

# FISICA NUCLEARE

- **Radioisotopi e medicina nucleare**
  - **Diagnostica per immagini**
    - **La SPECT**
    - **La PET**
    - **Attività tipiche**
  - **Produzione di radioisotopi**

## Radioisotopi e medicina nucleare

- Diagnostica con raggi X  $\Rightarrow$  attenuazione fasci  $\Rightarrow$  informazioni **anatomiche**
- Introducendo nel corpo sorgenti in quantità minime ( $\sim 10^{-9}$  g) per evitare effetti tossici  $\Rightarrow$  si producono  $\gamma$  rivelabili  $\Rightarrow$  **anche** informazioni **fisiologiche**
- **Tracciatore**: **radionuclide** legato a molecole che lo veicolano nel corpo e sono assorbite da organi e tessuti che si vogliono studiare
- Radionuclide può essere di per sé selettivo per l'organo in studio, come iodio per la tiroide
  - Radioisotopi non selettivi, come  $^{99}_{43}\text{Tc}$ , vanno legati a opportune sostanze veicolanti
  - Miscela **radioisotopo + sostanza veicolante**  $\Rightarrow$  **radiofarmaco**
- Quando radiofarmaco è in **bio-equilibrio** con organo da studiare, si rilevano  $\gamma$  per ottenere immagini diagnostiche utilizzando una  **$\gamma$ -camera**
- Radiofarmaco è trasportato nell'organismo **meccanicamente** (... flusso sanguigno) o con **processi metabolici**, come lo iodio
- Assorbimento del tracciatore in un organo può dipendere da patologie. Misura radiazione emessa dà quantità tracciatore assorbito e sua distribuzione nei tessuti

- $X$  fortemente assorbiti da tessuto osseo  $\Rightarrow$  difficile usarli per indagare cervello.  $\gamma$  da radioisotopi presenti nel cranio attraversano invece una sola volta tessuto osseo per essere rivelati e formare immagine
- In radiografia  $X$  assorbimento radiazione è essenziale per ottenere immagini, basate su contrasto fra diversi livelli di assorbimento nei diversi tessuti
- Con radioisotopi, assorbimento  $\gamma$  nei tessuti è fattore negativo (riduce  $\gamma$  utili)  $\Rightarrow$  preferibile utilizzare radiazioni con energie che riducano assorbimento. Per efficace resa immagini, fondo naturale dei tessuti  $\ll$  radioattività dei radioisotopi introdotti
- Soddisfare a queste condizioni concomitanti si abbina al **danneggiare meno possibile i tessuti interessati** con la radioattività dei radionuclidi utilizzati:
  - radionuclide resti nel corpo solo tempo necessario ad effettuare esame, o comunque il meno possibile
  - sia poi espulso, o abbia vita media breve, compatibile con tempi necessari all'esame medico, e anche per evitare inquinamento radioattivo ambientale una volta espulso

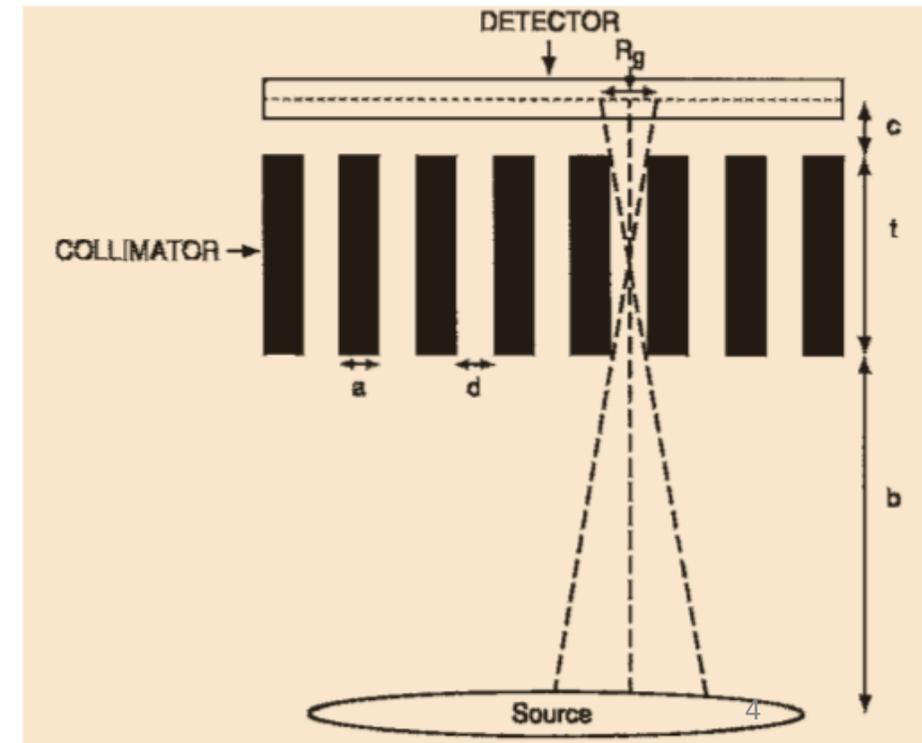
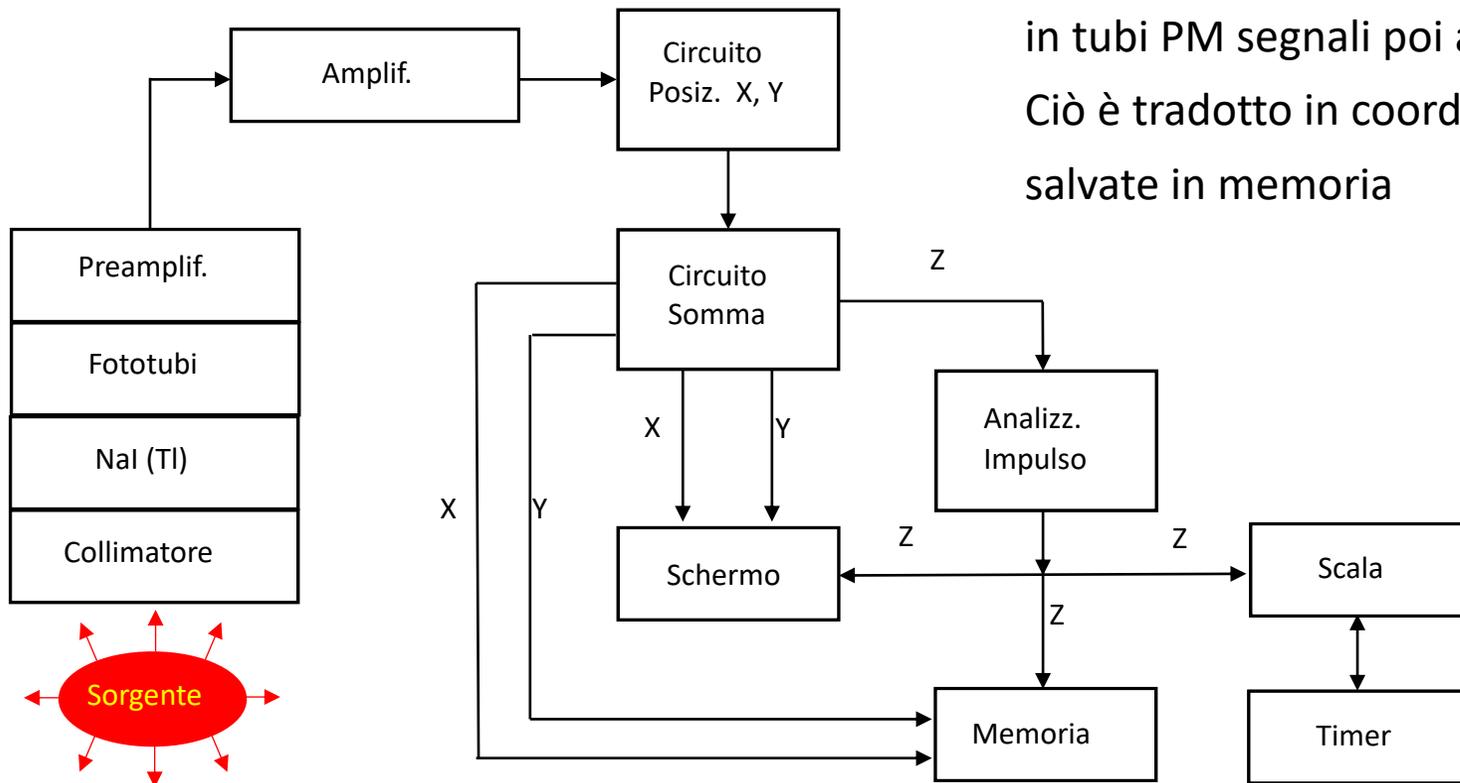
# Gamma Camera

$\gamma$ -camera (fine anni '50) è un dispositivo di imaging. Rileva simultaneamente radiazioni dall'intero campo visivo registrando immagini sia dinamiche che statiche dell'area di interesse del paziente

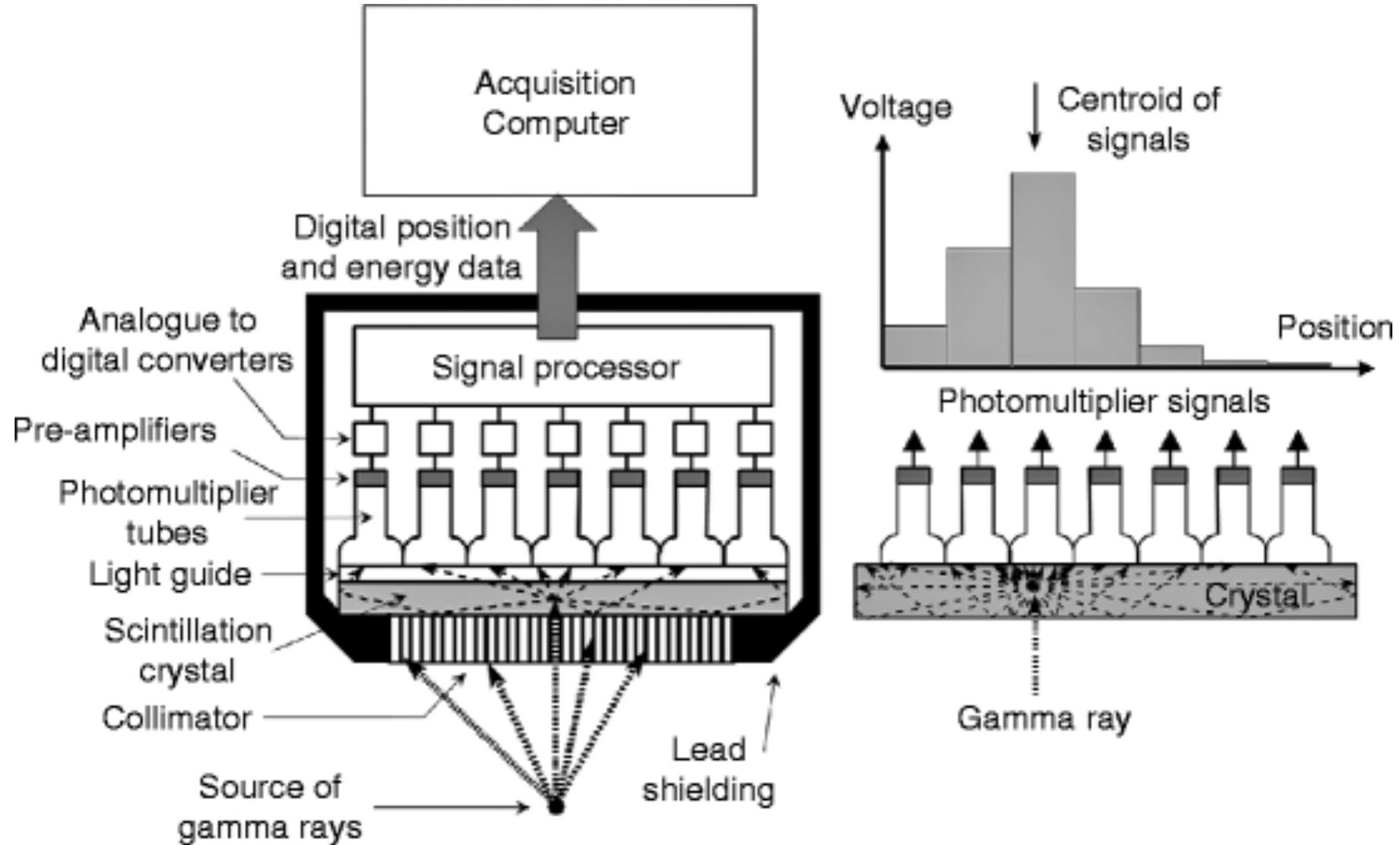
– La camera a singolo cristallo è la più utilizzata. In figura schema a blocchi di una  $\gamma$ -camera

$\gamma$  da sorgente interagiscono con NaI(Tl); fotoni conseguenti danno in tubi PM segnali poi analizzati in ampiezza (Z).

Ciò è tradotto in coordinate X, Y, visualizzate su uno schermo e salvate in memoria

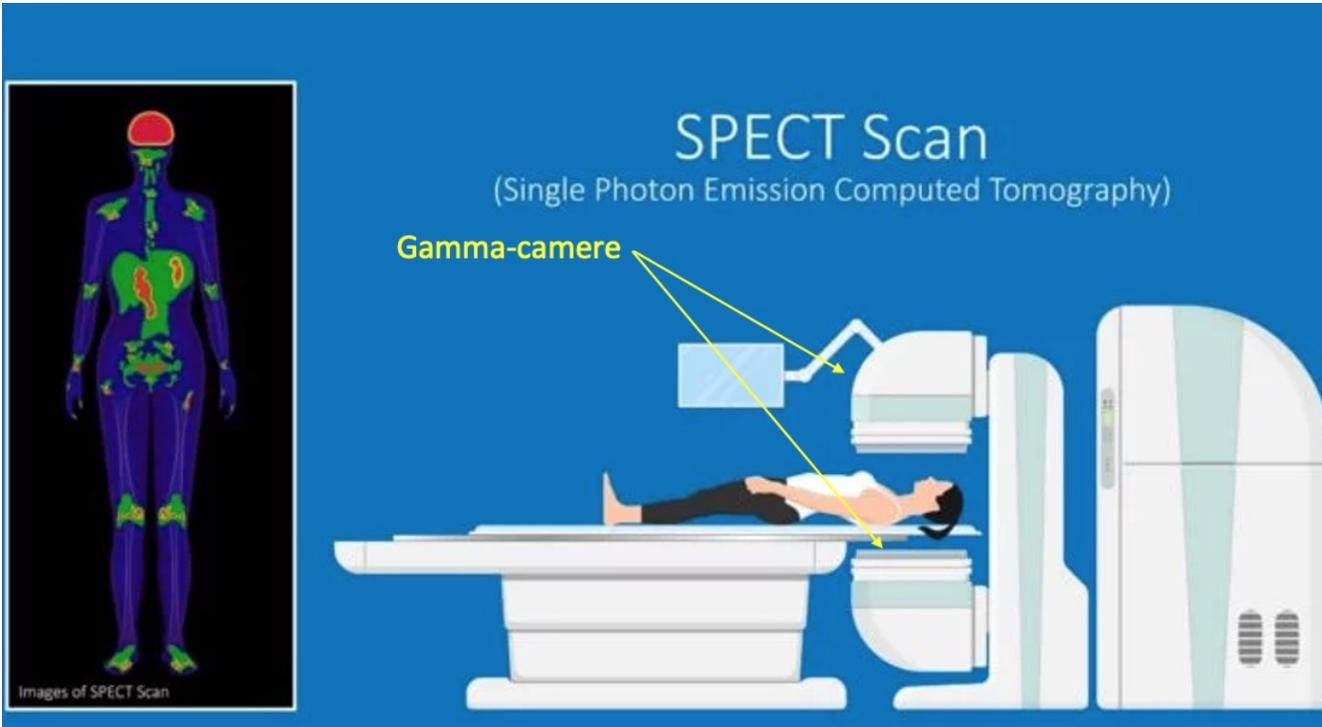


# Gamma Camera



# Diagnostica per immagini

## La SPECT

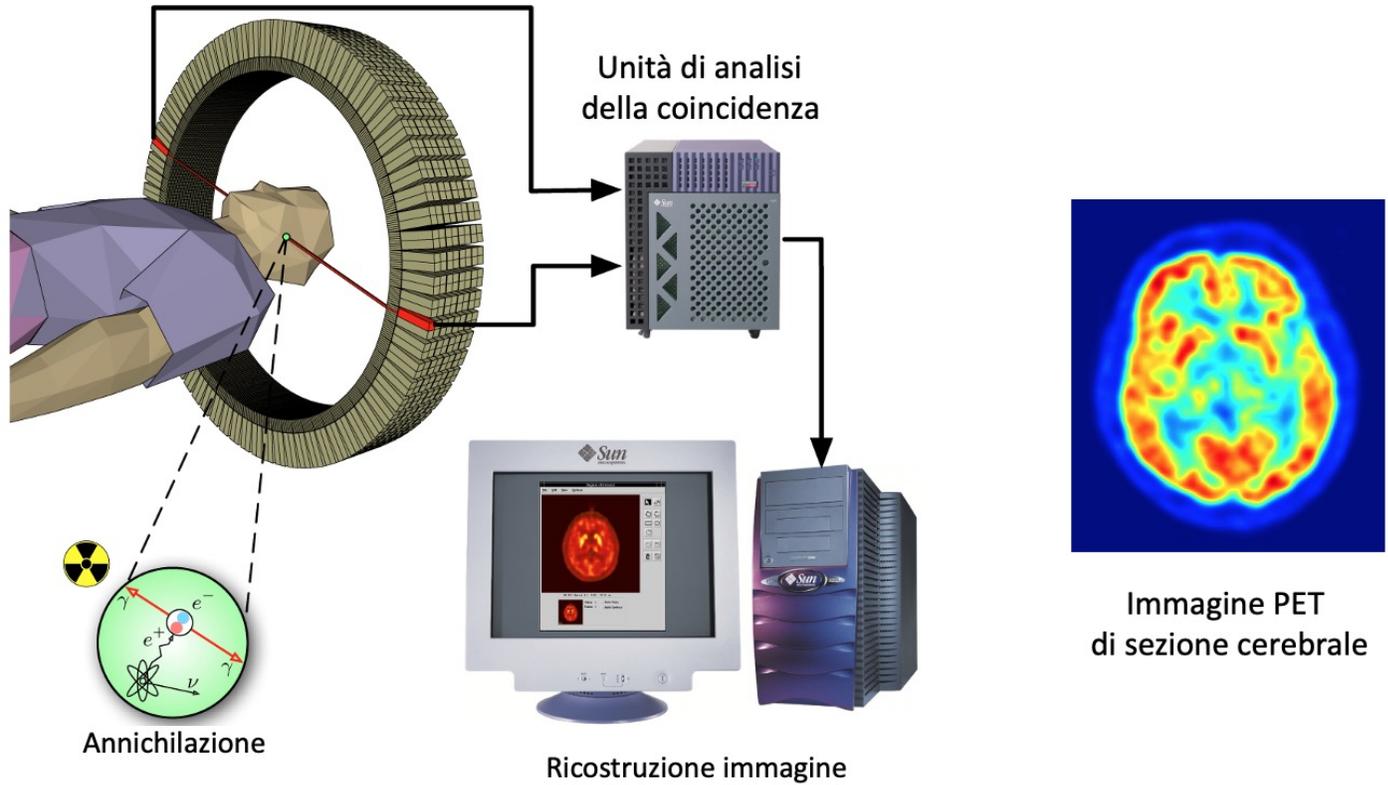


- Tecnica tomografica imaging di medicina nucleare, utilizza  $\gamma$  da radio-farmaci rivelati con  $\gamma$ -camere
- Anche informazioni bio-topologiche 3-d sotto forma di sezioni assiali 2-d dell'organo esaminato
- Immagini SPECT ruotando  $\gamma$ -camera attorno al paziente. Tempo per proiezione  $\sim 15 \div 20$  s . Tempo totale scansione per un esame  $\sim 15 \div 20$  minuti
- Con più  $\gamma$ -camere contemporaneamente operative tempo si riduce proporzionalmente

- Risoluzione spaziale può essere inferiore rispetto immagini X, ma uso di radioisotopi  $\Rightarrow$  informazioni fisiologiche su funzionalità di molti organi  $\Rightarrow$  importante poiché modificazioni funzionalità precedono alterazioni anatomiche, evidenziabili con radiografia X

► **Esami con radioisotopi permettono diagnosi anticipate !**

# La PET



- Come **SPECT** informazioni fisiologiche e mappe processi funzionali globali o di specifici organi
- Studia patologie neoplastiche, diagnosi differenziali su demenze e **neuro-imaging** funzionale, malattie reumatologiche e infettive, miocardio ibernato (anormalità funzione contrattile) e perfusione cardiaca (... ridotto apporto di sangue)
- Quando radiofarmaco raggiunge una opportuna concentrazione nei tessuti, si posiziona soggetto in apparato di scansione

- Isotopo a breve vita media decade  $\beta^+$  con  $e^+$  che entro pochi  $mm$  annichila con  $e^-$  in  $2\gamma$  **b-to-b**, entrambi di **511 keV**.  $\gamma$  rivelati da scintillatore accoppiato a **p.m.**
- Cruciale rivelare coppie di  $\gamma$  coincidenti in  $\Delta t$  di pochi **ns**. Da posizione in cui  $\gamma$  colpiscono rivelatore  $\Rightarrow$  si ricostruisce posizione, nell'organo indagato, da cui sono stati emessi
  - Risoluz. spaziale e contrasto immagini migliorano, correggendo per **TOF** dei due  $\gamma$

## Attività tipiche

- **Radio-marcatura**: introduzione nel corpo di molecola o composto chimico cui è legato radioisotopo
- Radioisotopi per imaging **devono** avere vita media confrontabile con tempi di misura: da decine di minuti a poche ore, comunque tali da non implicare danni ai tessuti ⇒ **radioisotopi non disponibili in natura ma prodotti artificialmente**
- Tempi di trasporto da luogo produzione a quello d'utilizzo **devono essere brevi**, comunque tali da evitare eccessiva riduzione attività specifica prima dell'immissione nei tessuti

Tabella \_ Radioisotopi emettitori  $\gamma$  di uso comune

Nuclide	Isotopo	$t_{1/2}$	Energia dei $\gamma$ (KeV)
Tecnezio	$^{99m}_{43}\text{Tc}$	6 h	140
Gallio	$^{67}_{31}\text{Ga}$	78.3 h	98, 184, 300
Indio	$^{111}_{49}\text{In}$	2.8 d	171, 245
Iodio	$^{123}_{53}\text{I}$	13 h	159
Iodio	$^{131}_{53}\text{I}$	8 d	364
Xeno	$^{133}_{54}\text{Xe}$	5.27 d	81
Tallio	$^{201}_{81}\text{Tl}$	73 h	68, 80.3

Importante calcolare attività radioisotopi utilizzati

Numero di **disintegrazioni/s** d'un grammo di materiale radioattivo, ovvero la sua **attività specifica**, è

metastabile



Ad es. per il  ${}_{43}^{99m}\text{Tc}$  si ha:

$$\mathcal{A}_{sp} = \frac{\mathcal{N}\lambda}{A} = \frac{\mathcal{N} \ln 2}{A t_{1/2}} \simeq \frac{4.16 \times 10^{23}}{A t_{1/2}} \quad (\mathcal{N} \simeq 6 \times 10^{23})$$

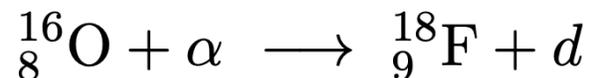
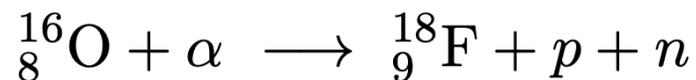
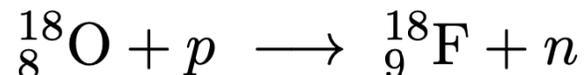
$$\mathcal{A}_{sp} \left( {}_{43}^{99m}\text{Tc} \right) = \frac{4.16 \times 10^{23}}{99 \times 2.16 \times 10^4} \simeq 1.95 \times 10^{17} \quad \frac{\text{disintegrazioni}}{\text{s} \times \text{g}}$$

Un nano grammo ( $10^{-9}$  g) di  ${}_{43}^{99m}\text{Tc}$  produce quindi  $\sim 2 \times 10^8$  disintegrazioni al secondo, ovvero un'attività di **200 MBq**, equivalente a **~ 5.4 mCurie**

Un tipico esame con uso del tecnezio richiede attività dell'ordine di **600 MBq**, con utilizzo quindi di circa **3 nano grammi** di radioisotopo, nel tessuto da esaminare

## Produzione di radioisotopi

- **Si irradiano nuclei stabili con fasci di  $p$**  o altri nuclei leggeri da **ciclotrone**. Il tracciatore  $^{18}_9\text{F}$ , con vita media  $\beta^+ \sim 2\text{ h}$ , si ottiene da

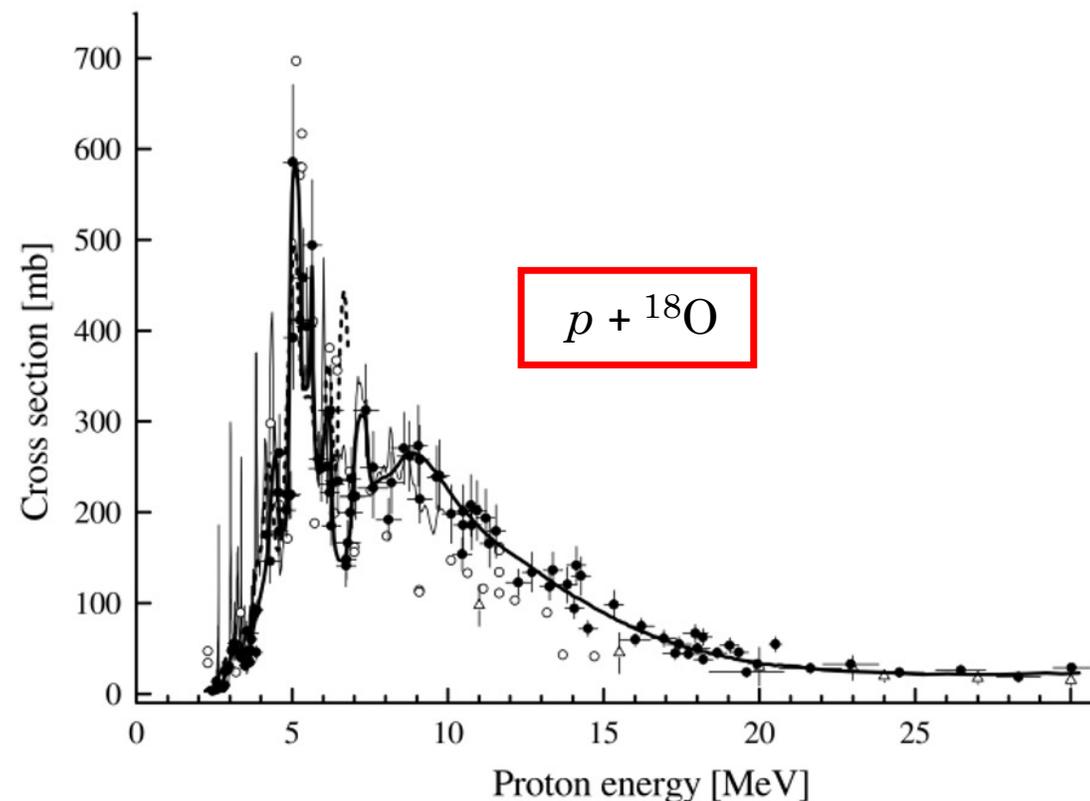


In fig.  $\sigma(E_p)$  di  $p + ^{18}\text{O}$

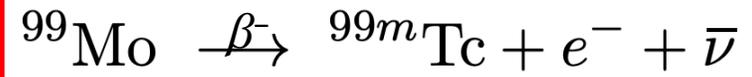
- Bersaglio è  $\text{H}_2\text{O}$  arricchita in  $^{18}\text{O}$  nel primo caso ; **sola acqua** negli altri due
- Reazioni su  $^{16}\text{O}$  con soglie 23.2 MeV e 20.4 MeV ;  
a  $\sim 30\text{ MeV}$  sez. d'urto  $\sim 100\text{ mb}$

- **Neutroni da reattore:**  $^{98}_{42}\text{Mo}(n, \gamma) \longrightarrow ^{99}_{42}\text{Mo}$  ,  $^{235}_{92}\text{U}(n, \text{fissione}) \longrightarrow ^{99}_{42}\text{Mo}$

dove  $^{99}_{42}\text{Mo}$  è  $\beta$ -instabile con vita media  $\sim 67\text{ h}$



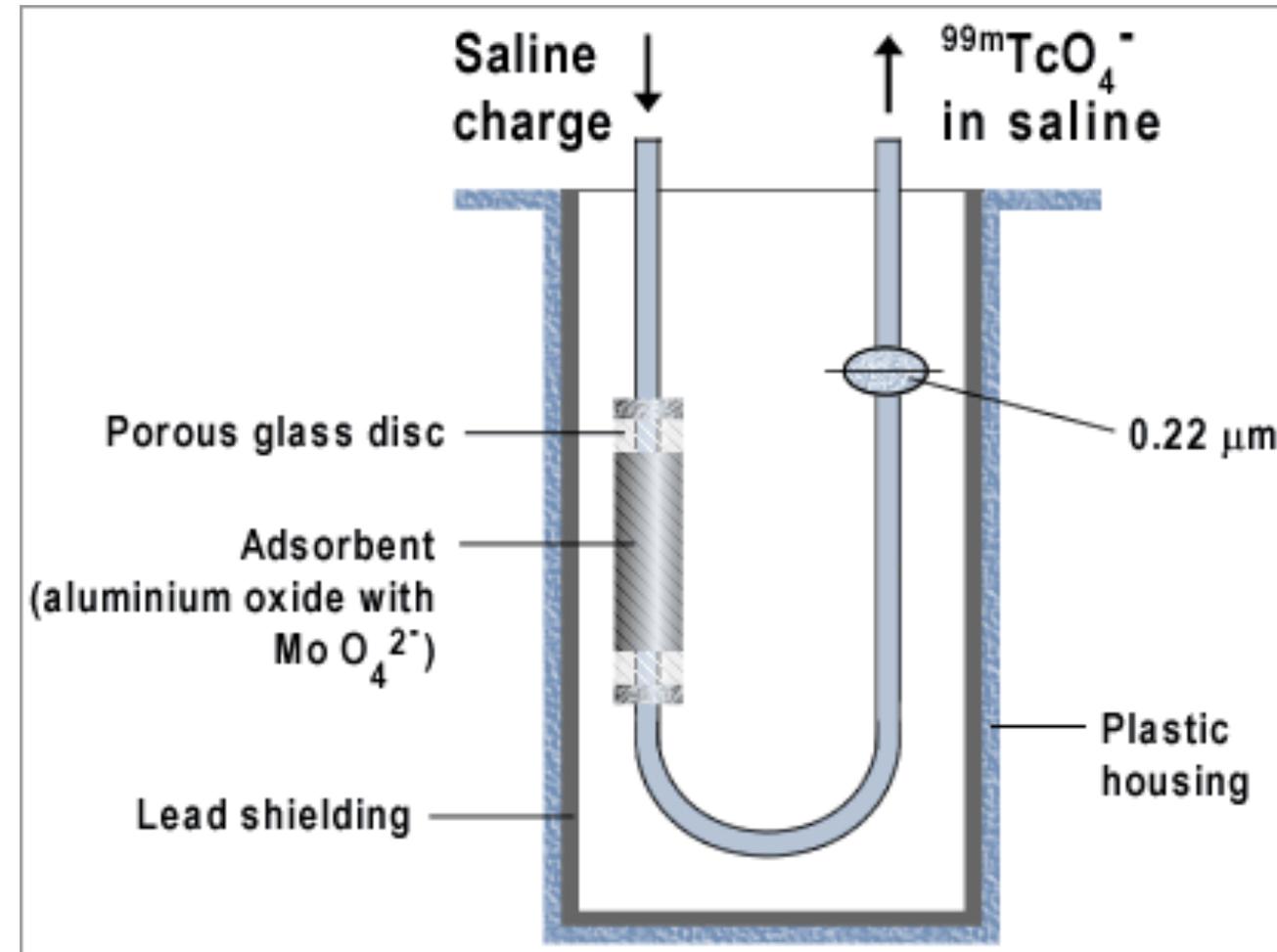
$^{99}\text{Mo}$  poi utilizzato per produrre  $^{99m}\text{Tc}$  tramite **generatore di tecnezio**, contenitore a colonna dove  $^{99}\text{Mo}$ , **nucleo genitore**, è adsorbito in ossido di alluminio



$^{99}\text{Mo}$  decade  $\beta^-$  in tecnezio metastabile che poi decade  $\gamma$  con  $\tau = 6 \text{ h}$ :  $^{99m}\text{Tc} \rightarrow ^{99}\text{Tc} + \gamma$

$\text{Tc}$ , **non** adsorbito in ossido di **Al** come **Mo**, viene poi estratto introducendo soluzione salina che prelevata, è ricca di **pertecnato di sodio** ( $\text{NaTcO}_4$ )

**"Generatore"** permette trasporto verso zone di utilizzo del  $^{99m}\text{Tc}$  sfruttando intermediazione  $^{99}\text{Mo}$ , che ha  $\tau \sim 10$  volte superiore



**Produzione radioisotopi richiede ottimizzazione tempi rispetto all'equilibrio, dovendo tener conto del decadimento del prodotto concomitante alla sua produzione**

- Come visto si può raggiungere equilibrio se rateo  $R$  della produzione coincide col valore assoluto del rateo di decadimento  $\lambda N(t)$

Ad es. si bombarda (reattore o acceleratore) campione di nuclei stabili con particelle che inducano trasmutazioni su  $R$  atomi/s verso elemento radioattivo che poi decade con cost.  $\lambda$

Bilanciamento fra  $R$  e  $-\lambda N(t)$   $\Rightarrow$   $\frac{dN(t)}{dt} = R - \lambda N(t)$  che se  $R = \text{cost.}$  diventa

$$\frac{d[\mathcal{R} - \lambda N(t)]}{\mathcal{R} - \lambda N(t)} = -\lambda dt$$

**Integrandola con la condizione**  $N(t=0) = 0$ , si ha

$$\mathcal{R} - \lambda N(t) = [\mathcal{R} - \lambda N(0)] e^{-\lambda t} \quad \Rightarrow \quad N(t) = \frac{\mathcal{R}}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t})$$

da cui

$$\mathcal{A}(t) = \lambda N(t) = \mathcal{R} (1 - e^{-\lambda t})$$

**andamento a saturazione, tipico quando formazione e decadimento sono in competizione**

Se irraggiamento è breve rispetto a  $\tau$  ( $t \ll \tau$ ), si espande exp. fino al termine lineare in  $t \Rightarrow A(t) \simeq R\lambda t$  :

**attività cresce a rateo  $\sim$  costante**

Accumulo nuclei prodotti quindi è  **$\sim$  lineare nel tempo** e **non** viene significativamente intaccato dai decadimenti

Per  $t \gg \tau$  **exp.  $\rightarrow 0$**  e attività si mantiene  **$\sim$  costante**

$$A \approx R, \quad \text{per } t \gg \tau$$

Esempio di **equilibrio secolare** !

- Se si irradia un campione per un certo tempo e poi lo si toglie dalla zona d'irraggiamento, da quel momento mostrerà diminuzione dell'attività con andamento exp. decrescente
- Per produrre campione utilizzabile è quindi sufficiente irradiare per tempo non superiore  **$\sim 2 \div 3$  vite medie**