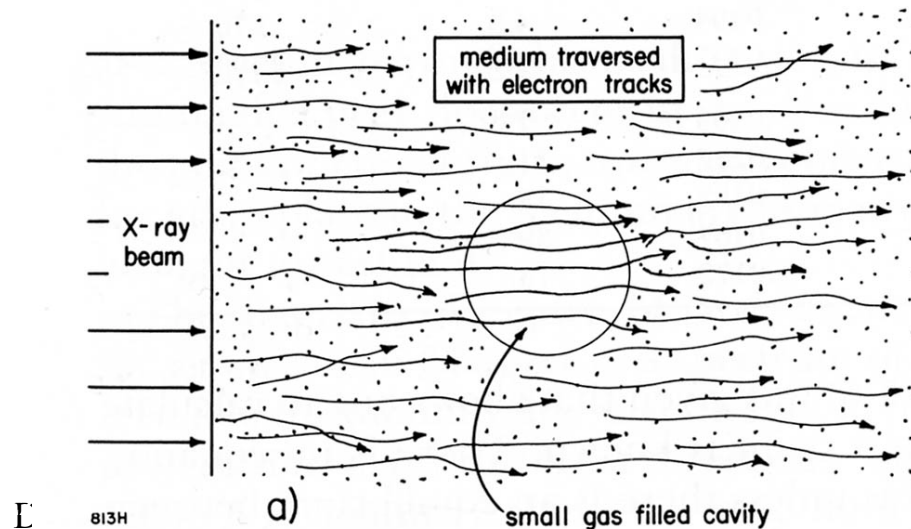
si arriva alla dose:

$$D_{\text{gas}} = \frac{Q}{m_{\text{gas}}} W \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}} \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{Gy} \right]$$

$$\rho_{\text{aria}} = 1.293 \text{ kg} / \text{m}^3$$

a STP (0°C, 101.3 kPa)

Medica 2002-03



Esempio cavita'

Una cavita' di volume 1 cm^3 , riempita d'aria a STP, e' esposta ad un campo di radiazione che libera $3.336 \times 10^{-10} \text{ C}$ in un dato tempo.

Si determini la dose all'aria.

$$m_{\text{gas}} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \times 1.293 \text{ kg/m}^3 = 1.293 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

$$D_{\text{aria}} = \frac{3.336 \times 10^{-10} \text{ C}}{1.293 \times 10^{-6} \text{ kg}} \times 33.85 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 0.873 \times 10^{-2} \frac{\text{J}}{\text{C}} = 0.873 \text{ Gy}$$

Dose alla parete

La grandezza di interesse e' la dose alla **parete** (wall). A partire dallo spettro energetico del fascio di fotoni si puo' determinare lo spettro degli elettroni secondari in un punto della parete, lo stesso che sara' visto anche dal gas nella cavita' (che e' piccola e non perturba il campo). Ho quindi:

$$\frac{D_{\text{wall}}}{D_{\text{gas}}} = \frac{\int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \left(\frac{d\Phi(E)}{dE} \right)_{\text{wall}} S_{\text{ion}}(E)^{\text{wall}} dE}{\int_{E_{\text{min}}}^{E_{\text{max}}} \left(\frac{d\Phi(E)}{dE} \right)_{\text{wall}} S_{\text{ion}}(E)^{\text{gas}} dE} = \frac{= \text{wall}}{= \text{gas}}$$

Il rapporto (rapporto medio dei poteri frenanti) e' calcolato mediando sullo spettro energetico dei fotoni e degli elettroni $\Phi(E)$ per campi di fotoni usati nella pratica radioterapica. E_{max} e' l'energia massima degli elettroni, $E_{\text{min}} = 1\text{keV}$, o meglio, la minima energia che deve avere l'elettrone per attraversare la cavita'.

Questa formula non tiene conto dei raggi δ (effetto $< 0.5\%$).

TABLE 7-2

Ratio of averaged stopping powers, $\bar{S}_{\text{air}}^{\text{med}}$ for a number of materials relative to air for a series of photon spectra. Data was calculated using equation 7-10. For comparison, $\bar{S}_{\text{water}}/\bar{S}_{\text{air}}$, determined using equation 6-45, is entered in the last column.

Spectrum Number*	Description	$\bar{S}_{\text{air}}^{\text{med}}$ for Various Media					$\frac{\bar{S}_{\text{water}}}{\bar{S}_{\text{air}}}$
		Carbon	Bakelite	Lucite	Poly-styrene	Water	
1	60 kV _p , HVL—1.6 mm Al	1.022	1.094	1.125	1.137	1.140	1.141
* 2	100 kV _p , HVL—2.8 mm Al	1.022	1.095	1.126	1.138	1.140	1.141
3	250 kV _p , HVL—2.6 mm Cu	1.021	1.090	1.121	1.132	1.139	1.139
4	270 kV _p primary only, 2.7 mm Cu	1.020	1.089	1.120	1.131	1.138	1.138
5	270 kV _p primary plus scatter	1.022	1.094	1.124	1.136	1.139	1.137
6	400 kV _p , HVL—4 mm Cu	1.019	1.086	1.116	1.127	1.138	1.137
7	Cs-137	1.015	1.075	1.104	1.112	1.133	1.132
8	Co-60, primary only	1.009	1.071	1.099	1.105	1.129	1.128
9	Co-60, primary plus scatter	1.011	1.073	1.101	1.109	1.131	1.129
10	6 MV, Linac	1.000	1.064	1.092	1.098	1.123	1.120
11	8 MV, Linac	.993	1.058	1.085	1.091	1.117	1.114
12	12 MV, Schiff spect.	.976	1.043	1.069	1.073	1.102	1.100
13	18 MV, Schiff spect.	.965	1.033	1.059	1.063	1.092	1.091
14	26 MV, Betatron	.960	1.028	1.053	1.057	1.086	1.083
15	26 MV, Linac	.968	1.035	1.061	1.065	1.094	1.092
16	35 MV, Schiff spect.	.946	1.015	1.039	1.043	1.073	1.073
17	45 MV, Schiff spect.	.940	1.009	1.034	1.037	1.068	1.068

*Spectra 1 and 2 are taken from Yaffe (Y1); 3 and 6 are from Johns, appendix B, (J9); 4 and 5 are taken from Skarsgard, Table 8-1 (S8); 7 is monoenergetic radiation at 0.662 MeV; 8 has two energies at 1.17 and 1.33 MeV; 9 is taken from Bruce, Fig. 13x (B4); 10 is from Bentley et al., Fig. 3, calculated thick target (B8); 11 is taken from Levy et al., Fig. 5 (L3); 12 and 13 are calculated thin target spectra filtered by 2 cm tungsten and 2 cm water; 14 is from Sherman et al. representing an Allis Chalmers betatron (S9); 15 is from Levy et al., Fig. 6, experimental spectrum for Saggittaire (L4); 16 and 17 are calculated thin target spectra plus 2.2 cm tungsten and 10 cm of water representing high energy betatrons.

Tavola $\bar{S}_{\text{wall}} = \bar{S}_{\text{gas}}$

Formula di Bragg-Gray

Possiamo infine calcolare la dose alla parete servendoci del $\bar{S}_{\text{gas}}^{\text{wall}}$ tabulato:

$$D_{\text{wall}} = \frac{Q}{m_{\text{gas}}} W \bar{S}_{\text{gas}}^{\text{wall}} \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}} \frac{\text{J}}{\text{C}} = \text{Gy} \right]$$

Esempio: In una cavita' di volume 1 cm³, riempita d'aria a STP, in blocco di carbonio, e' esposta ad un fascio di raggi gamma dal Co-60, viene generata una carica di 3 x 10⁸ C. Si trovi la dose assorbita dal carbonio.

$$M_{\text{gas}} = 10^{-6} \text{ m}^3 \times 1.293 \text{ kg/m}^3 = 1.293 \times 10^{-6} \text{ kg} \quad \bar{S}_{\text{gas}}^{\text{carbonio}} = 1.009$$

$$D_{\text{carbonio}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ C}}{1.293 \times 10^{-6} \text{ kg}} \times 33.85 \frac{\text{J}}{\text{C}} \times 1.009$$

$$= 0.792 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 0.792 \text{ Gy} = 79.2 \text{ rad}$$

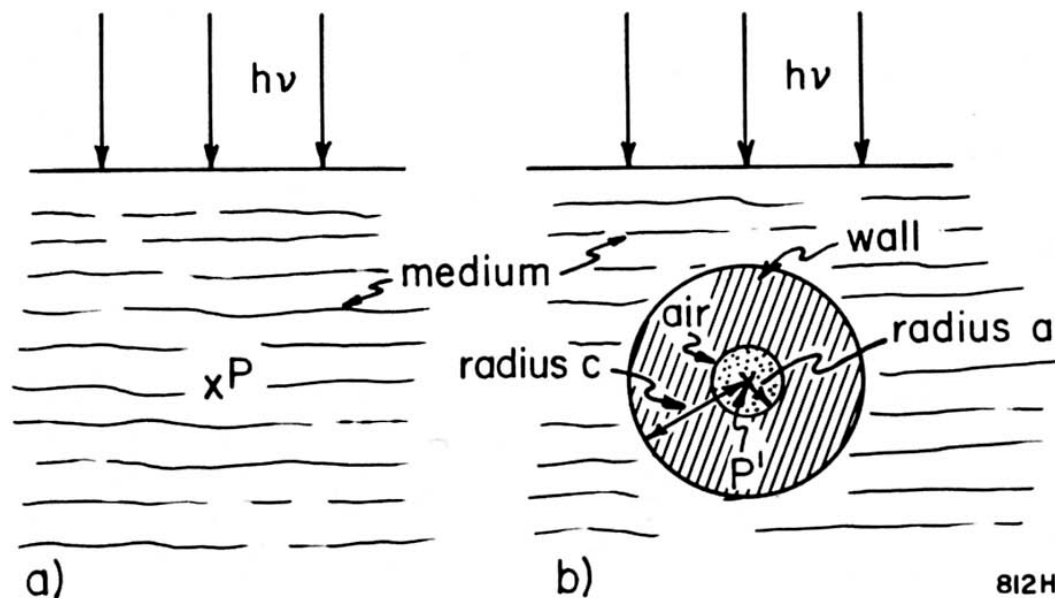
Determinazione della dose assorbita usando la camera a ionizzazione

Una camera a ionizzazione costruita con materiale noto di volume noto e' detta "assoluta". E' necessario raccogliere e misurare con precisione tutta la carica prodotta nella cavita' (difficile). Vediamo il principio.

Abbiamo **tre** materiali: gas, parete della cavita', mezzo in cui la camera e' immersa in cui vogliamo misurare la dose.

Il materiale della parete e' simile a quello del mezzo; la camera e' piccola e non perturba il campo di radiazione.

Figure 7-4. Determination of absorbed dose using an absolute ion chamber. (a) Homogeneous phantom: dose is to be determined at point P using the ion chamber illustrated in (b), which is centered at point P' identical in position to P. The chamber has a wall of outer radius c and inner radius a.



Determinazione della dose

Con buona approssimazione, se vi e' equilibrio elettronico,
(per Kerma di collisione):

$$\frac{D_{\text{wall}}}{D_{\text{gas}}} = \frac{K_{\text{med}}}{K_{\text{wall}}} = \frac{\int_{h\nu_{\text{min}}}^{h\nu_{\text{max}}} \left(\frac{d(h\nu)}{dh\nu} \right)_{\text{med}} \left(\frac{\mu_{\text{att}}(h\nu)}{\rho} \right)_{\text{med}} \bar{E}_{\text{ab}}^{\text{med}}(h\nu) dh\nu}{\int_{h\nu_{\text{min}}}^{h\nu_{\text{max}}} \left(\frac{d(h\nu)}{dh\nu} \right)_{\text{med}} \left(\frac{\mu_{\text{att}}(h\nu)}{\rho} \right)_{\text{wall}} \bar{E}_{\text{ab}}^{\text{wall}}(h\nu) dh\nu} = \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}(h\nu)}{\rho} \right)_{\text{wall}}^{\text{med}}$$

$\left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}(h\nu)}{\rho} \right)_{\text{wall}}^{\text{med}}$ viene calcolato per fasci e materiali diversi (vedi tavola) e si arriva (finalmente!) alla dose al mezzo misurata a partire dalla carica raccolta nella camera a ionizzazione:

Vale se:

$$D_{\text{med}} = \frac{Q}{m_{\text{gas}}} W \bar{S}_{\text{gas}}^{\text{wall}} \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}(h\nu)}{\rho} \right)_{\text{wall}}^{\text{med}}$$

- La cavita' e' piccola (campo indisturbato)
- Lo spessore della parete e \geq del percorso degli elettroni
- La parete e' fatta di materiale di numero atomico vicino a quello del mezzo (tessuto equivalente!)

Esempio di calcolo di dose con la camera a ionizzazione

Una camera a ionizzazione con una cavità di volume 1 cm^3 , è posta in un fantoccio ad acqua ed esposta ai raggi γ del Co-60 che libera una carica di $3 \times 10^{-8} \text{ C}$. Si determini la dose all'acqua. Si assuma che le pareti di carbonio abbiano uno spessore appena maggiore del range degli elettroni.

Come calcolato nell'esempio precedente, la dose alle pareti di carbonio è 0.792 Gy .

Dalla tavola vediamo che
$$\left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}(h\nu)}{\rho} \right)_{\text{wall}}^{\text{med}} = 1.111$$

La dose all'acqua è quindi: $D = 0.792 \text{ Gy} \times 1.111 = 0.890 \text{ Gy}$.

TABLE 7-4

Values of $\left(\frac{\bar{\mu}_{ab}}{\rho}\right)_{med}^{water}$ for Carbon, Bakelite, Lucite, and Polystyrene and $\left(\frac{\bar{\mu}_{ab}}{\rho}\right)_{air}^{med}$ for Water, Muscle, and Fat Determined Using Equation 7-12 for Photon Spectra Listed in Table 7-2.

(1) Photon Spectrum*	$\left(\frac{\bar{\mu}_{ab}}{\rho}\right)_{med}^{water}$				$\left(\frac{\bar{\mu}_{ab}}{\rho}\right)_{air}^{med}$			
	(2) Carbon	(3) Bakelite	(4) Lucite	(5) Polyst.	(6) Water	(7) Muscle	(8) Fat	(9) Bone
1. 60 kV _p	2.399	1.931	1.622	2.518	1.016	1.057	.617	4.873
2. 100 kV _p	2.112	1.758	1.519	2.152	1.026	1.062	.670	4.524
3. 250 kV _p	1.155	1.086	1.056	1.076	1.103	1.098	1.073	1.427
4. 270 kV _p	1.170	1.098	1.065	1.092	1.100	1.097	1.060	1.530
5. 270 kV _p	1.372	1.253	1.181	1.303	1.073	1.085	.924	2.668
6. 400 kV _p	1.129	1.065	1.040	1.050	1.108	1.101	1.095	1.217
7. ¹³⁷ Cs	1.111	1.051	1.029	1.032	1.112	1.102	1.112	1.064
8. ⁶⁰ Co	1.111	1.051	1.029	1.032	1.112	1.103	1.113	1.061
9. ⁶⁰ Co	1.116	1.055	1.032	1.037	1.111	1.102	1.107	1.105
10. 6 MV	1.112	1.053	1.030	1.035	1.111	1.101	1.109	1.066
11. 8 MV	1.114	1.055	1.032	1.038	1.109	1.098	1.104	1.067
12. 12 MV	1.120	1.062	1.039	1.049	1.101	1.090	1.087	1.078
13. 18 MV	1.125	1.068	1.044	1.059	1.095	1.083	1.073	1.087
14. 26 MV	1.129	1.073	1.049	1.067	1.089	1.078	1.061	1.094
15. 26 MV	1.124	1.068	1.044	1.058	1.095	1.084	1.074	1.085
16. 35 MV	1.135	1.081	1.056	1.080	1.081	1.069	1.043	1.102
17. 45 MV	1.137	1.085	1.059	1.085	1.077	1.065	1.035	1.106

*Spectra 1 and 2 are taken from Yaffe (Y1); 3 and 6 are from Johns, appendix B, (J9); 4 and 5 are taken from Skarsgard, Table 8-1 (S8); 7 is monoenergetic radiation at 0.662 MeV; 8 has two energies at 1.17 and 1.33 MeV; 9 is taken from Bruce, Fig. 13x (B4); 10 is from Bentley et al., Fig. 3, calculated thick target (B8); 11 is taken from Levy et al., Fig. 5 (L3); 12 and 13 are calculated thin target spectra filtered by 2 cm tungsten and 2 cm water; 14 is from Sherman et al. representing an Allis Chalmers betatron (S9); 15 is from Levy et al., Fig. 6, experimental spectrum for Saggittaire (L4); 16 and 17 are calculated thin target spectra plus 2.2 cm tungsten and 10 cm of water representing high energy betatrons.

Tavola

Esposizione

Grandezza storica con cui si misura la capacità della radiazione di fotoni di ionizzare l'aria:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad [\text{roentgen, R}]$$

dQ è il valore assoluto della carica totale degli ioni di un segno prodotti in aria quando tutti gli elettroni liberati da fotoni in un elemento di volume di aria sono completamente fermati in aria.

$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ ovvero $1 \text{ C/kg} = 3876 \text{ R}$
(storicamente $1 \text{ R} = 1 \text{ esu/cm}^3$ di aria a STP)

Si applica solo ai fotoni, rigorosamente si misura solo con la camera ad aria, libera, difficile da usare ad energie maggiori di 3 MeV, di interesse limitato in radioterapia, usata in radiologia.

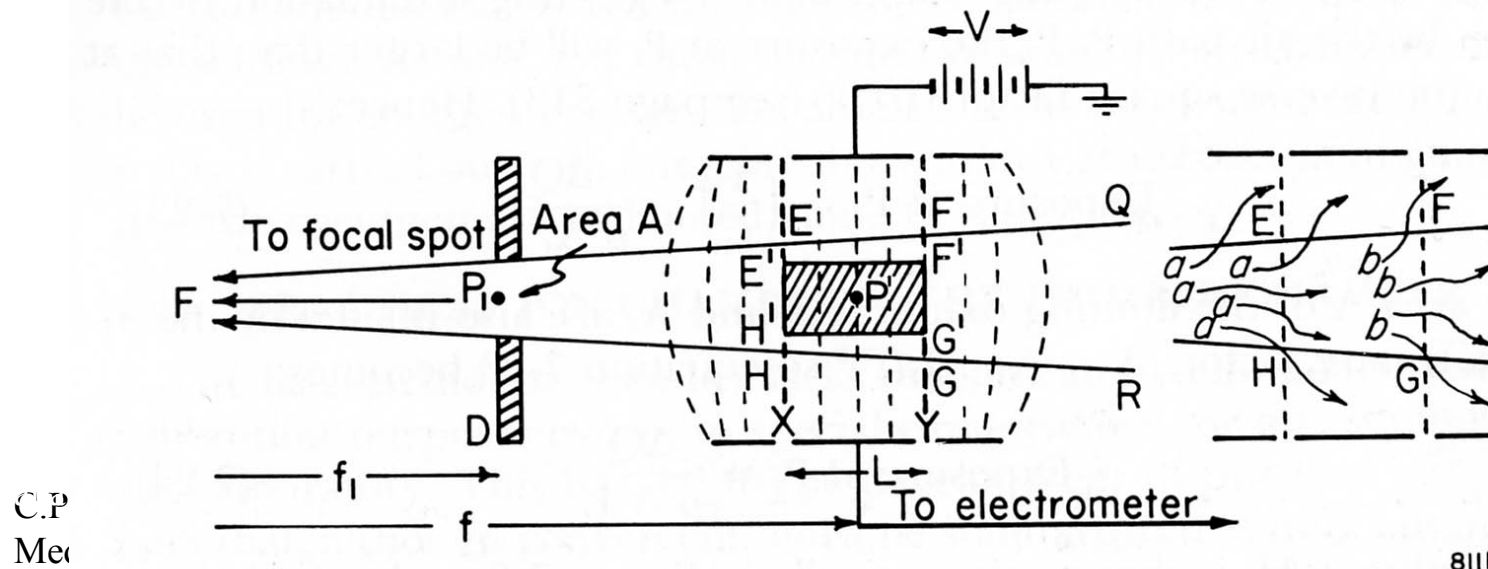
La camera ad aria libera

Se il volume EFGH dista dagli elettrodi piu' del range massimo R degli elettroni e la distanza $P_1P > R$, in EFGH si crea la condizione di equilibrio elettronico.

$$\text{in } P: X_P = \frac{\Delta Q}{\rho A_f L} \quad \text{ed in } P_1: X_{P_1} = \left(\frac{f}{f_1}\right)^2 \frac{\Delta Q}{\rho A_f L}; \quad \text{dato che } A = A_f \left(\frac{f}{f_1}\right)^2$$

$$\text{in } P_1: X = \frac{\Delta Q}{\rho AL} \quad \text{ma: a 3 MeV } R \cong 1.5\text{m} \rightarrow \text{grandi dimensioni della camera}$$

\rightarrow attenuazione del fascio (~5%)



Esempio

In una camera ad aria libera il collimatore ha un'area di 0.500 cm^2
E la lunghezza dell'elettrodo di raccolta e' 8.00 cm . In un irraggiamento
viene raccolta una carica di $1.12 \times 10^{-7} \text{ C}$. L'aria e' a STP ($\rho = 1.293 \text{ kg m}^{-3}$)
Si determini l'esposizione.

La camera a ditale

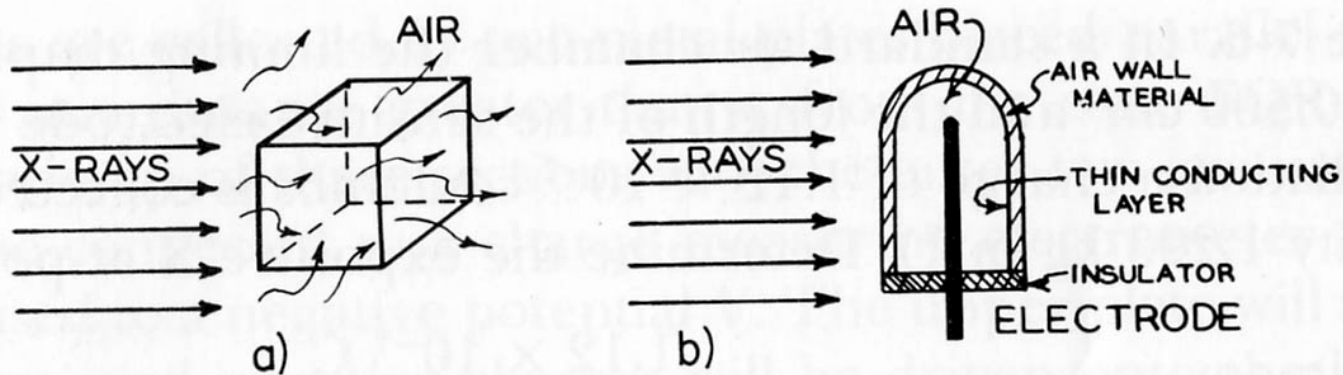
Nella pratica vengono usate camere di piccole dimensioni come dosimetri relativi, i.e. che devono essere **calibrati** con un dosimetro assoluto.

Si ottiene la condizione di equilibrio nel volumetto di misura con pareti di materiale solido “aria equivalente” di spessore \geq il range massimo degli elettroni R.

La calibrazione avviene ponendo la camera a ditale in corrispondenza del collimatore della camera ad aria libera e determinando $N_x(h\nu)$.

$$X = M N_x$$

dove M e' la lettura della camera





**Camera +
elettrometro**

Referenze

- H.E. Johns, J.R.Cunningham, The Physics of Radiology, Charles C Thomas Publisher, 1983
- R.K Hobbie, Intermediate Physics for Medicine and Biology, Springer –Verlag, 1997
- M. Pelliccioni, Fondamenti fisici della radioprotezione, Pitagora Editrice, 1993