



# GIORNATE DI STUDIO SU: RADIOAZIONI E TIROIDE

19-20 APRILE 2012  
ROMA, Via del Commercio, 13

## La contaminazione interna

G. Trenta

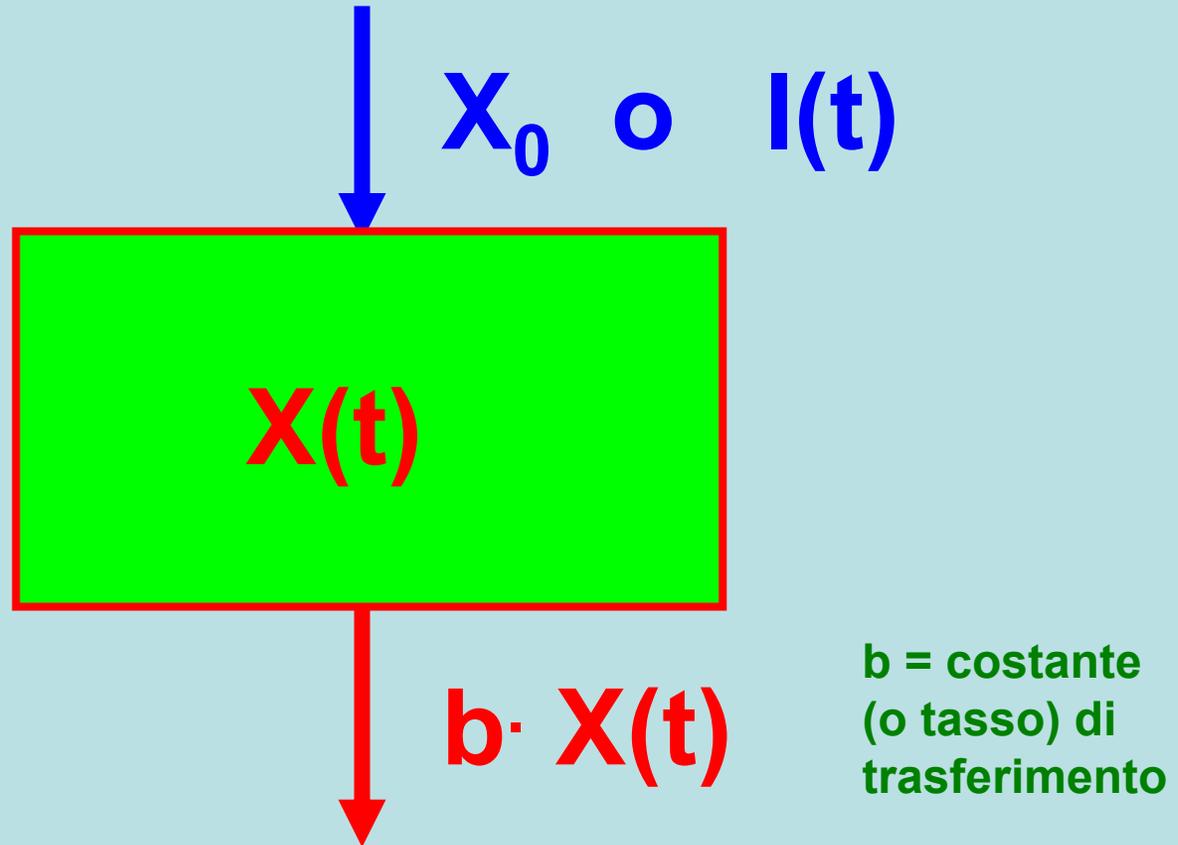
# CONTAMINAZIONE INTERNA

*Introduzione nell'organismo di sostanze radioattive che, seguendo il normale processo metabolico, si diffondono e si distribuiscono ai tessuti e agli organi (**sorgente**) che lo eliminano più o meno lentamente secondo la cinetica propria della forma chimica dell'elemento. Durante la loro permanenza i radionuclidi decadono irradiando organi e tessuti (**bersaglio**), per periodi più o meno lunghi e con intensità differenti a seconda della vita media dei radioelementi, alle loro caratteristiche chimico-fisiche e alle vie e alle modalità temporali di introduzione.*

# MODELLAZIONE A COMPARTIMENTI

- **COMPARTIMENTO** di una sostanza o elemento chimico è ogni particolare stato:
  - *Topografico (anatomico-fisiologico)*
  - *Chimico*
  - *Fisico*
  - *.....*in cui o sotto cui si trova la sostanza stessa.
- **IPOTESI DI BASE:**

sussiste una relazione di proporzionalità diretta tra la variazione nel tempo della quantità di sostanza che abbandona il compartimento e quella presente nel compartimento stesso.



## SCHEMA DI COMPARTIMENTO

$$\frac{dX}{dt} = -b \cdot X \quad \longrightarrow \quad X = X_0 \cdot e^{-b \cdot t}$$

# RITENZIONE

*Frazione della quantità introdotta, incorporata o depositata presente in un dato momento nell'organismo (ritenzione totale) o nell'organo (ritenzione parziale).*

$$R(t) = \frac{\text{Attività presente al tempo } t}{\text{Attività introdotta}}$$

# ESCREZIONE

*Frazione della quantità introdotta, incorporata o depositata escreta in un dato momento (giorno) dall'organismo attraverso una delle vie di escrezione: generalmente urine (escrezione urinaria) o feci (escrezione fecale)*

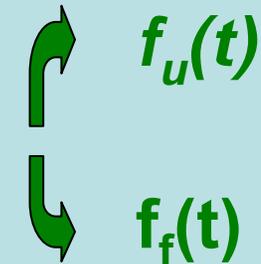
$$\dot{Y}(t) = \frac{\text{Attività escreta al tempo } t}{\text{Attività introdotta}}$$

# FUNZIONI BIOKINETICHE

- *Di ritenzione (generalmente un esponenziale):*

$$R(t) = \exp[-(k+l)*t]$$

- *Di escrezione (la derivata della precedente):*

$$\dot{Y}(t) = k * \exp[-(k+l)*t]^*$$


$f_u(t)$

$f_f(t)$

- Sono generalmente indicate con  $m(t)$  indifferentemente sia per la frazione di intake che resta nel corpo (ritenzione), sia per la frazione che viene eliminata (escrezione).

# CARATTERISTICHE RILEVANTI

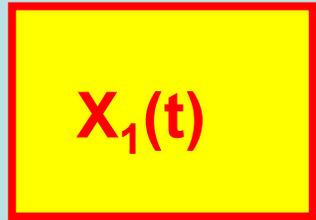
***Ritenzione ed escrezione dipendono da:***

- ***Via di introduzione***
- ***Forma chimico-fisica***
- ***Modalità temporali di introduzione***

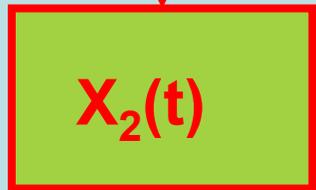
***Inoltre la dose dipende anche da:***

- ***Attività introdotta***
- ***Natura ed energia della radiazione***

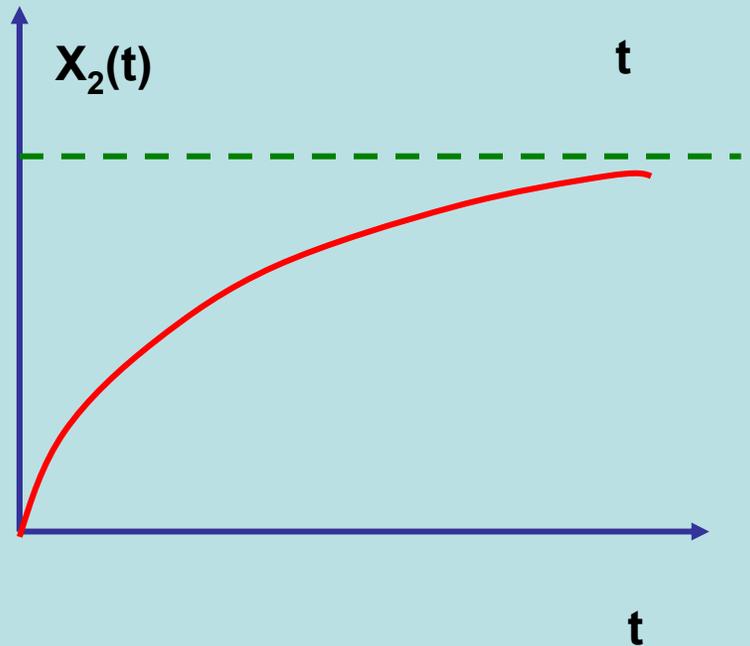
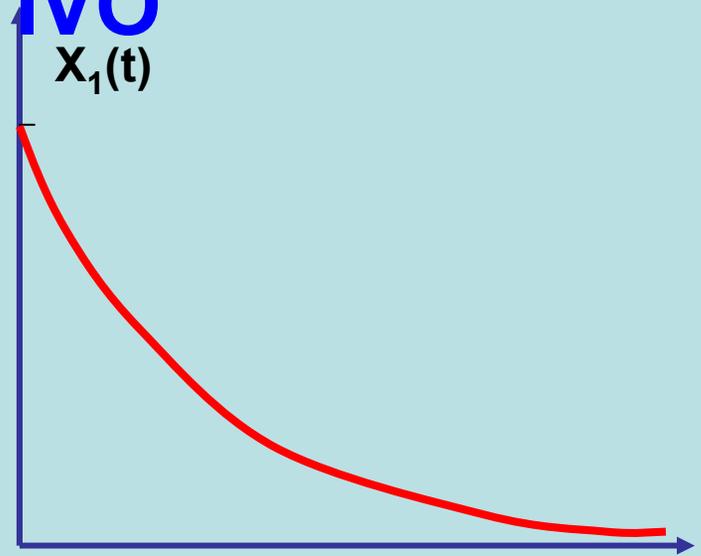
# MODELLO DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO



$\lambda$



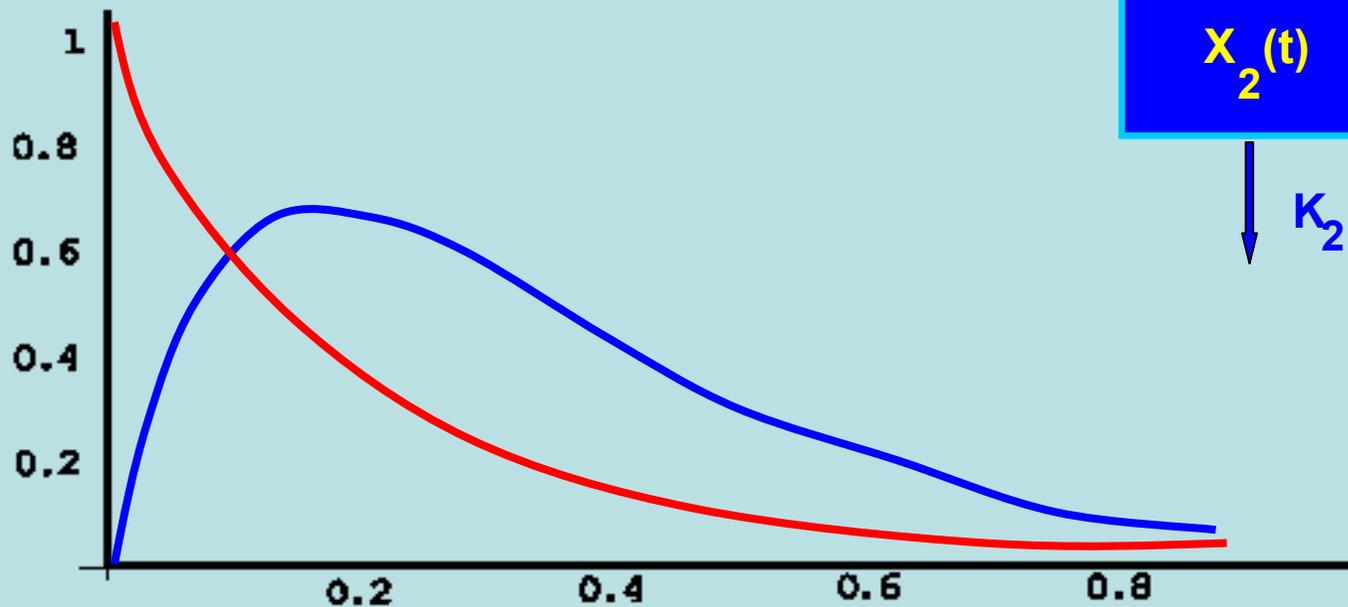
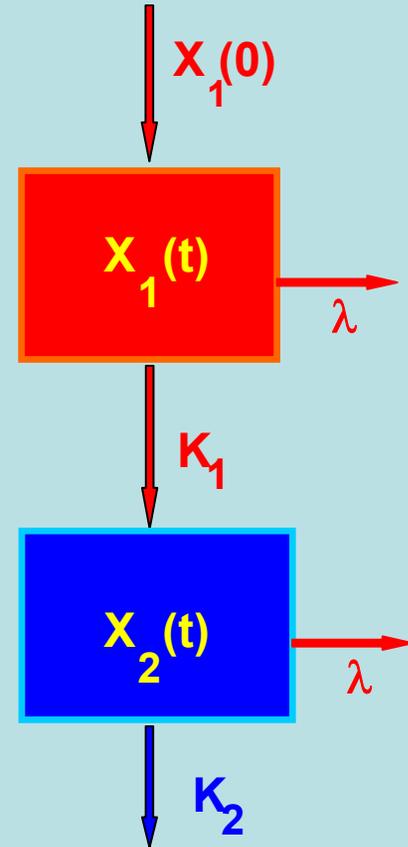
$$\frac{dX}{dt} = -\lambda \cdot X \quad X = X_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$



$$X_2(t) = X_0 \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})$$

# MODELLO A DUE COMPARTIMENTI

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = -k_1 X_1 - \lambda X_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = k_1 X_1 - k_2 X_2 - \lambda X_2 \end{cases}$$
$$\begin{cases} X_1 = X_1(0) e^{-(k_1 + \lambda)t} \\ X_2 = \frac{k_1 X_1(0)}{k_2 - k_1} e^{-\lambda t} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) \end{cases}$$



# DOSE EQUIVALENTE IMPEGNATA

**Dose che verrà accumulata nell'organo bersaglio nei successivi 50 (70) anni dopo l'introduzione del radionuclide nell'organismo**

$$H_T = 13,84 \cdot f \cdot q_0 \cdot \frac{\varepsilon}{m} \cdot \int_0^{50} R(t) dt$$

$f$  = frazione di deposizione nell'organo sorgente

$q_0$  = attività introdotta al tempo 0 (kBq)

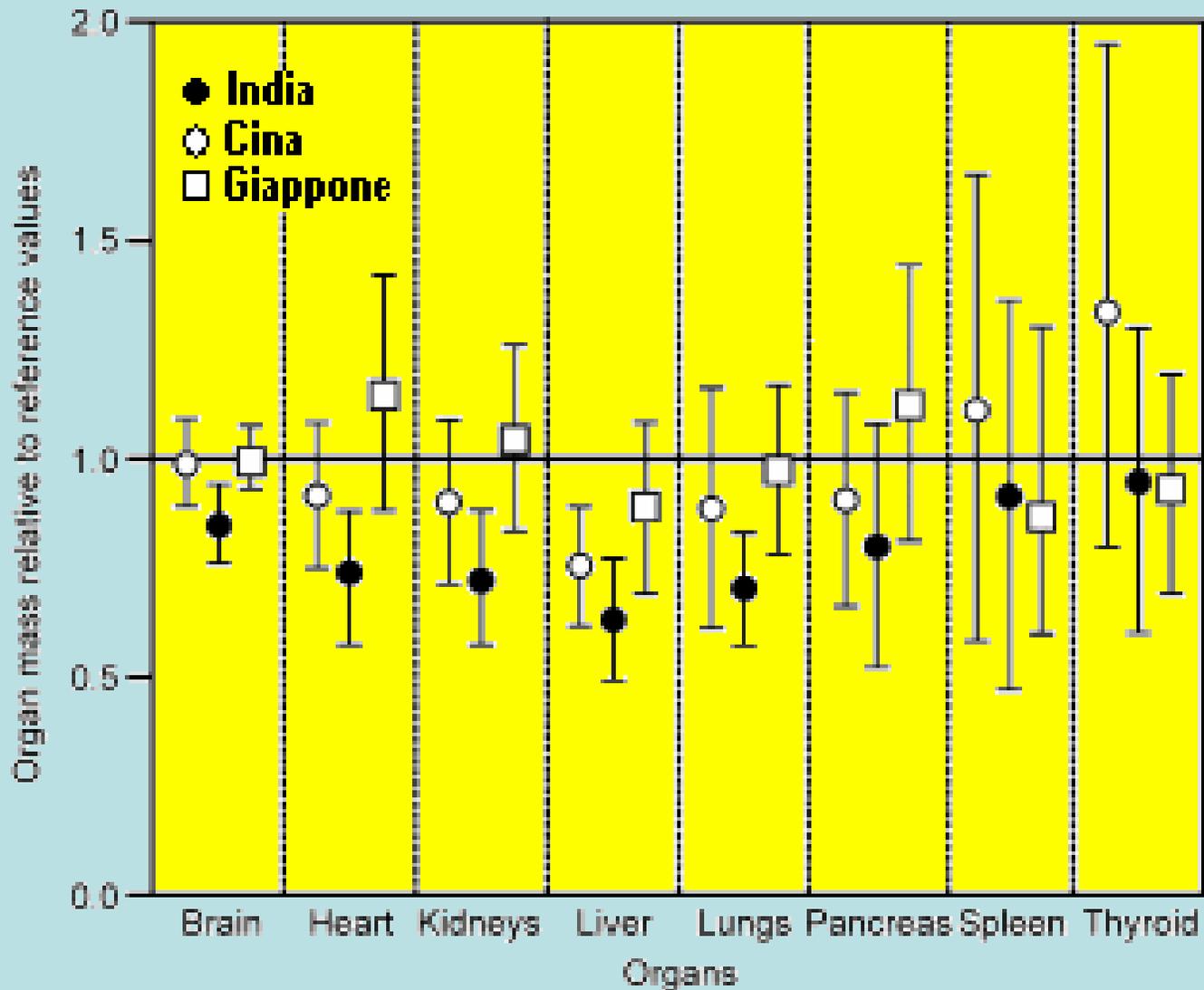
$m$  = massa dell'organo bersaglio (g)

$\varepsilon$  = energia assorbita per disintegrazione (Mev/Bq)

$R(t)$  = funzione di ritenzione

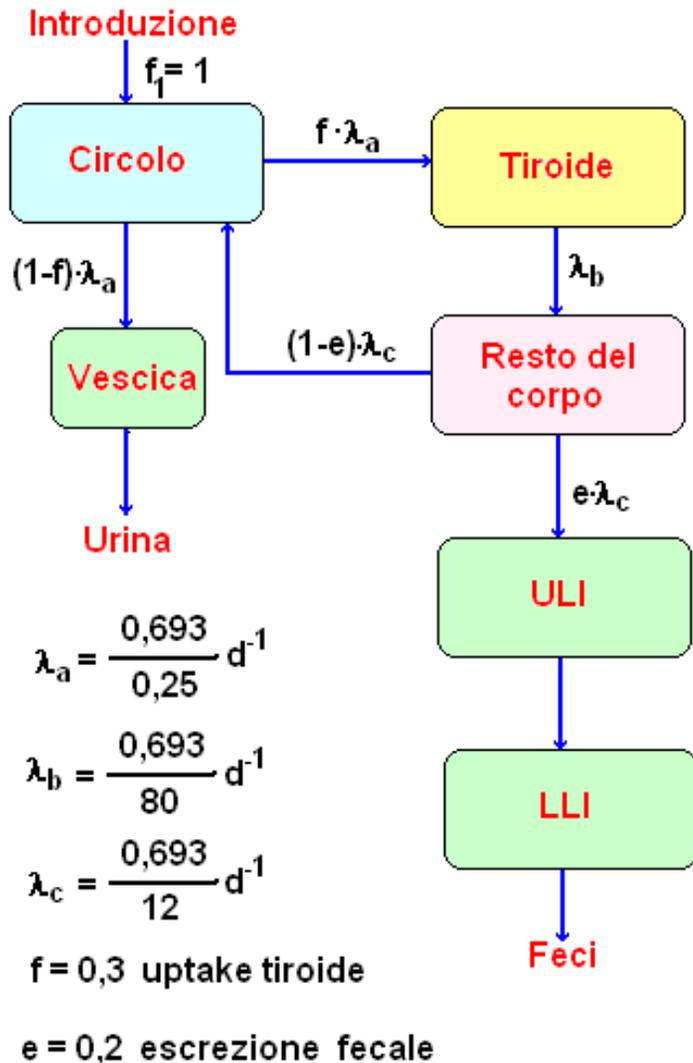
$H_T$  = dose equivalente impegnata

# L'UOMO STANDARD



ICRP 89

# MODELLO PER LO IODIO (ICRP 54)



$$R(t) = -0,33 \exp(-\lambda_a t) + 0,018 \exp(-\lambda_b t) + 0,31 \exp(-\lambda_c t)$$

*In tiroide passa il 30%, il 70% è escreto con l'urina. Il periodo di dimezzamento in circolo è di 6 ore, in tiroide (iodio organico) è di 80 giorni, negli altri tessuti (iodio inorganico) è di 12 giorni. L'80% torna in circolo il restante 20% viene eliminato con le feci. A causa del breve periodo di dimezzamento fisico questo riciclo non è importante per la valutazione della dose efficace impegnata.*

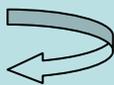
$$Y(t) = 1,94 e^{-2,77t} - 0,0018 e^{-0,06t} + 0,0017 e^{-0,006t}$$

An aerial photograph of a large body of water, showing a color gradient from deep blue in the upper portion to a lighter, greenish-brown in the lower portion. The water surface is covered in small, intricate ripples and patterns. The text 'LA PROTEZIONE LAVORATIVA' is overlaid in the center in a bold, white, sans-serif font.

# LA PROTEZIONE LAVORATIVA

# VALUTAZIONI

- **A priori**

*Incorporazione*  $\longrightarrow$  *modello*  $\longrightarrow$  *ritenzione*  
*Dose* 

- **A posteriori**

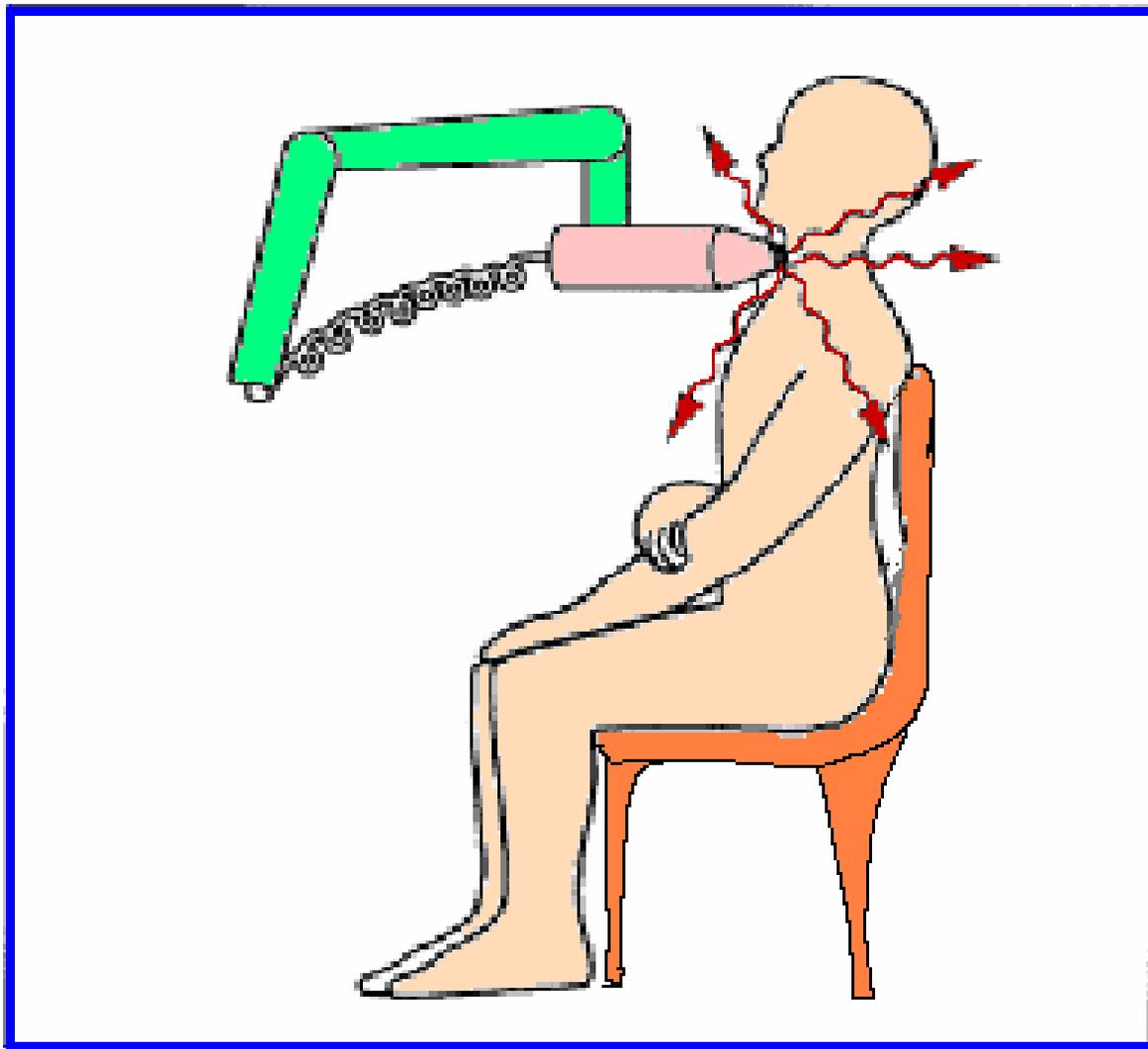
- a) Metodo diretto

*Rivelatore*  $\longrightarrow$  *ritenzione*  $\longrightarrow$  *Modello*  $\longrightarrow$   
 $\longrightarrow$  *Incorporazione*  $\longrightarrow$  *Introduzione*  $\longrightarrow$  *Dose*

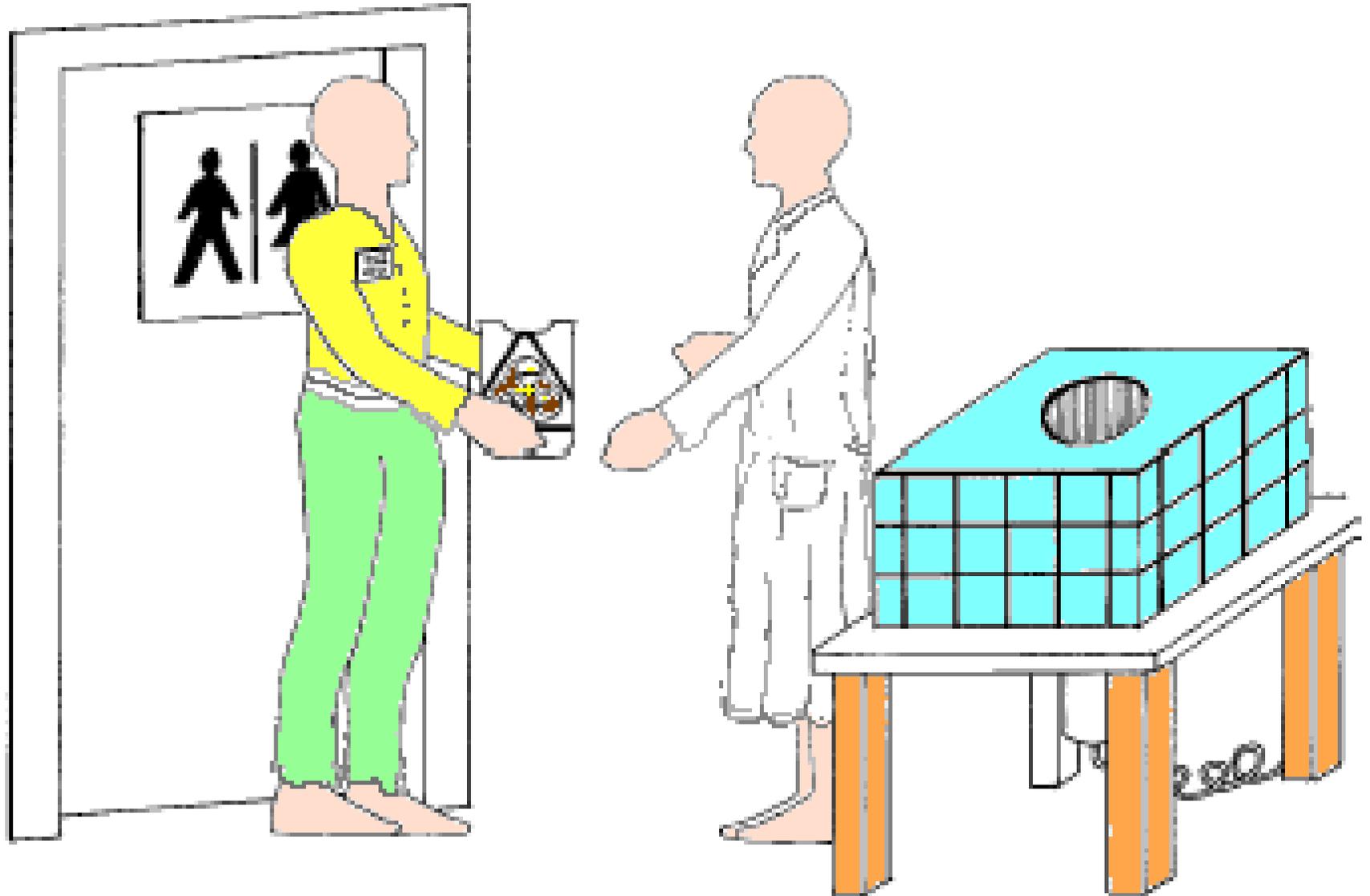
- b) Metodo indiretto

*Es.radiotossicologici*  $\longrightarrow$  *escrezione*  $\longrightarrow$  *Modello*  $\longrightarrow$   
 $\longrightarrow$  *incorporazione*  $\longrightarrow$  *Introduzione*  $\longrightarrow$  *Dose*

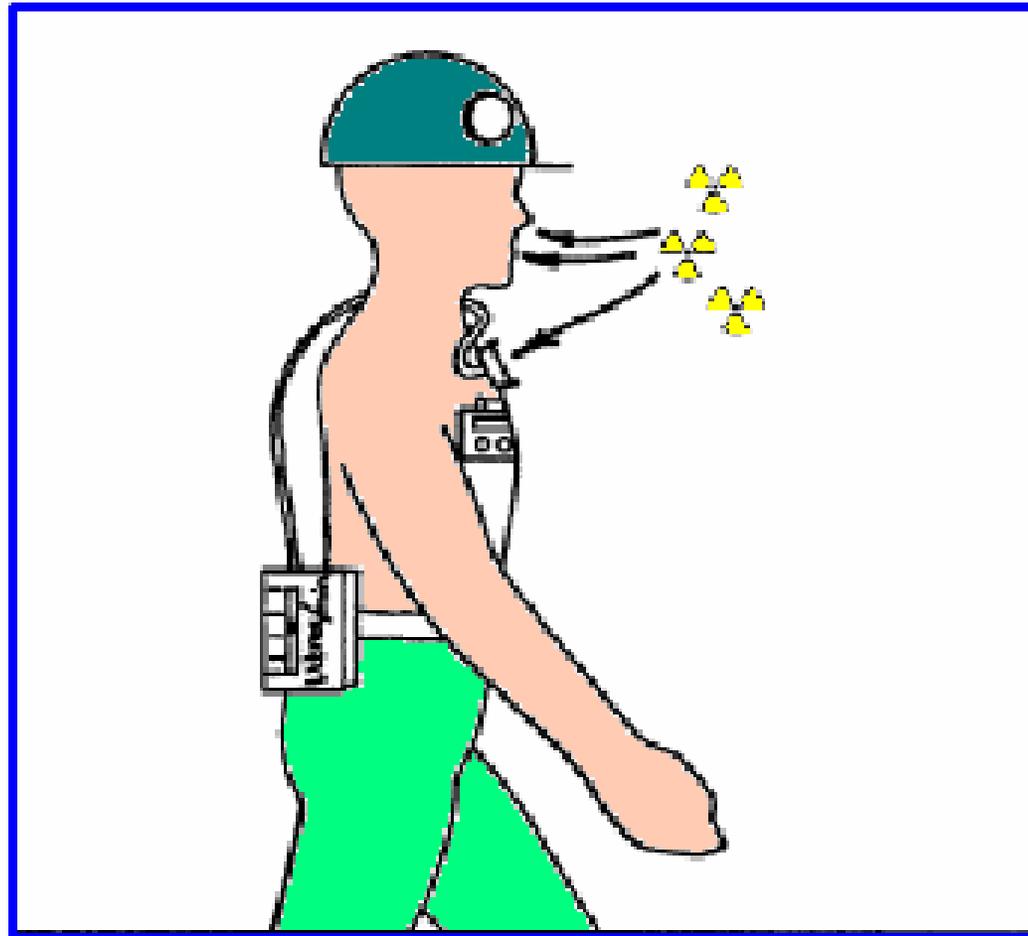
# RIVELATORE COLLIMATO



# ANALISI RADIOTOSSICOLOGICHE



# CAMPIONATORE PERSONALE D'ARIA PERSONAL AIR SAMPLER (P.A.S)



# LIVELLI DI RIFERIMENTO

- **Valore di una grandezza dosimetrica al di sopra del quale devono essere intraprese determinate decisioni o azioni.**
- **Si distinguono in primitivi e derivati. Un livello di riferimento primitivo è il limite annuo di dose pari a 20 mSv. Il limite annuo di introduzione (ALI) è un livello di riferimento derivato (è calcolato sulla base dei 20 mSv).**
- **Sono molto utili in dosimetria interna**
- **A seconda della decisione o dell'azione da intraprendere si distinguono in:**
  - **Livelli di registrazione (Recording Level RI ),**
  - **Livelli d'indagine (Investigation Level IL)**
  - **Livelli di azione (Action Level AL)**

# LIVELLO DI REGISTRAZIONE

- *Valore di dose, di esposizione o di introduzione al di sopra del quale il valore stesso deve essere annotato (es.: inserito nel documento personale dosimetrico).*
- *Può essere ad esempio il valore della sensibilità dello strumento o la sensibilità del metodo impiegato per la valutazione.*
- *Nel caso di contaminazione interna ad es. l'introduzione che corrisponde a 1 mSv.*

$$RL = \frac{0,001 \text{ Sv}}{N \cdot h(g)}$$

# LIVELLO D'INDAGINE

- *Valore di una grandezza (ad esempio: dose efficace, introduzione, contaminazione areale o volumica) al di sopra del quale dovrebbe essere condotta una indagine per individuare le cause che hanno determinato tale superamento.*
- *Nel caso di contaminazione interna ad es. l'introduzione che corrisponde a 6 mSv.*

$$IL = \frac{0,006 \text{ Sv}}{N \cdot h(g)}$$

# LIVELLO DI AZIONE

- *Valore di una grandezza (ad esempio: dose efficace, introduzione, contaminazione areale o volumica) al di sopra del quale deve essere attuato un qualche intervento correttivo o protettivo.*
- *Nel caso di contaminazione interna, ad es. l'introduzione che corrisponde a 20 mSv.*

$$AL = \frac{0,02 \text{ Sv}}{N \cdot h(g)}$$

*il superamento comporta ad esempio la sorveglianza medica eccezionale*

# DAC: DEFINIZIONE

La concentrazione derivata in aria è la concentrazione di attività aeriforme che comporta al lavoratore esposto nel corso di un anno (2000 h) il limite di introduzione (per inalazione 1,2 m<sup>3</sup>/h)  $I_{in}$ .

$$DAC = \frac{I_{in}}{2000 \cdot 1,2}$$

Es: per I-131 (S),  $h(g) = 7,4 \cdot 10^{-9}$  Sv/Bq, è:

$$I_{in} = \frac{0,02 \text{ Sv } (=20 \text{ mSv/anno})}{7,4 \cdot 10^{-9} \text{ Sv/Bq}} = 2,7 \cdot 10^6 \text{ Bq}$$

Quindi:

$$DAC_{I-131} = \frac{2700000 \text{ Bq}}{2000 \cdot 1,2 \text{ m}^3} = 1125 \text{ Bq/m}^3$$

**Pertanto: 2000·DAC·h corrisponde all'intake di 1 limite di introduzione.**

# PROGRAMMA DI “MONITORING”

- *In caso di contaminazioni incidentali gli esami sono essenziali (anche per motivi psicologici)*
- *Nel caso di possibili contaminazioni di routine è necessario predisporre un programma di monitoraggio che preveda:*
  - *Frequenze di misura (e quindi intervalli temporali tra le misure),*
  - *Livelli di riferimento.*

# PROGRAMMA DI “MONITORING” ASSUNZIONI DI BASE

- Conoscendo le caratteristiche del possibile contaminante (in particolare tossicità  $C_{Toss}$  e  $T_{eff1/2}$ ) le sensibilità ( $S$ ) delle metodiche di misura, si stabiliscono gli intervalli di esame e quindi il numero di misure all'anno ( $M$ ).

$$\text{Frequenza (=M)} \approx \frac{C_{Toss}}{S \cdot T_{eff1/2}}$$

- Si ipotizza che la ritenzione (o l'escrezione) sia dovuta ad una introduzione singola avvenuta a metà dell'intervallo tra 2 misure successive.

# LIVELLI DI RIFERIMENTO DERIVATI

Sono valori di attività misurabili nel corpo o negli escreti; si ottengono dai livelli di riferimento primari, tenendo conto dell'intervallo (in frazione di anno) tra le misure (es. 30/365) e del tipo di livello (1/10 per il livello di registrazione, 3/10 per il livello di indagine e 1 per quello di azione). Pertanto:

$$\text{DRL} = \text{RL} \times 1/10 \times \text{giorni}/365$$

$$\text{DIL} = \text{IL} \times 3/10 \times \text{giorni}/365$$

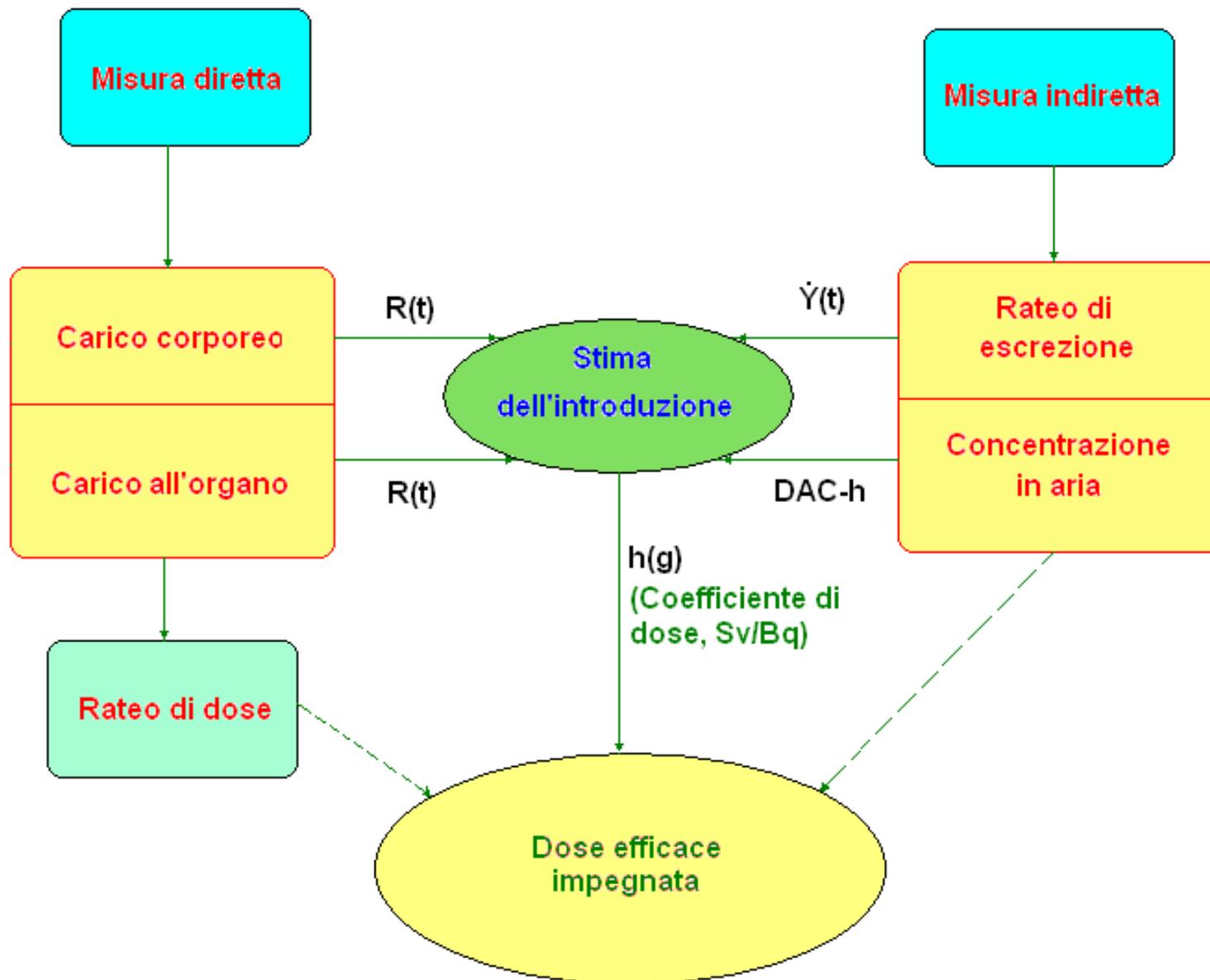
$$\text{DAL} = \text{AL} \times 1 \times \text{giorni}/365$$

Il numero di giorni dipende dalle caratteristiche del radionuclide e dalla sensibilità della metodica di misura.

# *FUNZIONI BIOKINETICHE*

- **Genericamente indicate con :**  
 **$m(t)$**
- **Sono riferite alla introduzione di 1 Bq**
- **Sono distinte in:**
  - *Funzione di ritenzione*  $R(t)$
  - *Funzione di escrezione*  $Y(t)$

# PROCESSO VALUTATIVO

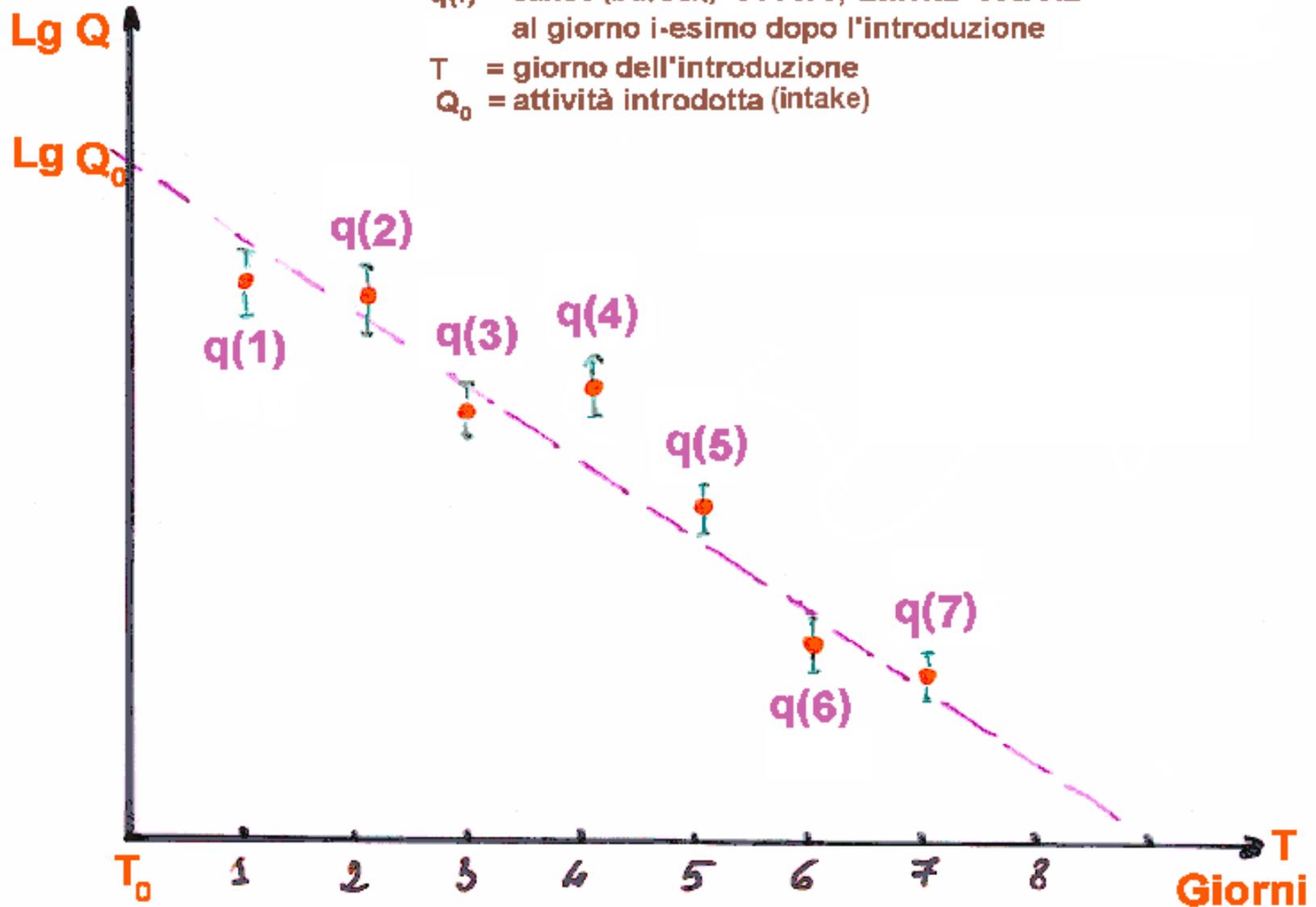


# VALUTAZIONE GRAFICA DELL'INTAKE

$q(i)$  = carico (burden) ovvero, attività escretata al giorno  $i$ -esimo dopo l'introduzione

$T$  = giorno dell'introduzione

$Q_0$  = attività introdotta (intake)



# VALUTAZIONE ANALITICA DELL'INTAKE

$q(t)$  = carico corporeo o attività escreta al giorno  $t$

$m(t)$  = funzione di ritenzione o di escrezione al giorno  $t$

$I_0$  = intake al giorno 0

$$I_0 : q(t) = 1 : m(t)$$

$$I_0 = \frac{q(t)}{m(t)}$$

# ANDAMENTO FUNZIONI DI RITENZIONE E DI ESCREZIONE

Table A.6.17. Special monitoring: predicted values (Bq per Bq intake) for inhalation of <sup>131</sup>I

Time after intake (d)	Type F		Vapour	
	Thyroid	Daily urinary excretion	Thyroid	Daily urinary excretion
1	1.2E-01	2.8E-01	2.3E-01	5.3E-01
2	1.2E-01	2.3E-02	2.2E-01	4.3E-02
3	1.1E-01	1.4E-03	2.0E-01	2.5E-03
4	9.9E-02	1.5E-04	1.9E-01	2.7E-04
5	9.0E-02	8.9E-05	1.7E-01	1.7E-04
6	8.2E-02	9.6E-05	1.5E-01	1.8E-04
7	7.4E-02	1.0E-04	1.4E-01	1.9E-04
8	6.8E-02	1.1E-04	1.3E-01	2.0E-04
9	6.2E-02	1.1E-04	1.2E-01	2.1E-04
10	5.6E-02	1.1E-04	1.1E-01	2.1E-04

Spediz. abb. post. 45% - art. 2, comma 20/b  
Legge 23-12-1996, n. 662 - Filiale di Roma

# GAZZETTA UFFICIALE

DELLA REPUBBLICA ITALIANA



PARTE PRIMA

Roma - Giovedì, 31 agosto 2000

SI PUBBLICA TUTTI  
I GIORNI NON FESTIVI

DIREZIONE E REDAZIONE PRESSO IL MINISTERO DELLA GIUSTIZIA - UFFICIO PUBBLICAZIONE LEGGI E DECRETI - VIA ARENULA 70 - 00100 ROMA  
AMMINISTRAZIONE PRESSO L'ISTITUTO POLIGRAFICO E ZECCA DELLO STATO - LIBRERIA DELLO STATO - PIAZZA G. VERDI 10 - 00100 ROMA - CENTRALINO 06 85081

N. 140/L

DECRETO LEGISLATIVO 26 maggio 2000, n. 241.

**Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti.**

TABELLA IV.1

Coefficienti di dose efficace impegnata per unità di introduzione per inalazione e per ingestione per i lavoratori (Sv·Bq<sup>-1</sup>)

Nuclide	Tempo di dimezzamento	Tipo assorb. <sup>1)</sup>	Inalazione			Ingestione	
			f <sub>i</sub>	h(g) <sub>10m</sub>	h(g) <sub>5m</sub>	f <sub>i</sub>	h(g)
Idrogeno							
Acqua tritata	12,3 a		Vedi tabella IV.2 per le dosi di inalazione			1,000	1,8 10 <sup>-11</sup>
OBT <sup>2)</sup>	12,3 a		Vedi tabella IV.2 per le dosi di inalazione			1,000	4,2 10 <sup>-11</sup>
Berillio							
Be-7	53,3 d	M	0,005	4,8 10 <sup>-11</sup>	4,3 10 <sup>-11</sup>	0,005	2,8 10 <sup>-11</sup>
		S	0,005	5,2 10 <sup>-11</sup>	4,6 10 <sup>-11</sup>		
Be-10	1,60 10 <sup>4</sup> a	M	0,005	9,1 10 <sup>-9</sup>	6,7 10 <sup>-9</sup>	0,005	1,1 10 <sup>-9</sup>
		S	0,005	3,2 10 <sup>-8</sup>	1,9 10 <sup>-8</sup>		
Carbonio							
C-11	0,340 h		Vedi tabella IV.2 per le dosi di inalazione			1,000	2,4 10 <sup>-11</sup>
C-14	5,73 10 <sup>3</sup> a		Vedi tabella IV.2 per le dosi di inalazione			1,000	5,8 10 <sup>-10</sup>
Fuoro							
F-18	1,83 h	F	1,000	3,0 10 <sup>-11</sup>	5,4 10 <sup>-11</sup>	1,000	4,9 10 <sup>-11</sup>
		M	1,000	5,7 10 <sup>-11</sup>	8,9 10 <sup>-11</sup>		
		S	1,000	6,0 10 <sup>-11</sup>	9,3 10 <sup>-11</sup>		
Sodio							
Na-22	2,60 a	F	1,000	1,3 10 <sup>-9</sup>	2,0 10 <sup>-9</sup>	1,000	3,2 10 <sup>-9</sup>
Na-24	15,0 h	F	1,000	2,9 10 <sup>-10</sup>	5,3 10 <sup>-10</sup>	1,000	4,3 10 <sup>-10</sup>
Magnesio							
Mg-28	20,9 h	F	0,500	6,4 10 <sup>-10</sup>	1,1 10 <sup>-9</sup>	0,500	2,2 10 <sup>-9</sup>
		M	0,500	1,2 10 <sup>-9</sup>	1,7 10 <sup>-9</sup>		
Alluminio							
Al-26	7,16 10 <sup>3</sup> a	F	0,010	1,1 10 <sup>-8</sup>	1,4 10 <sup>-8</sup>	0,010	3,5 10 <sup>-8</sup>
		M	0,010	1,8 10 <sup>-8</sup>	1,2 10 <sup>-8</sup>		
Silicio							
Si-31	2,62 h	F	0,010	2,9 10 <sup>-11</sup>	5,1 10 <sup>-11</sup>	0,010	1,6 10 <sup>-10</sup>
		M	0,010	7,5 10 <sup>-11</sup>	1,1 10 <sup>-10</sup>		
		S	0,010	8,0 10 <sup>-11</sup>	1,1 10 <sup>-10</sup>		
Si-32	4,50 10 <sup>3</sup> a	F	0,010	3,2 10 <sup>-9</sup>	3,7 10 <sup>-9</sup>	0,010	5,6 10 <sup>-10</sup>
		M	0,010	1,5 10 <sup>-8</sup>	9,6 10 <sup>-9</sup>		
		S	0,010	1,1 10 <sup>-7</sup>	5,5 10 <sup>-8</sup>		
Fosforo							
P-32	14,3 d	F	0,800	8,0 10 <sup>-10</sup>	1,1 10 <sup>-9</sup>	0,800	2,4 10 <sup>-9</sup>
		M	0,800	3,2 10 <sup>-9</sup>	2,9 10 <sup>-9</sup>		
P-33	25,4 d	F	0,800	9,6 10 <sup>-11</sup>	1,4 10 <sup>-10</sup>	0,800	2,4 10 <sup>-10</sup>
		M	0,800	1,4 10 <sup>-9</sup>	1,3 10 <sup>-9</sup>		
Zolfo							
S-35	87,4 d	F	0,800	5,3 10 <sup>-11</sup>	8,0 10 <sup>-10</sup>	0,800	1,4 10 <sup>-10</sup>
(inorganico)		M	0,800	1,3 10 <sup>-10</sup>	1,1 10 <sup>-9</sup>	0,100	1,9 10 <sup>-10</sup>
S-35 (organico)	87,4 d		Vedi tabella IV.2 per le dosi di inalazione			1,000	7,7 10 <sup>-10</sup>
Cloro							
Cl-36	3,01 10 <sup>5</sup> a	F	1,000	3,4 10 <sup>-10</sup>	4,9 10 <sup>-10</sup>	1,000	9,3 10 <sup>-10</sup>
		M	1,000	6,9 10 <sup>-9</sup>	5,1 10 <sup>-9</sup>		
Cl-38	0,620 h	F	1,000	2,7 10 <sup>-11</sup>	4,6 10 <sup>-11</sup>	1,000	1,2 10 <sup>-10</sup>
		M	1,000	4,7 10 <sup>-11</sup>	7,3 10 <sup>-11</sup>		

<sup>1)</sup> Il tipo F denota un'eliminazione rapida dai polmoni.  
Il tipo M denota un'eliminazione moderata dai polmoni.  
Il tipo S denota un'eliminazione lenta dai polmoni.

<sup>2)</sup> OBT — Tritio legato organicamente.

# ESEMPIO

## Inalazione acuta di I-131

### *Misura diretta*

*Dopo 3 gg misura scintillatore NaI 5050 Bq*

*Da ICRP 78 a 3 gg (ritenzione):  $R(3)=0,11$*

*Quindi introduzione  $Q_0=5050/0,11=45,9$  kBq*

### *Misura indiretta*

*Dopo 3 gg esame urine 24 ore: 8 Bq*

*Da ICRP 78 a 4 gg (escrezione):  $\dot{Y}(4)=0,00015$*

*Quindi introduzione  $Q_0=8/0,00015=53$  kBq*

A photograph of a rocky coastline with clear blue water. The rocks are dark and wet, with some green algae or moss. The water is a vibrant blue, and the sky is not visible. The text 'LA PROTEZIONE DEL PAZIENTE' is overlaid in the center in a bold, yellow, sans-serif font.

# LA PROTEZIONE DEL PAZIENTE

# IL “SISTEMA DI PROTEZIONE RADIOLOGICA” NELL’IMPIGO MEDICO

- ❑ *L’impiego delle radiazioni deve produrre più bene che male*  
*(Principio di “giustificazione”).*
- ❑ *L’impiego delle radiazioni deve produrre il beneficio massimo*  
*(Principio di “ottimizzazione” o principio ALARA).*
- ❑ *Confronto con valori standard*  
*(Principio di “livellazione”).*

# RAFFRONTO RISCHI-BENEFICI

- Per la giustificazione:

$$\frac{B}{R} > 1$$

- Per l'ottimizzazione:

$$\frac{\Delta B}{\Delta R} = 0$$

# RAFFRONTO RISCHI-BENEFICI

Incidenza ca tiroide = 0,6%

Noduli tiroidei 30%

Scintigrafia tiroide 20 MBq  $^{123}\text{I}$

$D = 2 \cdot 10^7 \text{ Bq} \times 7,4 \cdot 10^{-11} \text{ Sv/Bq} = 1,5 \text{ mSv}$  (dose efficace)

$$R = 1,5 \text{ mSv} \times 5,7 \cdot 10^{-5} \times 0,3 = 2,5 \cdot 10^{-5}$$

(Dose x detrimento x frequenza nodulo)

$$B = 0,06 \times 0,3 \times 0,86 \text{ (sensibilità)} = 1,5 \cdot 10^{-2}$$

(Sensibilità scint. x frequenza nodulo x incidenza ca tiroideo)

$$\frac{B}{R} = 600 > 0$$

# GIUSTIFICAZIONE TERAPIA RADIOMETABOLICA

Somministrazione di 3,7 GBq di  $^{131}\text{I}$  a tireoectomizzato (per ca tiroideo) pari ad una dose efficace impegnata di circa 0,26 Sv (ICRP 53) e quindi un detrimento di:

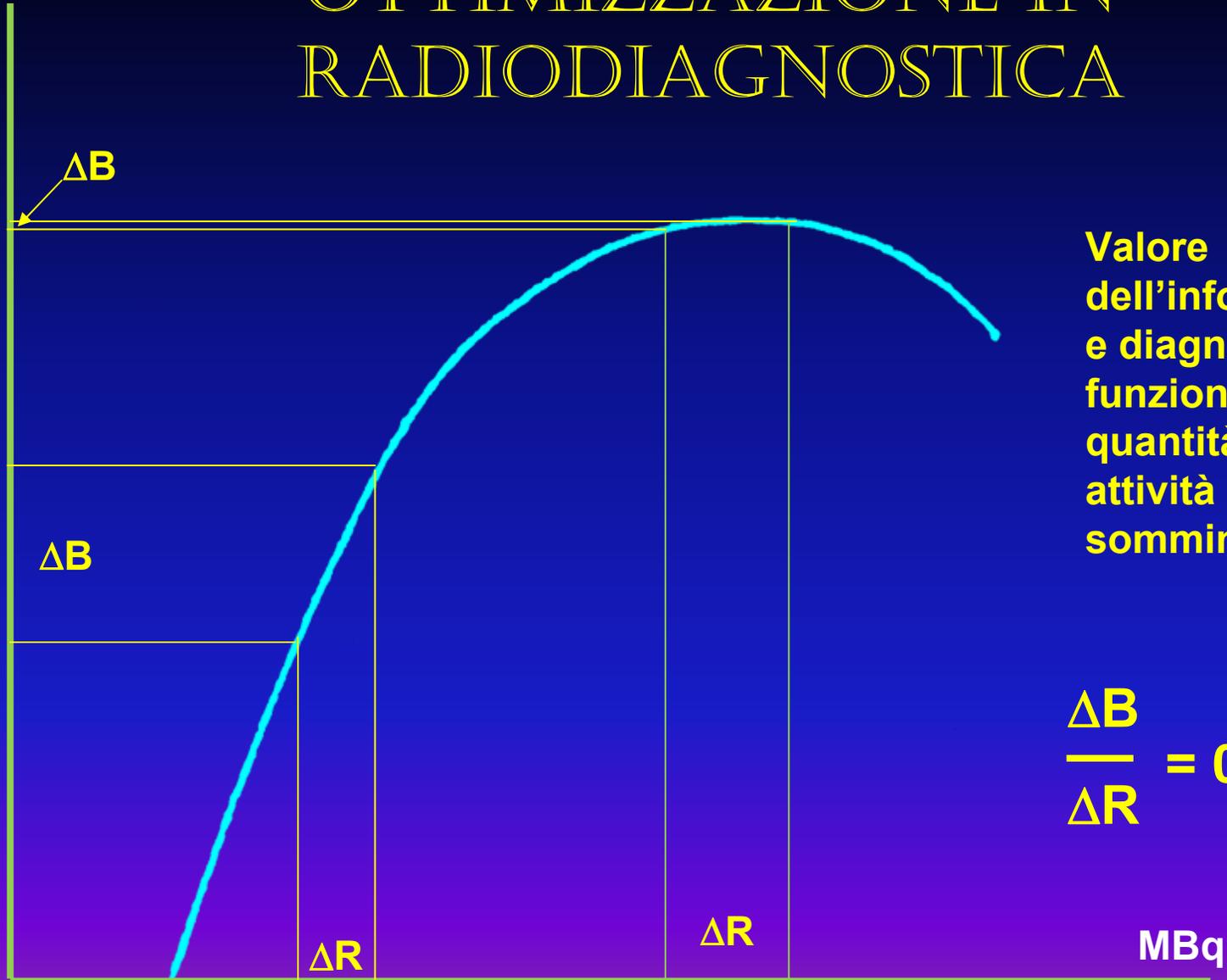
$$R=0,26 \cdot 5,7 \cdot 10^{-2}=1,5 \cdot 10^{-2}$$

A parte l'aumento della speranza di vita, assumendo che solo 1 soggetto su 10 vada a guarigione, si avrebbe:

$$\frac{B}{R} \approx 6,6$$

# OTTIMIZZAZIONE IN RADIODIAGNOSTICA

Valore dell'informazione  
diagnostica



Valore  
dell'informazione  
e diagnostica in  
funzione della  
quantità di  
attività  
somministrata

$$\frac{\Delta B}{\Delta R} = 0$$

Attività somministrata

MBq

(ICRP 52, 1987)



**Grazie dell'attenzione**

**G. Trenta**