

# FISICA IN MEDICINA: DA ROENTGEN ALLA TERAPIA CON ADRONI



Flavia Groppi – [Flavia.Groppi@mi.infn.it](mailto:Flavia.Groppi@mi.infn.it)

*Dipartimento di Fisica,*

*Laboratorio Acceleratori e Superconduttività Applicata – L.A.S.A.,  
via F.lli Cervi 201, I-20090 Segrate (MI)*



24/01/2025

La Fisica applicata alla salute



1

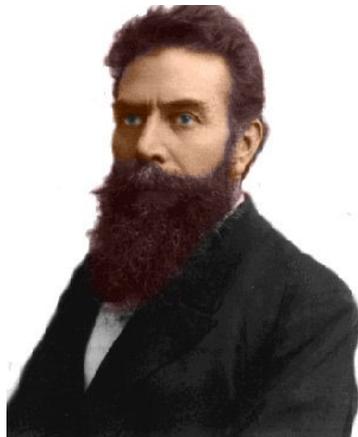
# La scoperta dei raggi X

*...tutto iniziò nel **ottobre 1895** con la scoperta di un fisico prussiano, **Wilhelm Roentgen**...*



Studiando il passaggio di corrente elettrica in un gas rarefatto, contenuto in un tubo di vetro in cui erano posti due elettrodi, notò la fuoriuscita di una **ignota** radiazione (**X**) che:

- è penetrante
- si attenua attraversando la materia
- produce fluorescenza
- impressiona lastre fotografiche
- non è deviata da campi elettrici e magnetici



Per questa scoperta **Roentgen** ricevette il **premio Nobel nel 1901**.

# LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITA'

Nel 1896

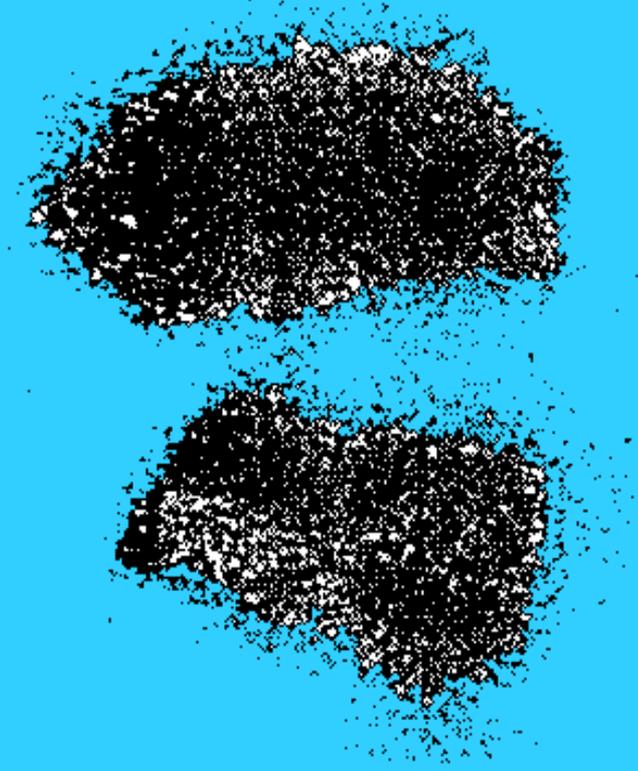
Henry Becquerel

scopre il **fenomeno della radioattività**.

Durante i suoi studi notò casualmente che sali di uranio posti accanto a lastre fotografiche, chiuse nei loro contenitori a prova di luce, ne provocavano **l'annerimento** e subito ne dedusse che tali sali dovevano emettere dei raggi sconosciuti, molto più penetranti di quelli luminosi, la cui natura era simile ai raggi X.

Annerimento della lastra fotografica provocata dai sali di uranio che Becquerel vi aveva inavvertitamente poggiato .

*16. 1. 1896. Solfato Doppio d'Uranio e di Potassio  
Pagine 201. Luigi B. L. L. L. L.  
Esposi in luce la 17. di cui l'immagine è 26. a  
P. 100. L. L. L.*

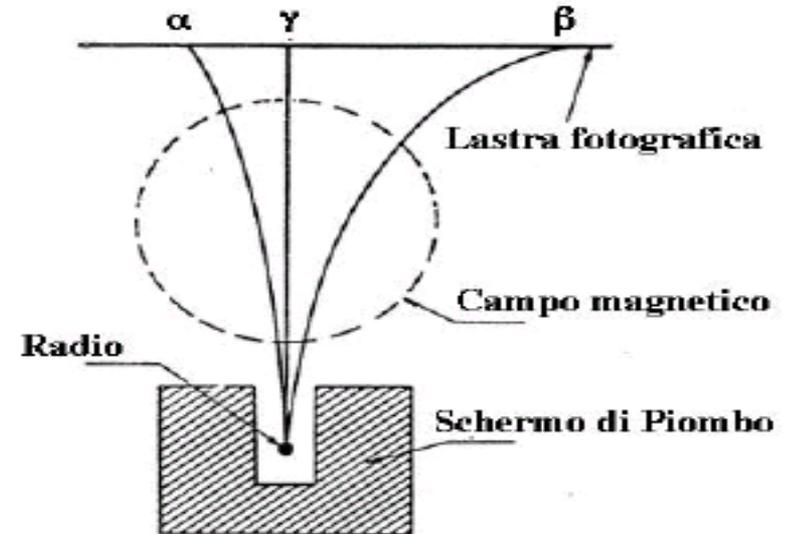


# LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITA'

## Marie Sklodowska Curie e Pierre Curie nel 1898

- scoprirono che anche altre sostanze godevano della stessa proprietà dell'uranio
- chiamarono tali sostanze radio (radium = raggio) attive;
- stabilirono la natura dei raggi emessi scoprendo che si trattava di 3 tipi di radiazioni: la prima costituita da particelle elettricamente cariche positivamente  $\alpha$  (alfa), la seconda cariche negativamente  $\beta$  (beta) e la terza neutra  $\gamma$  (gamma).

Comportamento in campo magnetico delle radiazioni emesse dal radio: le radiazioni  $\beta$  (carica  $-$ ) e quelle  $\alpha$  (carica  $+$ ) vengono deviate dal campo magnetico; quelle  $\gamma$ , di natura elettromagnetica, non vengono invece deviate.



## RADIOATTIVITA' ARTIFICIALE

A partire dal 1934 **Frédéric Joliot e Irène Curie** e **E. Fermi** compresero che sarebbe stato possibile rendere radioattive sostanze di per sé stabili irraggiandole opportunamente e ne furono subito chiare le possibili applicazioni mediche ed industriali.

# LE RADIAZIONI

## Che cosa sono le radiazioni:

Il termine radiazioni viene utilizzato per descrivere fenomeni fisici apparentemente diversi fra loro, quali la luce e il calore perfettamente percettibili dai sensi umani, la radiazione elettromagnetica, la radiazione cosmica, la radiazione artificiale, del tutto invisibile e impercettibile. Caratteristica comune a tutti i tipi di radiazione è la cessione di energia alla materia attraversata.

**L'assorbimento di energia** si manifesta in genere in un aumento **locale di temperatura**.

L'aumento di temperatura non è però l'unico effetto prodotto dall'assorbimento della radiazione nella materia.

**Infatti, la luce del sole può riscaldare i pannelli solari;**

**la luce può impressionare una lastra fotografica (questo il caso della fotografia e della diagnostica per immagini);**

**il calore può provocare un incendio;**

**le particelle ionizzanti possono danneggiare l'organismo umano, interferendo con i processi biologici, etc.**

# LE RADIAZIONI

Tali effetti sono diretta conseguenza dei processi fisici di eccitazione e **ionizzazione** dovute agli urti della radiazione ionizzante con la materia.

Le radiazioni si dicono **ionizzanti** quando hanno energia sufficiente per produrre il fenomeno fisico della ionizzazione che consiste nel far diventare un **atomo** elettricamente carico (ione). Nei tessuti biologici gli ioni generati dalle radiazioni ionizzanti possono avere influenza sui normali processi biologici.

A seconda che la ionizzazione del mezzo irradiato avvenga per via diretta o indiretta si usa distinguere tra

• **radiazioni direttamente ionizzanti** - particelle cariche (elettroni, particelle alfa, particelle beta, etc.)

• **radiazioni indirettamente ionizzanti** - fotoni (raggi X e raggi gamma), neutroni

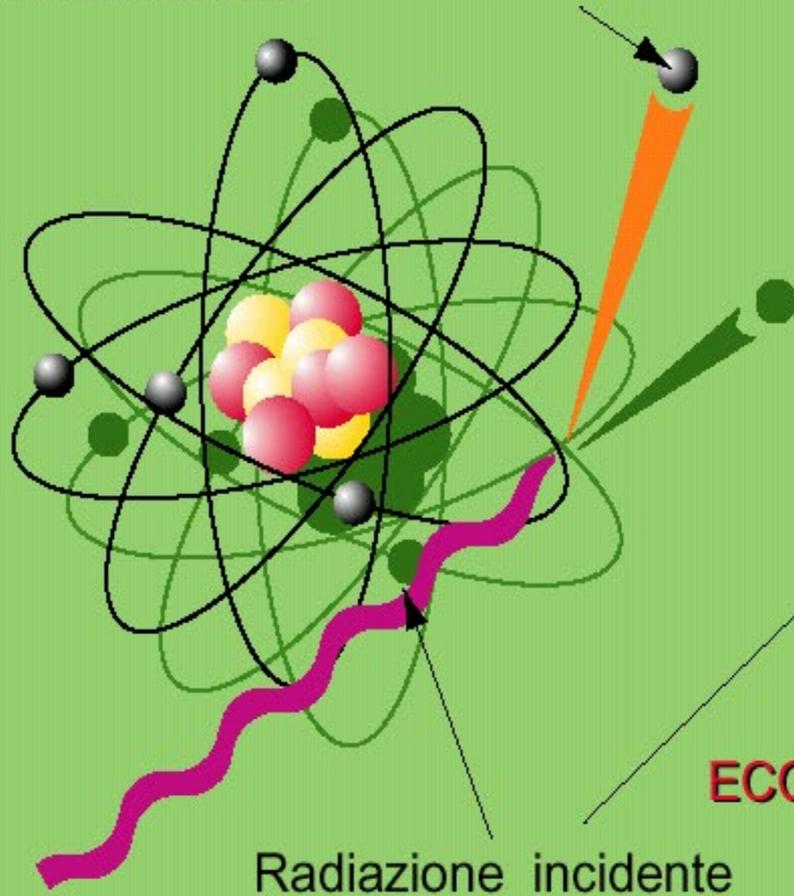
Le particelle cariche, dotate di massa e di carica elettrica, e i neutroni, dotati di massa ma non di carica elettrica, sono **radiazioni corpuscolari**;

I fotoni invece non hanno massa, né carica elettrica, sono **radiazioni elettromagnetiche** che si propagano con la velocità della luce.

# INTERAZIONI A LIVELLO ATOMICO

**IONIZZAZIONE**

Elettrone  
espulso dall'atomo



**ECCITAZIONE**

Elettrone in  
uno stato  
eccitato

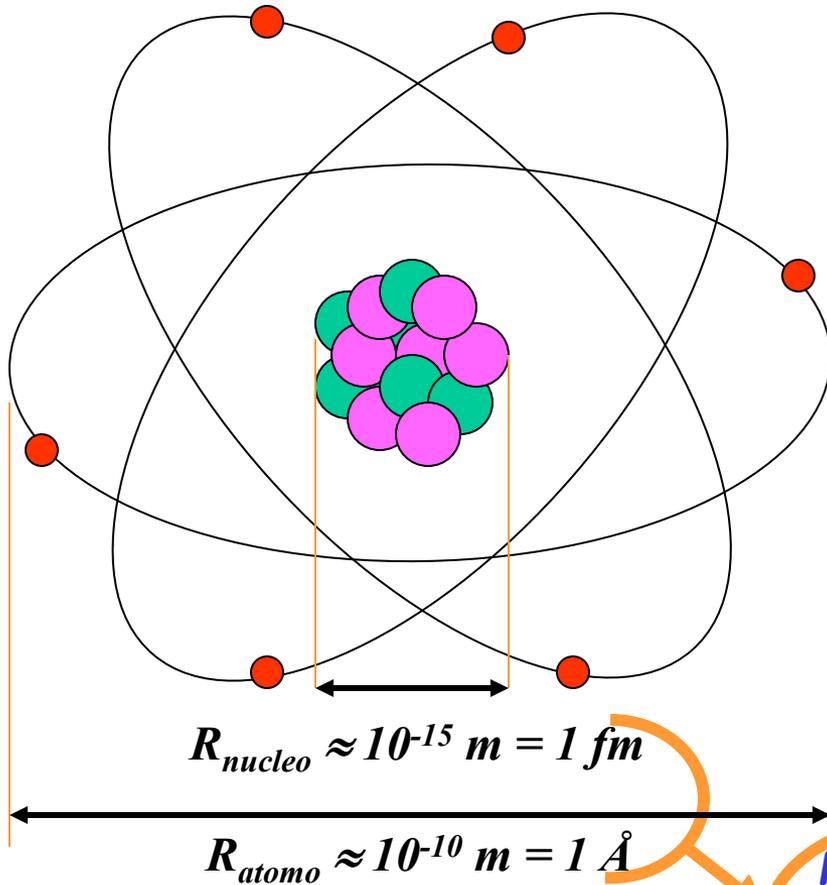


Radiazione incidente

Diseccitazione con  
emissione di luce



# L'atomo



**Z protoni**

$$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$q = +e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$



**N neutroni**

$$m_n = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$
$$q = 0$$



**Z elettroni**

$$m_e = 9.07 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$
$$q = -e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\frac{R_{atomo}}{R_{nucleo}} \approx 10^5 !$$

il nucleo è 100'000 volte più piccolo dell'atomo!

# Carica del nucleo

La carica dei nuclei è *positiva* e, se viene espressa come multiplo della carica del protone, è rappresentata da un numero intero che corrisponde al numero atomico.

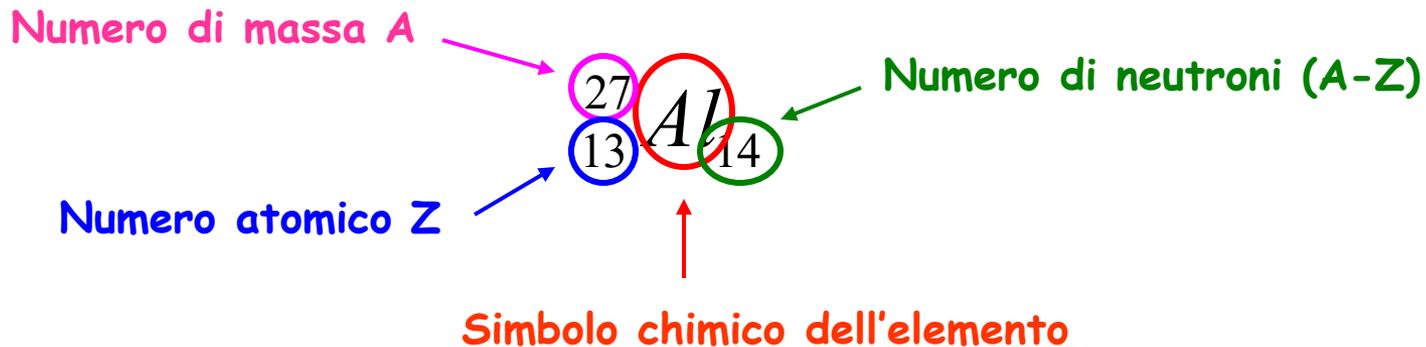
Esso rappresenta anche il numero d'ordine dell'elemento nella tavola periodica ed è uguale sia al numero di protoni presenti nel nucleo, sia al numero di elettroni presenti nell'atomo neutro.

|          |          |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |           |           |           |           |          |  |
|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|--|
| 1<br>H   |          |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          |          |           |           |           |           | 2<br>He  |  |
| 3<br>Li  | 4<br>Be  |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          | 5<br>B   | 6<br>C    | 7<br>N    | 8<br>O    | 9<br>F    | 10<br>Ne |  |
| 11<br>Na | 12<br>Mg |          |           |           |           |           |           |           |          |          |          | 13<br>Al | 14<br>Si  | 15<br>P   | 16<br>S   | 17<br>Cl  | 18<br>Ar |  |
| 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni | 29<br>Cu | 30<br>Zn | 31<br>Ga | 32<br>Ge  | 33<br>As  | 34<br>Se  | 35<br>Br  | 36<br>Kr |  |
| 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd | 47<br>Ag | 48<br>Cd | 49<br>In | 50<br>Sn  | 51<br>Sb  | 52<br>Te  | 53<br>I   | 54<br>Xe |  |
| 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57<br>La | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt | 79<br>Au | 80<br>Hg | 81<br>Tl | 82<br>Pb  | 83<br>Bi  | 84<br>Po  | 85<br>At  | 86<br>Rn |  |
| 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89<br>Ac | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt |          |          |          |          |           |           |           |           |          |  |
|          |          |          | 58<br>Ce  | 59<br>Pr  | 60<br>Nd  | 61<br>Pm  | 62<br>Sm  | 63<br>Eu  | 64<br>Gd | 65<br>Tb | 66<br>Dy | 67<br>Ho | 68<br>Er  | 69<br>Tm  | 70<br>Yb  | 71<br>Lu  |          |  |
|          |          |          | 90<br>Th  | 91<br>Pa  | 92<br>U   | 93<br>Np  | 94<br>Pu  | 95<br>Am  | 96<br>Cm | 97<br>Bk | 98<br>Cf | 99<br>Es | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>Lr |          |  |

Il numero totale di nucleoni contenuti in un nucleo è detto **numero di massa** e viene indicato con la lettera "A", il numero totale di protoni è detto **numero atomico** e viene indicato con la lettera "Z". Il numero di neutroni è dato da  $N=A-Z$ .

**Nuclide** è il nome che genericamente viene dato ad una specie nucleare caratterizzata da determinati valori di **A e Z**.

Per i nuclidi non stabili viene usato il termine **radionuclide**.



# ISOTONI

79

|   |  |   |   |   |   |  |
|---|--|---|---|---|---|--|
| <b>Au 189</b><br>4,6 m   28,3 m<br>ε;<br>β <sup>+</sup><br>γ 167;<br>320... | <b>Au 190</b><br>42,8 m<br>ε<br>β <sup>+</sup> 3,4...<br>γ 296; 302;<br>598... | <b>Au 191</b><br>1 s   3,18 h<br>ε<br>β <sup>+</sup> ...<br>γ 586;<br>278; 674;<br>284... | <b>Au 192</b><br>5,0 h<br>ε<br>β <sup>+</sup> 2,5...<br>γ 317; 296;<br>612... | <b>Au 193</b><br>3,9 s   17,65 h<br>ε;<br>β <sup>+</sup> ...<br>γ 186;<br>256;<br>268...<br>m | <b>Au 194</b><br>38,0 h<br>ε<br>β <sup>+</sup> 1,5...<br>γ 328; 294;<br>1469... | <b>Au 195</b><br>30,5 s   186,1 d<br>ε<br>γ 99...<br>e <sup>-</sup><br>g |
|---|--|---|---|---|---|--|

|  |   |  |   |                                    |  |                                      |
|--|---|--|---|------------------------------------|--|--------------------------------------|
| <b>Pt 188</b><br>10,2 d<br>ε<br>α 3,92<br>γ 188; 195;<br>382; 424... | <b>Pt 189</b><br>11 h<br>ε<br>γ 721; 608;<br>569; 243; 545... | <b>Pt 190</b><br>0,01<br>6,5 · 10 <sup>11</sup> a<br>α 3,17<br>σ 150 | <b>Pt 191</b><br>2,8 d<br>ε<br>γ 539; 409;<br>360...<br>g | <b>Pt 192</b><br>0,79<br>σ 2,0 + 6 | <b>Pt 193</b><br>4,33 d   ~ 50 a<br>ε<br>no γ<br>g | <b>Pt 194</b><br>32,9<br>σ 0,1 + 1,1 |
|--|---|--|---|------------------------------------|--|--------------------------------------|

77

|  |   |  |   |   |  |  |
|--|---|--|---|---|--|--|
| <b>Ir 187</b><br>10,5 h<br>ε<br>γ 913; 427;<br>401; 611... | <b>Ir 188</b><br>41,5 h<br>ε<br>β <sup>+</sup><br>γ 155; 2215;<br>633; 478... | <b>Ir 189</b><br>13,3 d<br>ε<br>γ 245; 70; 59...<br>g; m | <b>Ir 190</b><br>3,1 h   1,2 h   11,8 d<br>ε<br>γ 187;<br>605;<br>518;<br>558...; g | <b>Ir 191</b><br>4,94 s   37,3<br>ε<br>γ 129...<br>e <sup>-</sup> | <b>Ir 192</b><br>241 a   1,4 m   73,83 d<br>ε<br>β <sup>-</sup> 0,7<br>γ 317;<br>468...; g<br>σ 1500+? | <b>Ir 193</b><br>10,53 d   62,7<br>ε<br>γ (80)<br>e <sup>-</sup> |
|--|---|--|---|---|--|--|

ISOTOPI

Z

|   |                               |                                |  |   |  |   |
|---|-------------------------------|--------------------------------|--|---|--|---|
| <b>Os 186</b><br>1,58<br>2,0 · 10 <sup>15</sup> a<br>α 2,76<br>σ ~ 80 | <b>Os 187</b><br>1,6<br>σ 200 | <b>Os 188</b><br>13,3<br>σ ~ 5 | <b>Os 189</b><br>6 h   16,1<br>ε<br>γ (31)<br>e <sup>-</sup> | <b>Os 190</b><br>9,9 m   26,4<br>ε<br>γ 503;<br>617;<br>361;<br>187...<br>σ 12<br>+ 1 | <b>Os 191</b><br>13,10 h   15,4 d<br>ε<br>β <sup>-</sup> 0,1<br>m<br>σ 380 | <b>Os 192</b><br>6,1 s   41,0<br>ε<br>γ 569;<br>206;<br>453;<br>302;<br>485...<br>σ 2,0 |
|---|-------------------------------|--------------------------------|--|---|--|---|

|  |  |   |   |  |   |  |
|--|--|---|---|--|---|--|
| <b>Re 185</b><br>37,40<br>σ 0,34 + 114 | <b>Re 186</b><br>2 · 10 <sup>5</sup> a   89,25 h<br>ε<br>β <sup>-</sup> 1,1...<br>γ 137... | <b>Re 187</b><br>62,60<br>5 · 10 <sup>10</sup> a<br>β <sup>-</sup> 0,0026<br>no γ; σ 2,6 + 72 | <b>Re 188</b><br>18,6 m   16,98 h<br>ε<br>γ 64;<br>106...<br>e <sup>-</sup> | <b>Re 189</b><br>24,3 h<br>β <sup>-</sup> 2,1...<br>γ 155;<br>633... | <b>Re 190</b><br>3,0 h   3,1 m<br>β <sup>-</sup> ~ 1,8...<br>γ 119<br>γ 187;<br>558;<br>569...; g | <b>Re 191</b><br>9,8 m<br>β <sup>-</sup> 1,8 |
|--|--|---|---|--|---|--|

N

114

ISOBARI

**Isotopi** sono nuclidi aventi lo stesso numero di protoni, per es.



**Isotoni** sono nuclidi aventi lo stesso numero di neutroni, per es.



**Isobari** sono nuclidi aventi lo stesso numero di massa, per es.



**Isomeri** sono nuclidi aventi lo stesso valore di A e di Z, ma in differenti stati di energia.

# I decadimenti radioattivi

# *Introduzione*

La maggior parte dei nuclidi noti non sono stabili ma tendono a trasformarsi in nuclidi stabili emettendo determinate particelle e fotoni.

Questo fenomeno prende il nome di radioattività.

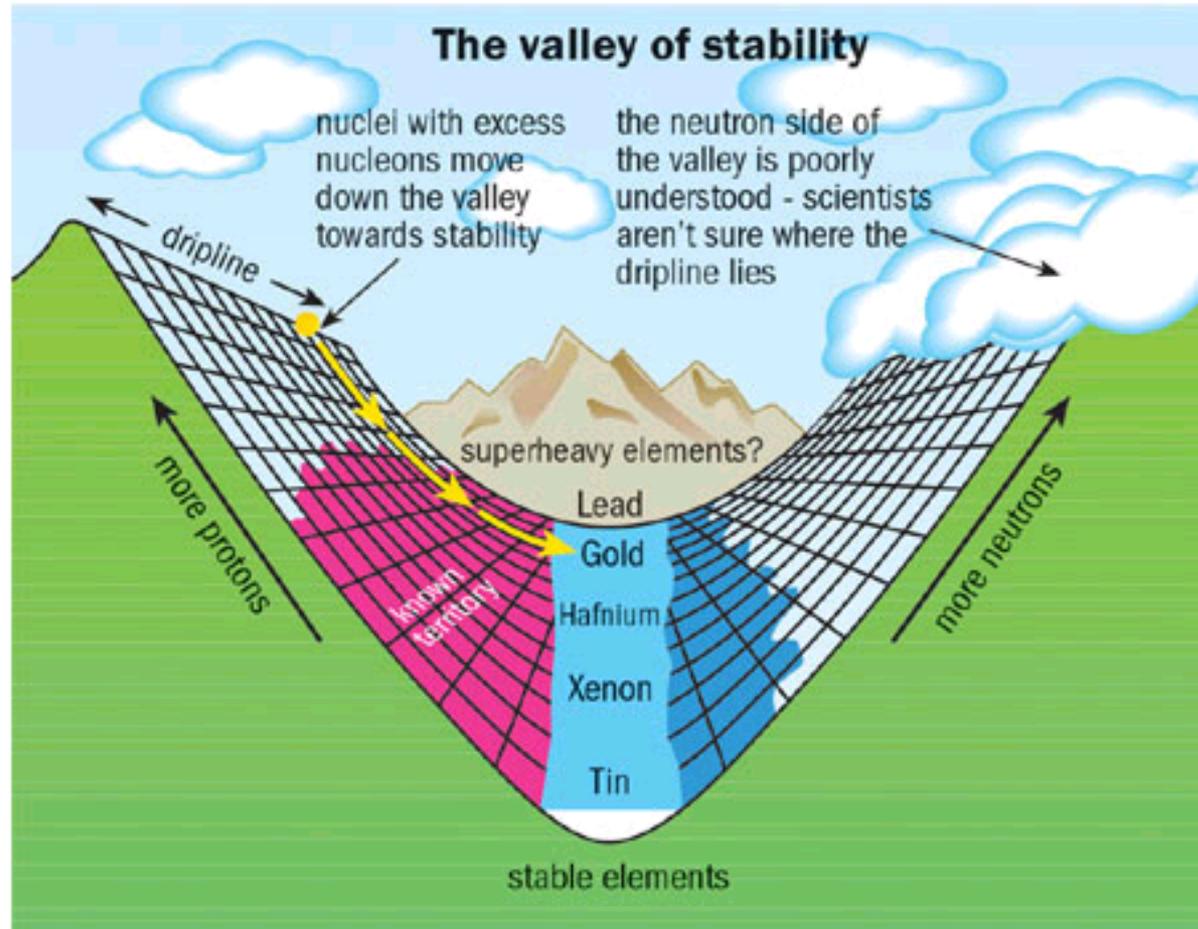
Affinchè una trasformazione nucleare avvenga spontaneamente è necessario che la massa del nuclide che si trasforma deve essere maggiore della massa dei prodotti.

I modi principali con cui un nucleo instabile può tendere ad una configurazione stabile sono il decadimento  $\alpha$ , il decadimento  $\beta$ , la cattura elettronica (EC), l'emissione di fotoni  $\gamma$ .

# DECADIMENTO RADIOATTIVO

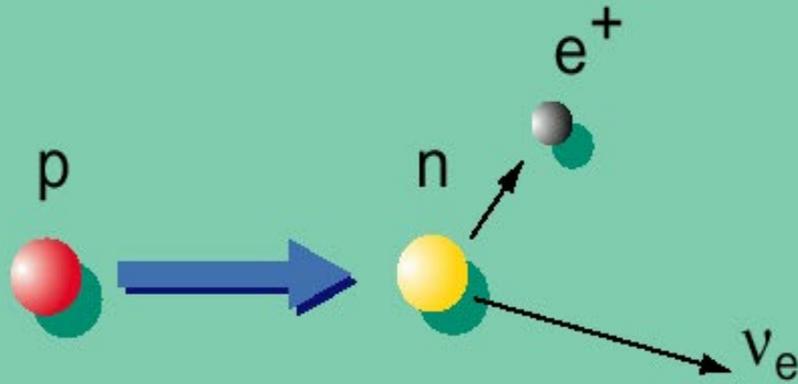
## The valley of stability

La tendenza verso elementi di massa minima porta ai decadimenti radioattivi

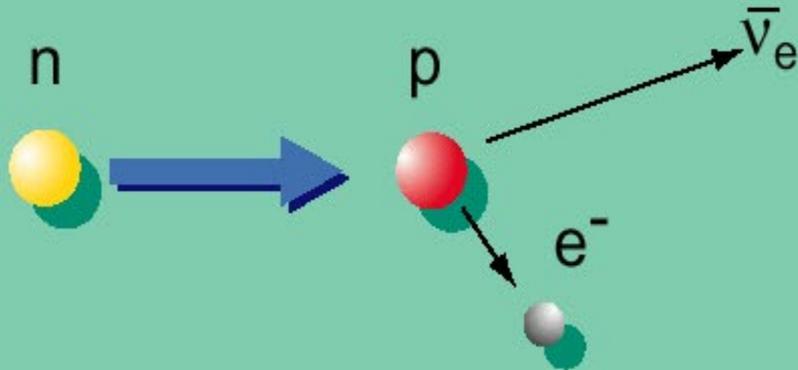


The "valley of stability" - new nuclear machines such as the Rare Isotope Accelerator will open up studies of nuclear phenomena using beams of short-lived isotopes, which form the high "walls" of the valley.

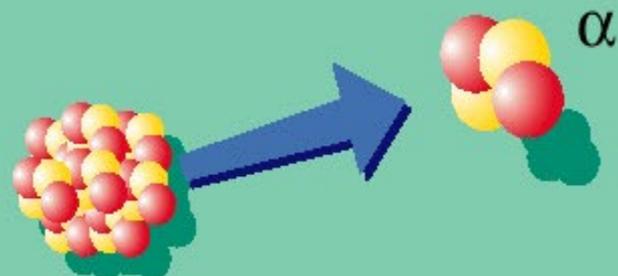
# SORGENTI RADIOATTIVE



decadimento  $\beta^+$



decadimento  $\beta^-$

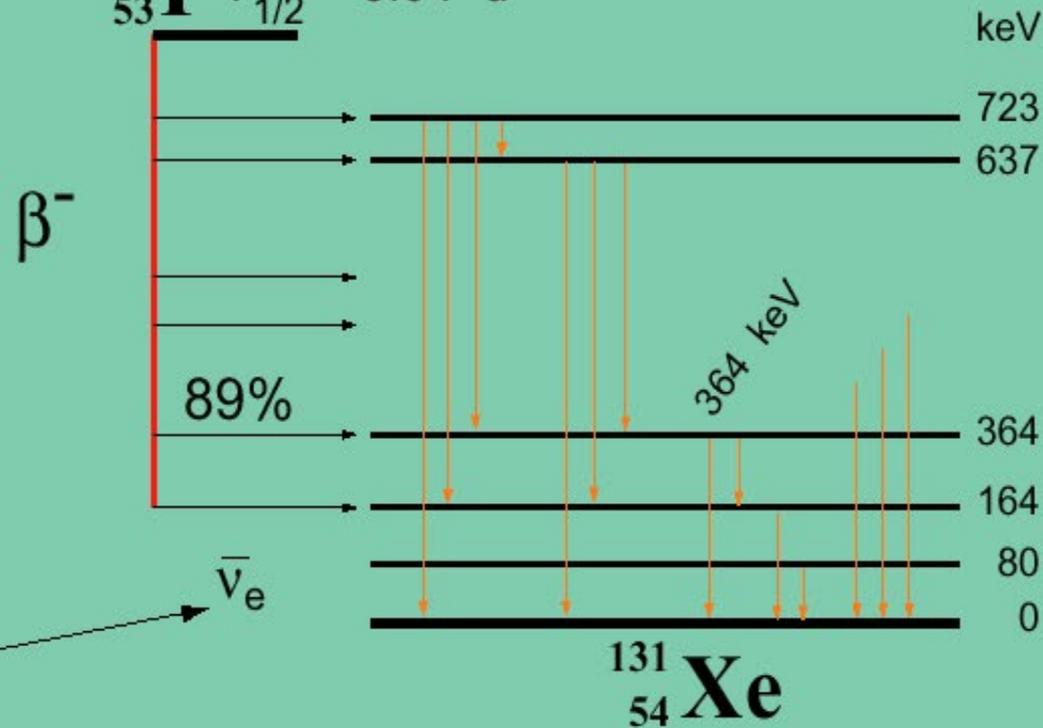
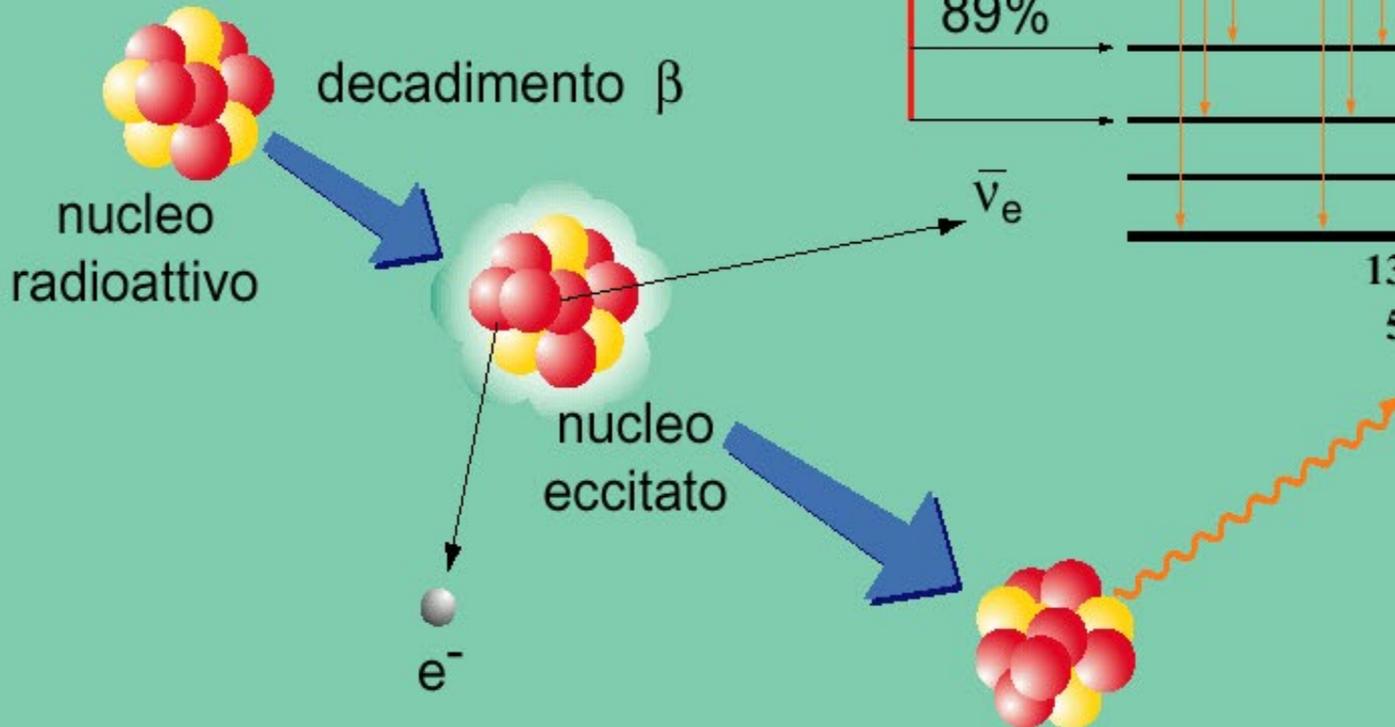


decadimento  $\alpha$

nucleo  
pesante

# EMISSIONE $\gamma$

$^{131}_{53}\text{I}$   $T_{1/2} = 8.04 \text{ d}$

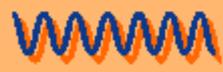


# RADIAZIONI

## ELETTROMAGNETICHE

## CORPUSCOLARI

| $\lambda$ (m) |                | $h\nu$ (eV) |
|---------------|----------------|-------------|
| $10^{-10}$    | raggi $\gamma$ | $10^4$      |
| $10^{-9}$     | raggi X        | $10^3$      |
| $10^{-8}$     | ultravioletto  | $10^2$      |
| $10^{-7}$     | luce visibile  | $10^1$      |
| $10^{-6}$     |                | $10^0$      |
| $10^{-5}$     | infrarosso     | $10^{-1}$   |
| $10^{-4}$     |                | $10^{-2}$   |
| $10^{-3}$     |                | $10^{-3}$   |
| $10^{-2}$     | micro-onde     | $10^{-4}$   |
| $10^{-1}$     |                | $10^{-5}$   |
| $10^0$        | TV, radio FM   | $10^{-6}$   |
| $10^1$        |                | $10^{-7}$   |
| $10^2$        | radio AM       | $10^{-8}$   |



|          | Q       | m(MeV) |
|----------|---------|--------|
| $\beta$  | $\pm 1$ | 0.511  |
| p        | +1      | 938    |
| d        | +1      | 1876   |
| $\alpha$ | +2      | 3727   |
| n        | 0       | 939.5  |

ioni pesanti, muoni, pioni, ...

# DECADIMENTO RADIOATTIVO

Le radiazioni **alfa e gamma**, emesse nei decadimenti radioattivi, hanno una **energia ben definita**.

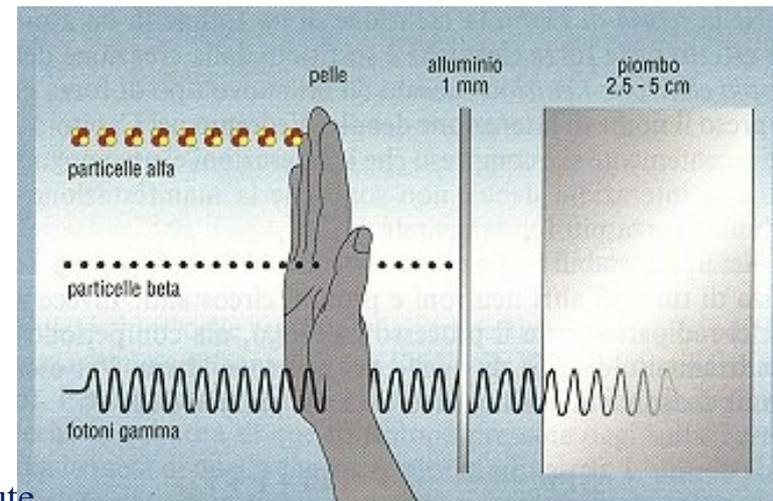
La radiazione **beta** ha invece uno **spettro energetico continuo**, che si estende fino ad una energia massima tipica di ciascun radionuclide.

L'energia media di questi elettroni è dell'ordine di un terzo dell'energia massima.

**Ciascun radionuclide si caratterizza per il tipo e l'energia delle particelle emesse il tempo di dimezzamento.**

I diversi tipi di emissioni radioattive, hanno diverse caratteristiche fisiche e di penetrazione:

e su ciò si basano gli innumerevoli impieghi in medicina, biologia, negli studi ambientali, nella ricerca, nei voli spaziali, nell'industria



# La legge di decadimento

La legge temporale del decadimento radioattivo permette di valutare quanti nuclidi di una popolazione sono soggetti al processo di decadimento.

Non è possibile stabilire l'istante in cui un nucleo instabile decade, ma si può solo parlare di probabilità che il decadimento avvenga in un dato intervallo di tempo.

Il decadimento di tutte le sostanze radioattive avviene seguendo la **stessa legge temporale** indipendentemente dal tipo di emissione radioattiva.

La probabilità che un nucleo decada nell'unità di tempo è costante nel tempo ed è una caratteristica di un dato nuclide.

Essa prende il nome di *costante di decadimento*  $\lambda$ .

Le sue dimensioni sono  $[T^{-1}]$ .

**è caratteristica della sostanza in esame e del tipo di decadimento;**

**non è influenzata dalla popolazione di atomi presente, in quanto ogni decadimento è un processo indipendente;**

**non è influenzata da altri parametri fisici, quali temperatura ...**

La probabilità che un nuclide decada in un intervallo di tempo  $dt$  è quindi data da  $\lambda \cdot dt$ .

## Tempo di dimezzamento

Si definisce **tempo di dimezzamento** ( $T_{1/2}$ ) di un radionuclide l'intervallo di tempo dopo il quale la metà degli atomi  $N_0$  originari è decaduta e quindi il numero di atomi ancora presenti si è ridotto a  $N_0/2$ .

Anche il tempo di dimezzamento (come la costante di decadimento) dipende dal radionuclide considerato.

## Tempo di vita media

Si definisce **tempo di vita media** ( $\tau$ ) il tempo in cui in media vivono i nuclei di un dato radionuclide.

*N.B.: la vita reale di un radionuclide (cioè il tempo dopo il quale il nucleo decade) può variare, essendo il decadimento puramente casuale, fra zero e infinito; tuttavia, considerando un numero molto elevato di nuclei, il valore medio dei vari tempi di esistenza della specie considerata rappresenta una quantità ben definita.*

La vita media di un radionuclide è definita come segue:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0.693} = 1.443 \cdot T_{1/2}$$

**relazione che lega tra loro tutte e tre le grandezze.**

# Attività di una sorgente

Si definisce **attività** di una sorgente il numero di disintegrazioni nucleari che avvengono nell'unità di tempo:

$$A = \lambda \cdot N$$

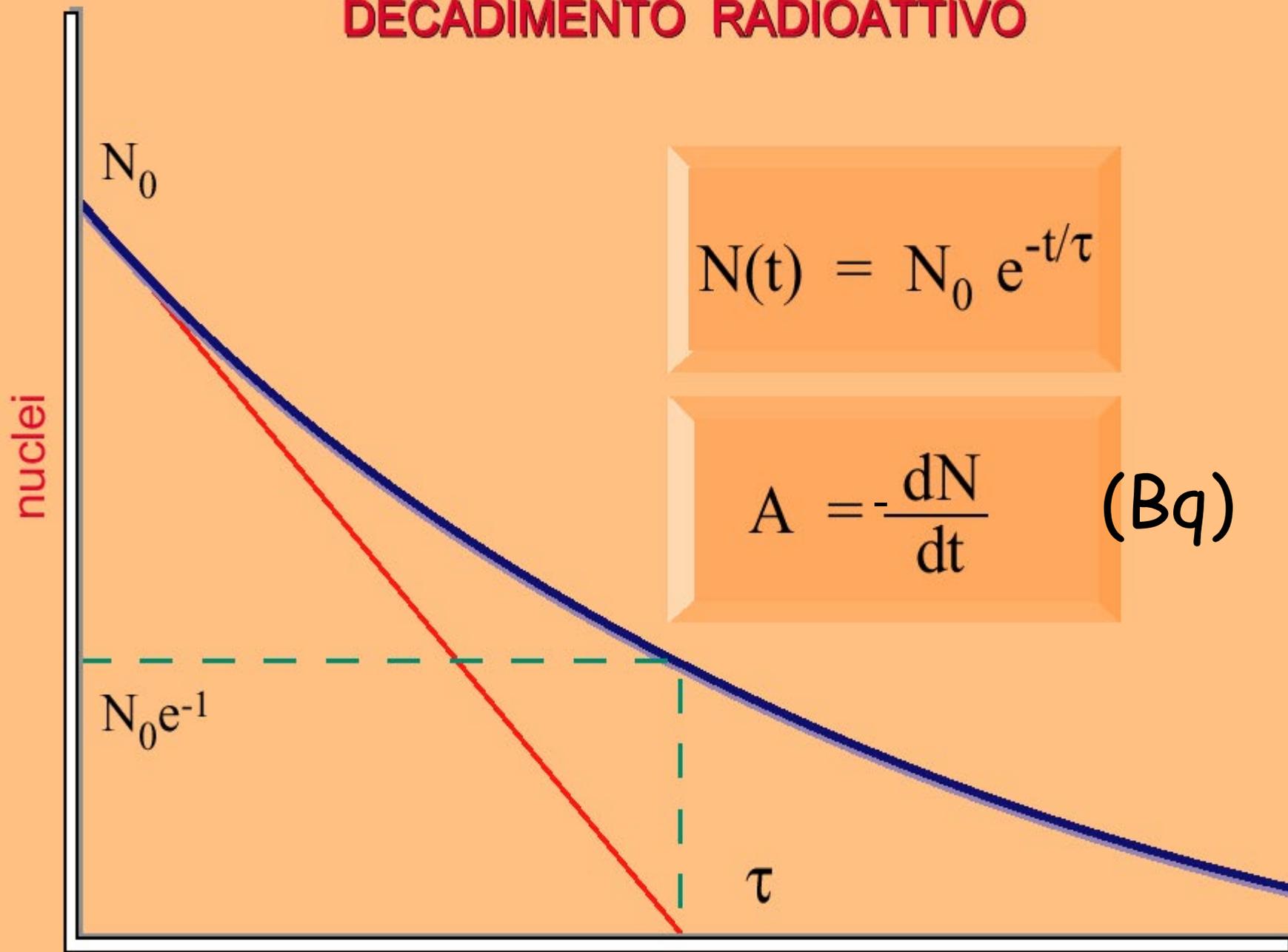
Unità di misura:

- **Curie (Ci) =  $3.7 \cdot 10^{10}$  disintegrazioni/secondo.**

Si usano più frequentemente i suoi sottomultipli mCi ( $10^{-3}$  Ci) e  $\mu$ Ci ( $10^{-6}$  Ci).

- **Becquerel (Bq) = 1 disintegrazione/secondo**

# DECADIMENTO RADIOATTIVO



# GRANDEZZE USATE IN RADIOPROTEZIONE

**Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorchè si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. In particolare il danno subito dai tessuti biologici è in relazione all'energia assorbita per unità di massa.**

La grandezza che tiene conto di questo fatto è la **DOSE ASSORBITA**, quantità dimensionalmente uguale ad una energia [Joule] assorbita per unità di massa [kg].

La radiazione in definitiva cede energia alla materia, ma cedere energia significa aumentare la temperatura.

La dose potrebbe essere misurata con un calorimetro.

Tuttavia se conferisco:

**10 Gray a 70 kg di acqua** ne aumento la temperatura di **2.4 millesimi di grado**;

**10 Gray ad un uomo di 70 kg lo UCCIDO!!!!**

Se si sta al sole, si assorbono, a livello cutaneo, energie dell'ordine di **100 Gray al secondo senza per altro morire.**

# GRANDEZZE USATE IN RADIOPROTEZIONE

**Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si manifestano soltanto allorchè si verifica una cessione di energia al mezzo attraversato. In particolare il danno subito dai tessuti biologici è in relazione all'energia assorbita per unità di massa.**

$$D = \Delta E/m$$

La grandezza che tiene conto di questo fatto è la **DOSE ASSORBITA**, quantità dimensionalmente uguale ad una energia [Joule] assorbita per unità di massa [kg] ma la si misura in **Gray**.

La radiazione in definitiva cede energia alla materia, ma cedere energia significa aumentare la temperatura.

La dose potrebbe essere misurata con un calorimetro.

Tuttavia se conferisco:

**10 Gray a 70 kg di acqua** ne aumento la temperatura di **2.4 millesimi di grado**;  
**10 Gray ad un uomo di 70 kg lo UCCIDO!!!!**

Se si sta al sole, si assorbono, a livello cutaneo, energie dell'ordine di **100 Gray al secondo senza per altro morire.**

# GRANDEZZE USATE IN RADIOPROTEZIONE



**NON** è l'ENERGIA “**DI PER SE**” ASSORBITA che provoca l'effetto  
ma è il “**MODO**” con il quale viene assorbita

Per definire gli effetti biologici, che la radiazione ionizzante produce nel nostro organismo, la **DOSE ASSORBITA NON** è un buon indice.

Si osserva che:

- **radiazioni diverse generano effetti diversi;**
- **diversi organi sono sensibili alle radiazioni in modo diverso.**

Si definiscono le “**grandezze radiobiologiche**”

- |                           |                      |           |
|---------------------------|----------------------|-----------|
| • <b>dose equivalente</b> | $H_T = \sum w_R D_R$ | [Sievert] |
| • <b>dose efficace</b>    | $E = \sum w_T H_T$   | [Sievert] |

# DOSE EQUIVALENTE

- La dose equivalente è definita come la dose assorbita moltiplicata per il fattore di peso della radiazione.
- Il fattore di peso della radiazione è stato stimato in base al danno prodotto nel nostro tessuto
- L'unità di misura è il **Sivert**

| Radiation type                    | Radiation weight factor |
|-----------------------------------|-------------------------|
| X-rays                            | 1                       |
| $\gamma$ -zrake                   | 1                       |
| Electrons and positrons           | 1                       |
| Neutrons                          | Energy dependence       |
| Protons 2 MeV                     | 2                       |
| $\alpha$ particles and heavy ions | 20                      |

$$H_T = \sum w_R D_R$$

$H_T$  – Dose Equivalente

$D_R$  – Dose assorbita

$w_R$  – Fattori peso di radiazione

# DOSE EFFICACE

- La dose efficace è definita come la dose equivalente moltiplicata per il fattore di peso del tessuto
- Tale numero si basa sulla radiosensibilità dell'organo
- L'unità di misura è il **Sivert**

$$E = \sum w_T H_T$$

$$E = \sum w_T \sum w_R D_R$$

E – Dose efficace

$H_T$  – Dose equivalente

$w_T$  – fattori peso tissutali

| Organs            | Tissue weighting factors |                    |                     |
|-------------------|--------------------------|--------------------|---------------------|
|                   | ICRP30(I36)<br>1979      | ICRP60(I3)<br>1990 | ICRP103(I6)<br>2007 |
| Gonads            | 0.25                     | 0.20               | 0.08                |
| Red Bone Marrow   | 0.12                     | 0.12               | 0.12                |
| Colon             | -                        | 0.12               | 0.12                |
| Lung              | 0.12                     | 0.12               | 0.12                |
| Stomach           | -                        | 0.12               | 0.12                |
| Breasts           | 0.15                     | 0.05               | 0.12                |
| Bladder           | -                        | 0.05               | 0.04                |
| Liver             | -                        | 0.05               | 0.04                |
| Oesophagus        | -                        | 0.05               | 0.04                |
| Thyroid           | 0.03                     | 0.05               | 0.04                |
| Skin              | -                        | 0.01               | 0.01                |
| Bone surface      | 0.03                     | 0.01               | 0.01                |
| Salivary glands   | -                        | -                  | 0.01                |
| Brain             | -                        | -                  | 0.01                |
| Remainder of body | 0.30                     | 0.05               | 0.12                |

# LE SORGENTI NATURALI DI RADIAZIONI IONIZZANTI

Com'è noto, la radioattività è una normale componente dell'ambiente naturale. L'uomo è stato costantemente esposto alle radiazioni di origine naturale fin dal suo apparire sulla terra e queste sono rimaste l'unica fonte di irradiazione fino a circa un secolo fa. Ancora adesso, malgrado il largo impiego di sostanze radioattive artificiali e di impianti radiogeni di vario genere, la radioattività naturale continua a fornire il maggior contributo alla dose ricevuta dalla popolazione mondiale ed è assai improbabile che ciò non continui a verificarsi anche in futuro.

Nella radioattività naturale si distinguono:

Componente  
terrestre:



radionuclidi cosiddetti primordiali presenti in varie quantità nei materiali inorganici della crosta terrestre (rocce, minerali) fin dalla sua formazione.

Componente  
extra-terrestre



- raggi cosmici
- radionuclidi cosmogenici.

**Quando ci si riferisce a tutte queste sorgenti si parla di  
fondo naturale di radiazioni.**

# Raggi cosmici

I raggi cosmici provengono, per la maggior parte, dal profondo spazio interstellare e sono costituiti principalmente da **particelle cariche positivamente:**

**protoni (85%), alfa (14%) e nuclei pesanti, con energie di parecchi MeV,** che quando giungono in prossimità della terra, risentono dell'azione derivante dal campo magnetico terrestre.

I flussi sono modulati dal vento solare e dai campi magnetici interplanetari.

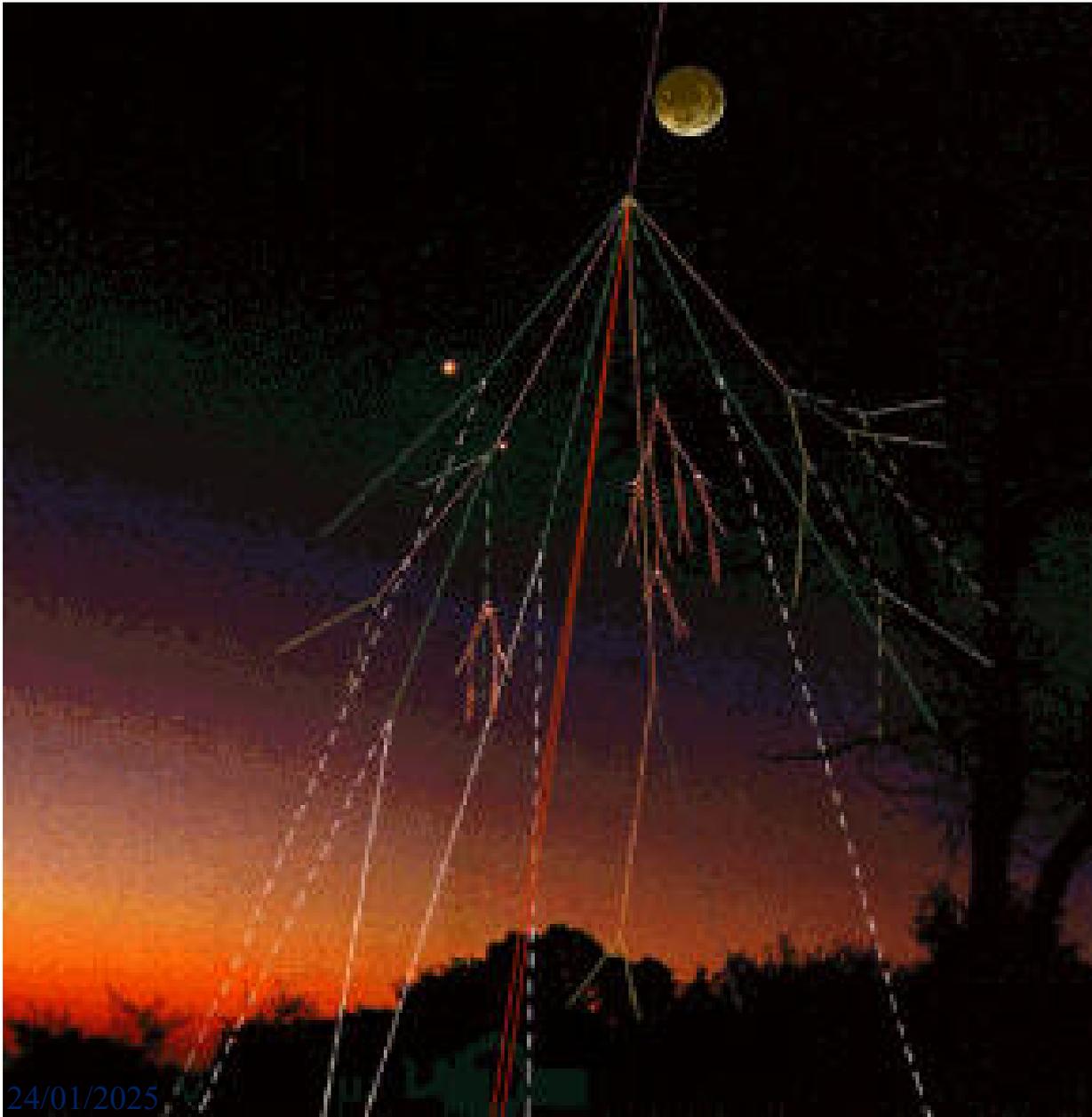
C'è anche una componente solare che trae origine dalle esplosioni nucleari sul sole e consiste ancora di protoni e particelle cariche positive.

I raggi cosmici sono in gran parte intrappolati nel campo magnetico terrestre in due zone:

**prima: a circa 1 RAGGIO terrestre dalla superficie, è popolata principalmente da protoni con energie di qualche centinaio di MeV;**

**seconda: più esterna a 4 RAGGI terrestri, è popolata principalmente da elettroni con energia media di circa 7 MeV.**

# Raggi cosmici



livello di dose aumenta con l'altitudine, con il ridursi dello spessore d'aria che fa da schermo:

a livello del mare è di circa 0.4 mSv/anno; raddoppia ogni circa 1500 metri.

# Raggi cosmici

Ai poli il contributo di dose dovuto ai raggi cosmici è maggiore rispetto alle zone equatoriali, per effetto dell'azione del campo magnetico terrestre.

Il livello di dose dovuta ai raggi cosmici livello di dose aumenta con l'altitudine, con il ridursi dello spessore d'aria che fa da schermo: a livello del mare è di circa 0.4 mSv/anno; raddoppia ogni circa 1500 metri; a 10 km di altitudine, l'esposizione alla radiazione cosmica è quasi 100 volte più elevata di quella a livello del mare.

L'atmosfera produce infatti al livello del mare una protezione equivalente a quella di uno schermo di calcestruzzo di circa 4 m di spessore, mentre alla quota di 10000 m l'effetto di schermaggio si riduce a circa 1 m.

L'esposizione alla radiazione cosmica è di notevole interesse per gli equipaggi degli aerei destinati ai voli intercontinentali.

Per i piloti e assistenti di volo questi livelli, dell'ordine di 5 mSv/h costituiscono un problema reale, soprattutto se effettuano voli con rotte polari.

# Raggi cosmici

| Route                             | Subsonic flight at 36,000 ft<br>(11 km) |                        |             | Supersonic flight at 62,000 ft<br>(19 km) |                        |             |
|-----------------------------------|---|------------------------|-------------|---|------------------------|-------------|
|                                   | Flight<br>duration<br>(hrs)             | Dose per round<br>trip |             | Flight<br>duration<br>(hrs)               | Dose per round<br>trip |             |
|                                   |   | (mrad)                 | ( $\mu$ Gy) |   | (mrad)                 | ( $\mu$ Gy) |
| <b>Los Angeles -<br/>Paris</b>    | 11.1                                    | 4.8                    | 48          | 3.8                                       | 3.7                    | 37          |
| <b>Chicago - Paris</b>            | 8.3                                     | 3.6                    | 36          | 2.8                                       | 2.6                    | 26          |
| <b>New York -<br/>Paris</b>       | 7.4                                     | 3.1                    | 31          | 2.6                                       | 2.4                    | 24          |
| <b>New York -<br/>London</b>      | 7.0                                     | 2.9                    | 29          | 2.4                                       | 2.2                    | 22          |
| <b>Los Angeles -<br/>New York</b> | 5.2                                     | 1.9                    | 19          | 1.9                                       | 1.3                    | 13          |
| <b>Sydney -<br/>Acapulco</b>      | 17.4                                    | 4.4                    | 44          | 6.2                                       | 2.1                    | 21          |

# Radionuclidi cosmogenici

Sono prodotti principalmente dalla interazione dei raggi cosmici con i nuclei presenti nell'atmosfera.

Si formano prevalentemente per l'interazione di neutroni. Ad esempio:

C-12 (n,2n) C-11

C-12 (n,2n  $\alpha$ ) Be-7 ; N-14 (n,p) C-14

## Dati relativi ad alcuni radionuclidi cosmogenici (dati UNSCEAR 82)

| Radionuclide | Tempo di dimezzamento | Numero totale di atomi prodotti nell'atmosfera per unità di tempo e di superficie terrestre ( $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | Inventario globale (PBq) | Attività per unità di volume di aria ( $\mu\text{Bq m}^{-3}$ ) | Attività per unità di volume nelle acque della superficie continentale ( $\text{Bq m}^{-3}$ ) | Attività specifica nella biosfera terrestre ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) |
|--------------|-----------------------|---|--------------------------|--|---|---|
| H-3          | 12.3 a                | 2500  | 1300                     |  | 200 ÷ 900   |   |
| Be-7         | 53.6 g                | 810   | 37                       | 3000   |   |   |
| C-14         | 5730 a                | 16000 ÷ 25000   | 8500                     |  |   | 230   |
| Na-22        | 2.62 a                | 0.86  | 0.4                      | 0.3  |   |   |

# Radionuclidi primordiali

I principali radionuclidi primordiali sono quelli riportati in tabella e le famiglie radioattive naturali dell'Uranio, del Torio e dell'Attinio.

| Radionuclide  | $T_{1/2}$ (anni)    | Principali radiazioni emesse |
|---------------|---------------------|------------------------------|
| <b>K-40</b>   | $1.3 \cdot 10^9$    | $\beta, \gamma$              |
| <b>Rb-87</b>  | $5 \cdot 10^{10}$   | $\beta$                      |
| <b>La-138</b> | $1.1 \cdot 10^{11}$ | $\beta, \gamma$              |
| <b>Sm-147</b> | $1.3 \cdot 10^{11}$ | $\alpha$                     |
| <b>Lu-176</b> | $3 \cdot 10^{10}$   | $\beta, \gamma$              |
| <b>Re-187</b> | $5 \cdot 10^{10}$   | $\beta$                      |

La radioattività naturale fornisce il maggior contributo alla dose collettiva ricevuta dalla popolazione mondiale.

Da questo punto di vista i radionuclidi più importanti sono quelli appartenenti alle famiglie **dell'Uranio, del Torio e il K-40.**

# Le serie radioattive naturali

In natura esistono 3 serie radioattive naturali i cui capostipiti sono:



Queste "famiglie" radioattive sono costituite da un insieme di nuclidi che si susseguono dopo l'emissione  $\alpha$  da parte di uno dei capostipiti.

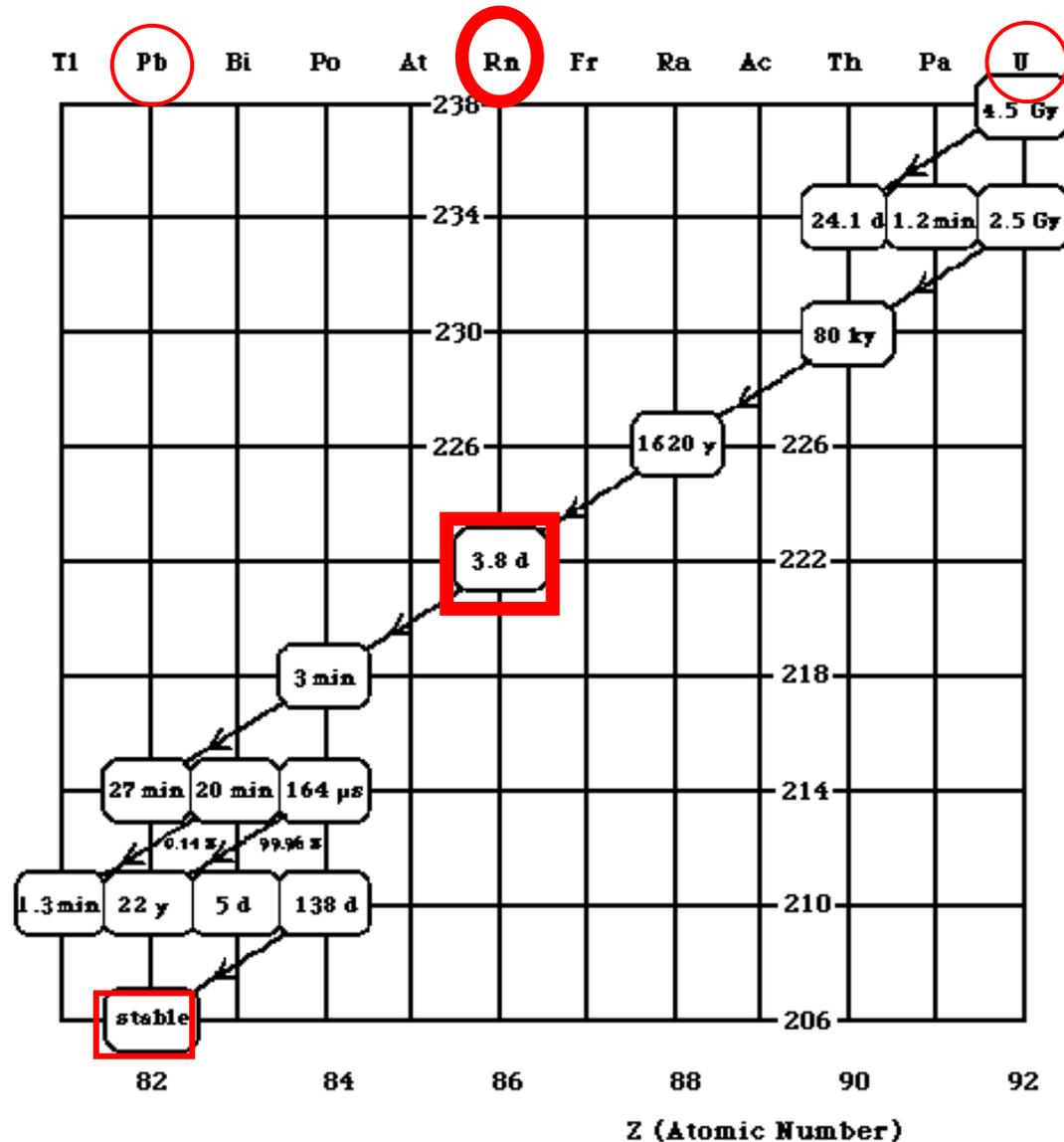
## Caratteristiche comuni:

- i capostipiti hanno **tempi di dimezzamento assai elevati** (dell'ordine dei miliardi di anni), tempi confrontabili con l'età stimata per la Terra (4.5 miliardi di anni)
- tutti i prodotti di decadimento hanno vite medie assai più brevi rispetto a quelle dei capostipiti delle famiglie vale la condizione di equilibrio secolare !
- nella catena di ciascuna famiglia è sempre presente un radionuclide gassoso: **Rn-222** ( $t_{1/2}=3.8$  d) - radon, **Rn-220** ( $t_{1/2}=55$  s) - toron, **Rn-219** ( $t_{1/2}=4$  s) - attrinon.
- La presenza di questi gas radioattivi costituisce una delle principali ragioni della diffusione della radioattività ambientale.
- tutte e tre le serie terminano in isotopi stabili del Piombo

# La serie dell' $^{238}\text{U}$

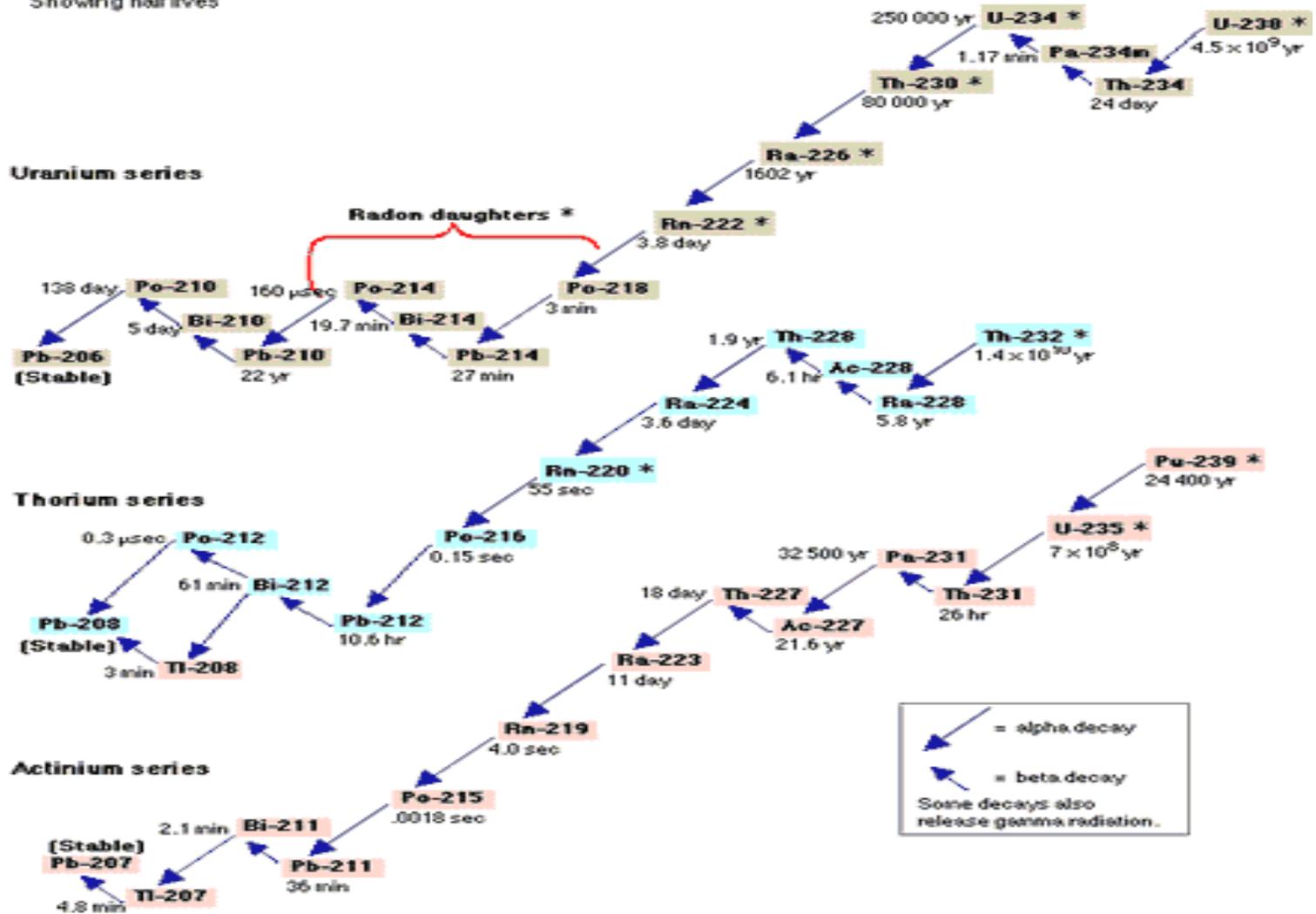
**URANIUM 238 (U238)  
RADIOACTIVE DECAY**

| type of radiation | nuclide          | half-life                    |
|-------------------|------------------|------------------------------|
|                   | uranium—238      | $4.5 \times 10^9$ years      |
| $\alpha$          | thorium—234      | 24.5 days                    |
| $\beta$           | protactinium—234 | 1.14 minutes                 |
| $\beta$           | uranium—234      | $2.33 \times 10^5$ years     |
| $\alpha$          | thorium—230      | $8.3 \times 10^4$ years      |
| $\alpha$          | radium—226       | 1590 years                   |
| $\alpha$          | radon—222        | 3.825 days                   |
| $\alpha$          | polonium—218     | 3.05 minutes                 |
| $\alpha$          | lead—214         | 26.8 minutes                 |
| $\beta$           | bismuth—214      | 19.7 minutes                 |
| $\beta$           | polonium—214     | $1.5 \times 10^{-4}$ seconds |
| $\alpha$          | lead—210         | 22 years                     |
| $\beta$           | bismuth—210      | 5 days                       |
| $\beta$           | polonium—210     | 140 days                     |
| $\alpha$          | lead—206         | stable                       |



# Le tre serie naturali

Some radioactive decay series  
Showing half lives



**Notes:**

1. In a uranium orebody, the U-238 series represents almost 95% of the radioactivity.
2. The level of radioactivity of an isotope is inversely proportional to its half life. The shorter-lived each kind of radioisotope, the more radiation it emits per unit mass. Th-232, U-235 and U-238 are thus virtually stable.

\* Specifically mentioned in text or footnote.

# Radionuclidi primordiali

La concentrazione dei radionuclidi naturali nel **suolo e nelle rocce** varia fortemente da luogo a luogo in dipendenza della conformazione geologica delle diverse aree. In generale le rocce ignee e i graniti contengono U-238 in concentrazioni più elevate delle rocce sedimentarie come il calcare e il gesso. Alcune rocce sedimentarie di origine marina possono però contenere U-238 in concentrazione assai elevata. L'uranio, come anche il torio, è più abbondante nelle rocce acide che in quelle basiche.

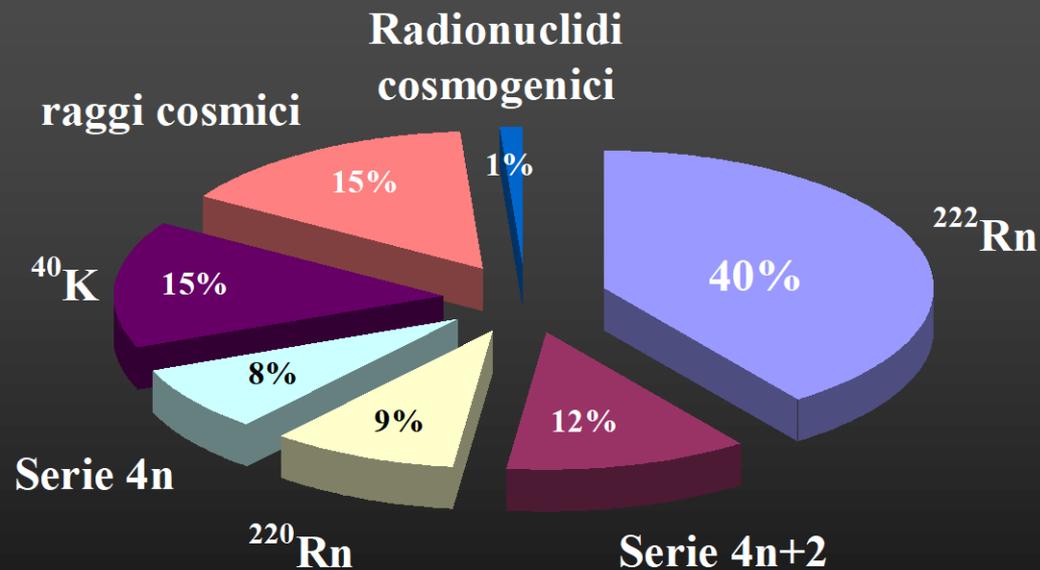
Tipici valori di concentrazioni di attività nel suolo sono compresi tra:  
100 ÷ 7 00 Bq . kg<sup>-1</sup> per il K-40;  
10 ÷ 50 Bq . kg<sup>-1</sup> per i radionuclidi delle serie radioattive dell'U-238 e del Th-232.

Anche le **acque** contengono una certa quantità di radioattività, dovuta sia alle piogge che trasportano le sostanze radioattive dell'aria, sia alle acque di drenaggio che convogliano nei bacini idrici sostanze radioattive presenti nelle rocce e nel suolo.

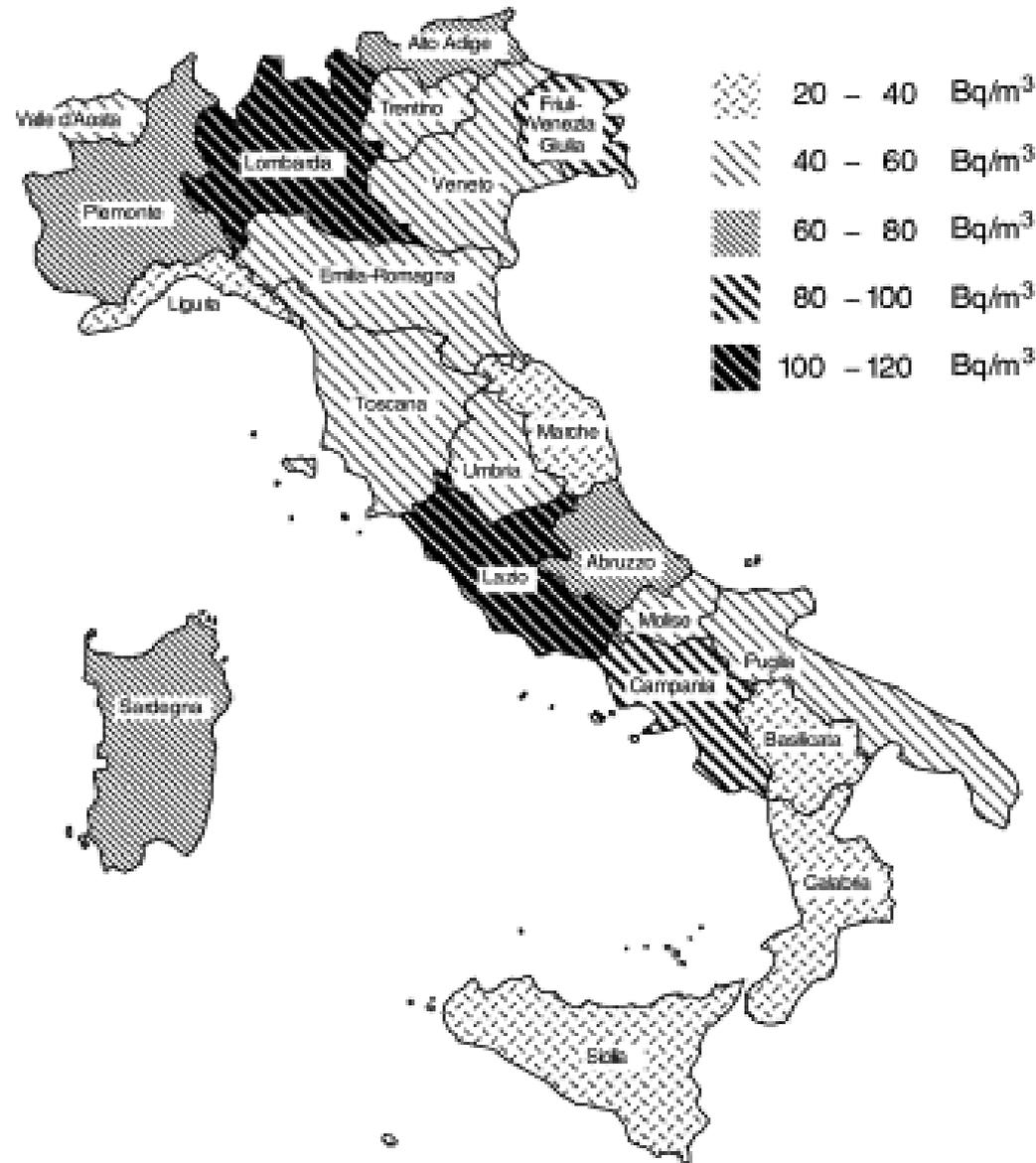
Significativamente radioattive sono le acque calde solfuree usate negli impianti termali, per produrre elettricità e per riscaldare gli edifici.

## ...perché esiste un "problema" Radon ?

...perché la frazione maggiore dell'esposizione alla radioattività naturale si deve all'inalazione dei prodotti di decadimento a vita breve di Radon e Thoron che si trovano sia in atmosfera sia nell'aria indoor

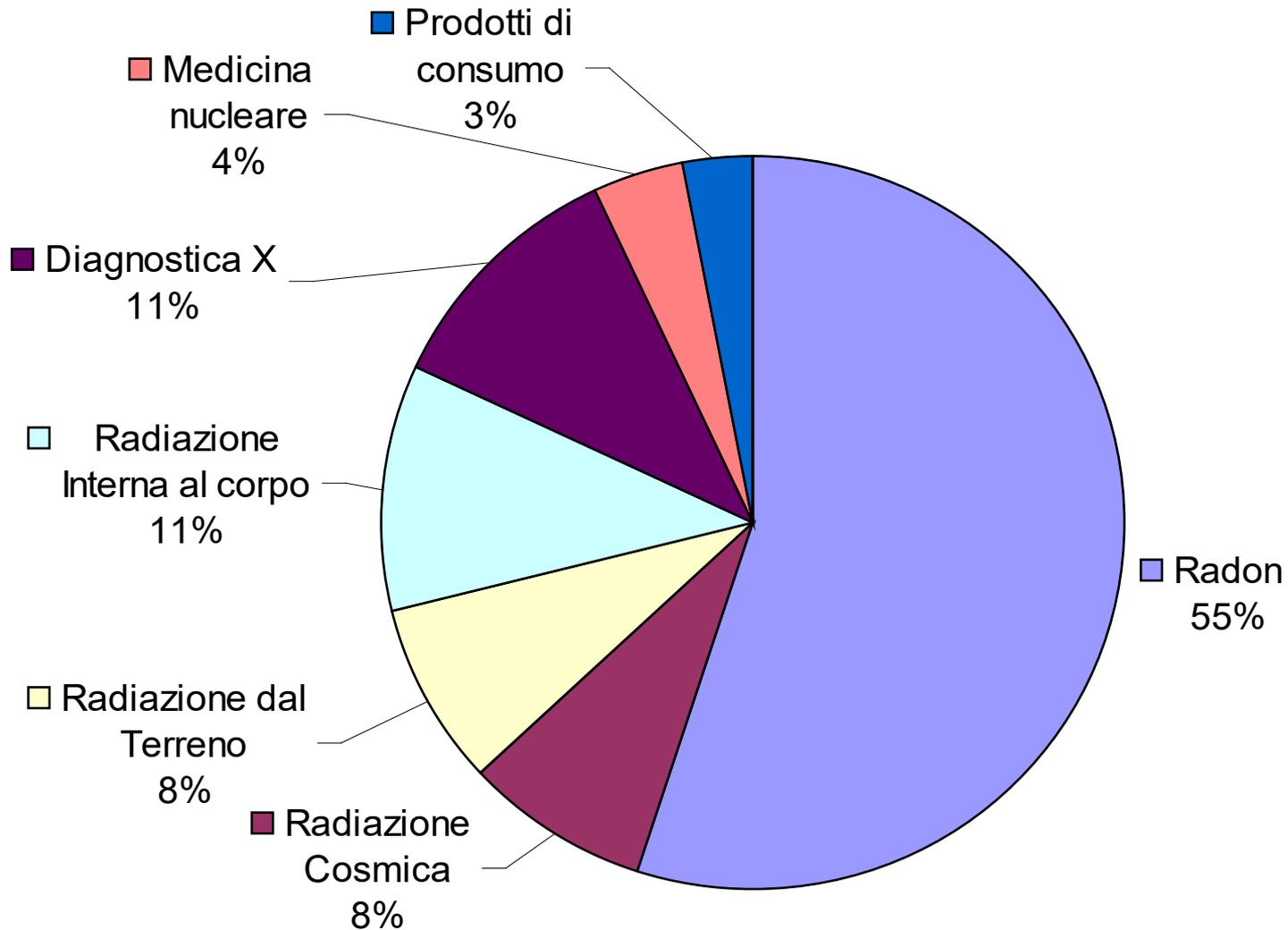


# CONCENTRAZIONI DI RADON ABITAZIONI ITALIANE



# Radioattività ambientale

## Contributi Percentuali alla Radioattività Ambientale

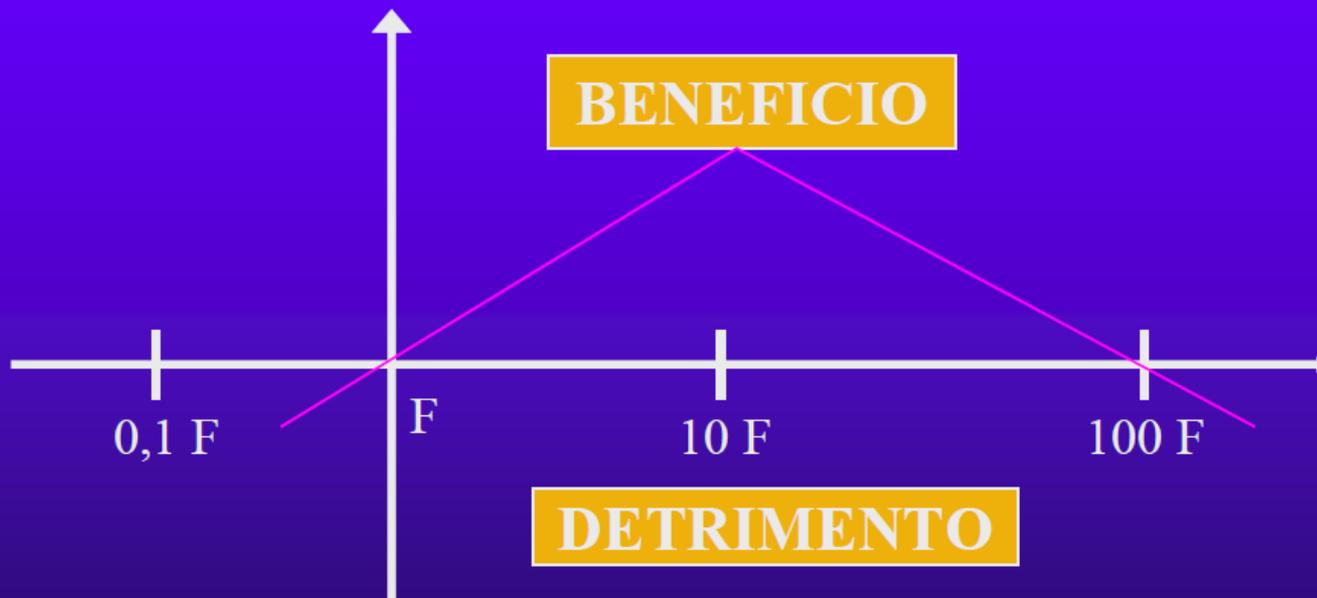


# Radioattività in diversi materiali

| <b>Materiale</b>   | <b>Attività (Bq)</b> |
|--|----------------------|
| 1 uomo adulto  | 7000                 |
| 1 kg di caffè  | 1000                 |
| 1 kg di fertilizzante superfosfato                           | 5000                 |
| L'aria in 100 m <sup>2</sup> di una casa Australiana (radon) | 3000                 |
| 1 rivelatore di fumo domestico                               | 30.000               |
| Radioisotopi a scopi di diagnostica medica                   | 70 milioni           |
| Sorgente radioattiva per terapia medica                      | 100.000.000 milioni  |
| 1 kg di rifiuto nucleare vetrificato da 50 anni              | 10.000.000 milioni   |
| Segnalazione luminosa di “ <b>Uscita</b> ” (1970s)           | 1.000.000 milioni    |
| 1 kg di uranio   | 25 milioni           |
| 1 kg di rifiuti radioattivi di bassa attività                | 1 milione            |
| 1 kg di cenere di carbone                                    | 2000                 |
| 1 kg di granito  | 1000                 |

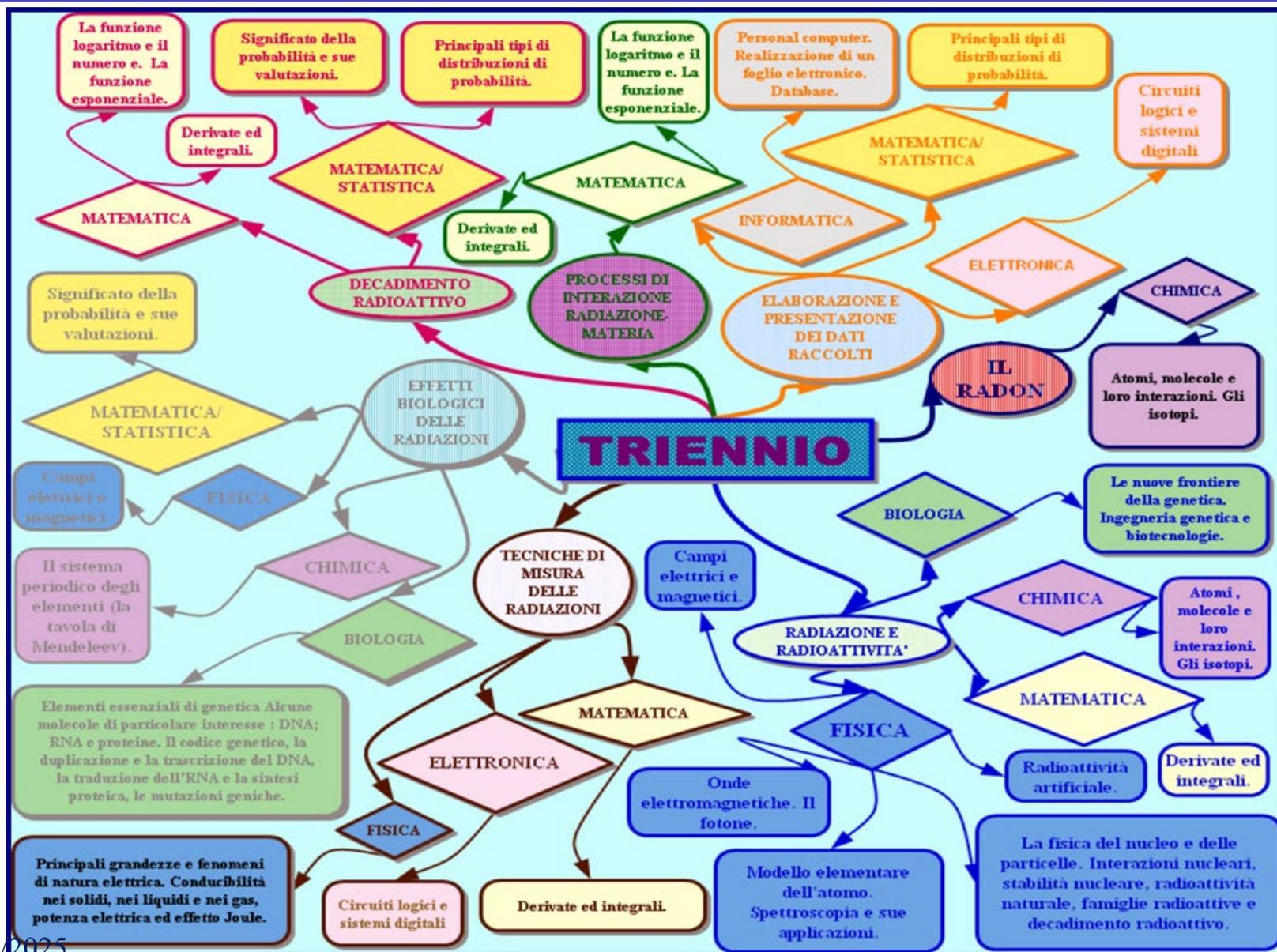
# ORMESI

Teoria secondo la quale agenti riconosciuti nocivi o letali ad alte dosi possono invece produrre effetti benefici a basse dosi.



Secondo alcune ricerche, in particolare sull'esposizione a radon, dosi comprese fra il fondo naturale e 100 volte il fondo comporterebbero vari tipi di "benefici sanitari" per gli individui esposti.

# Mappa concettuale delle materie scolastiche che possono essere coinvolte con il progetto RADIOLAB



# Radioattività artificiale – settore medico

**Attualmente le applicazioni in questo settore costituiscono la seconda causa di esposizione della popolazione alle radiazioni ionizzanti e la maggior fonte di esposizione alle radiazioni artificiali**

**Mediando sull'intera popolazione** del globo, il contributo **aggiuntivo** alla dose efficace è stimabile intorno a

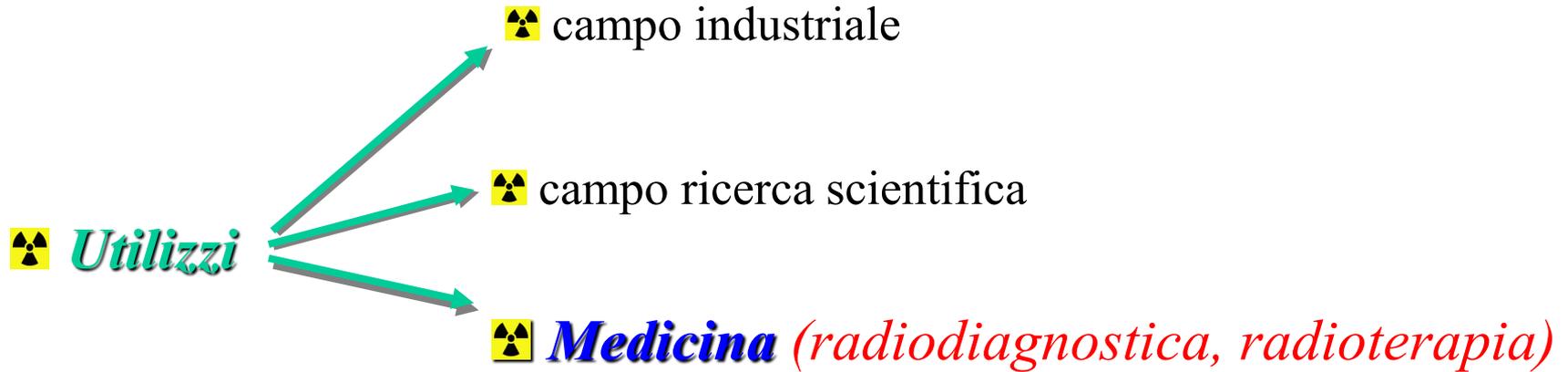
**0.6 mSv/a**

Se valutato sulla **media della popolazione dei paesi più industrializzati** (che sono quelli che **UTILIZZANO** e/**ma SUBISCONO** queste radiazioni) il contributo sale a

**1.5 mSv/a**



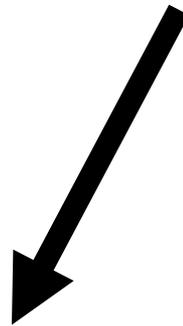
# *La Radioattività artificiale*



**In Nord America (USA + Canada) vengono compiute 20 milioni di indagini radiodiagnostiche all'anno mediante radionuclidi (escluse radiografie e TAC) e centinaia di migliaia di radioterapie metaboliche; stessi numeri in Europa e Giappone. I Paesi dell'Est Europeo e quelli emergenti si stanno adeguando rapidamente !**

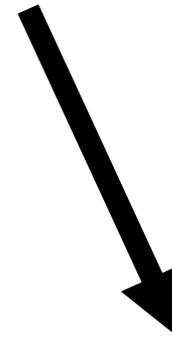
# Fisica e Medicina

In particolare le radiazioni ionizzanti  
rivestono un ruolo determinante



**diagnostica**

Le radiazioni permettono di  
“vedere” all’interno del  
corpo umano



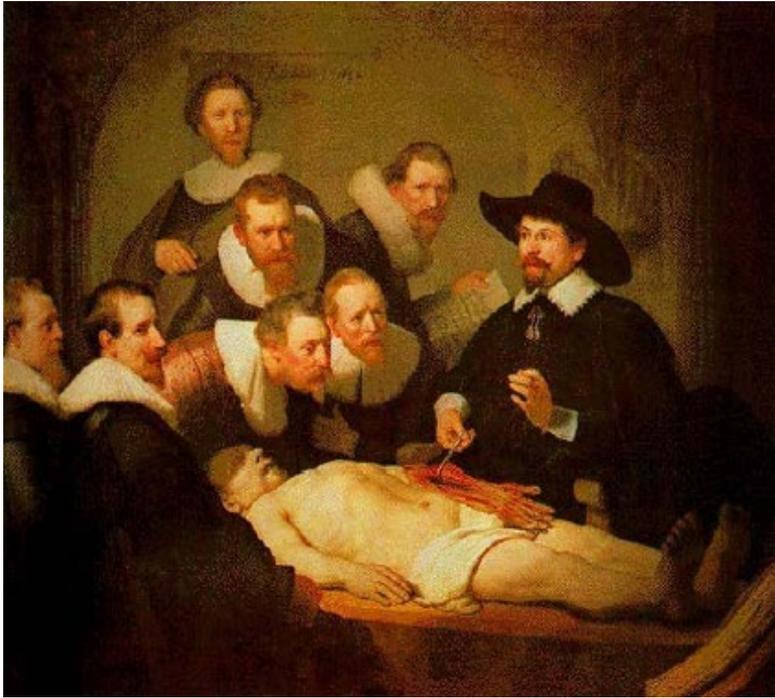
**terapia dei tumori**

La cessione di energia nei tessuti  
danneggia il DNA delle cellule tumorali  
e le elimina

# **Diagnostica per immagini con le radiazioni ionizzanti**

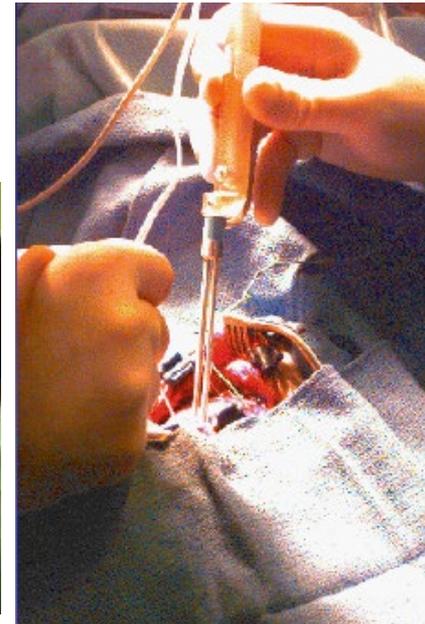
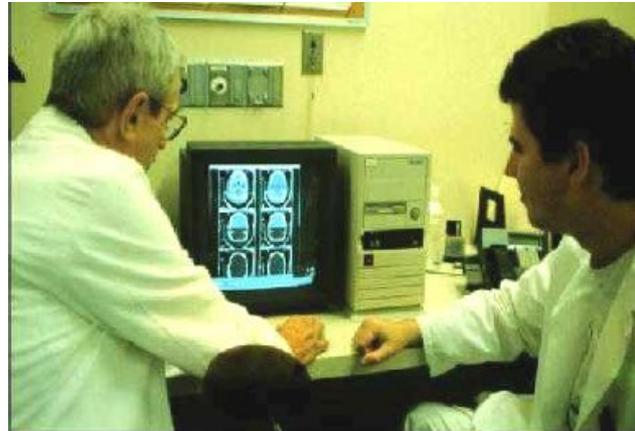
**Radiologia convenzionale,  
TAC, PET**

# Diagnostica per immagini



**Nel Passato:**  
**prima taglia e poi guarda**

**Nel Presente:**  
**prima guarda e poi taglia**

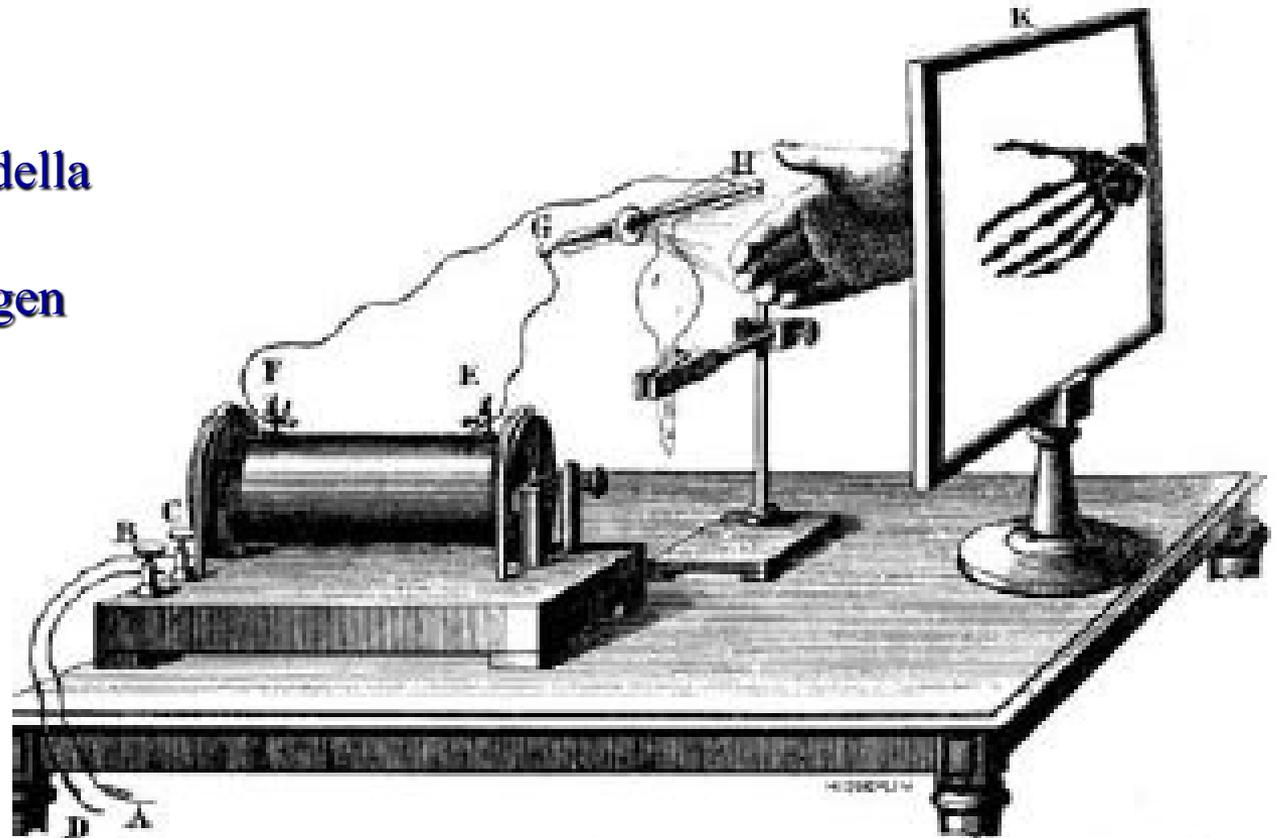


# Tutte le modalità diagnostiche prevedono le seguenti componenti:

- una **SORGENTE** (esterna, interna)
- un **CAMPO** di **RADIAZIONE**;
- un **TARGET**;
- un **RIVELATORE**;
- un sistema di **acquisizione** e di **analisi** dell'immagine.

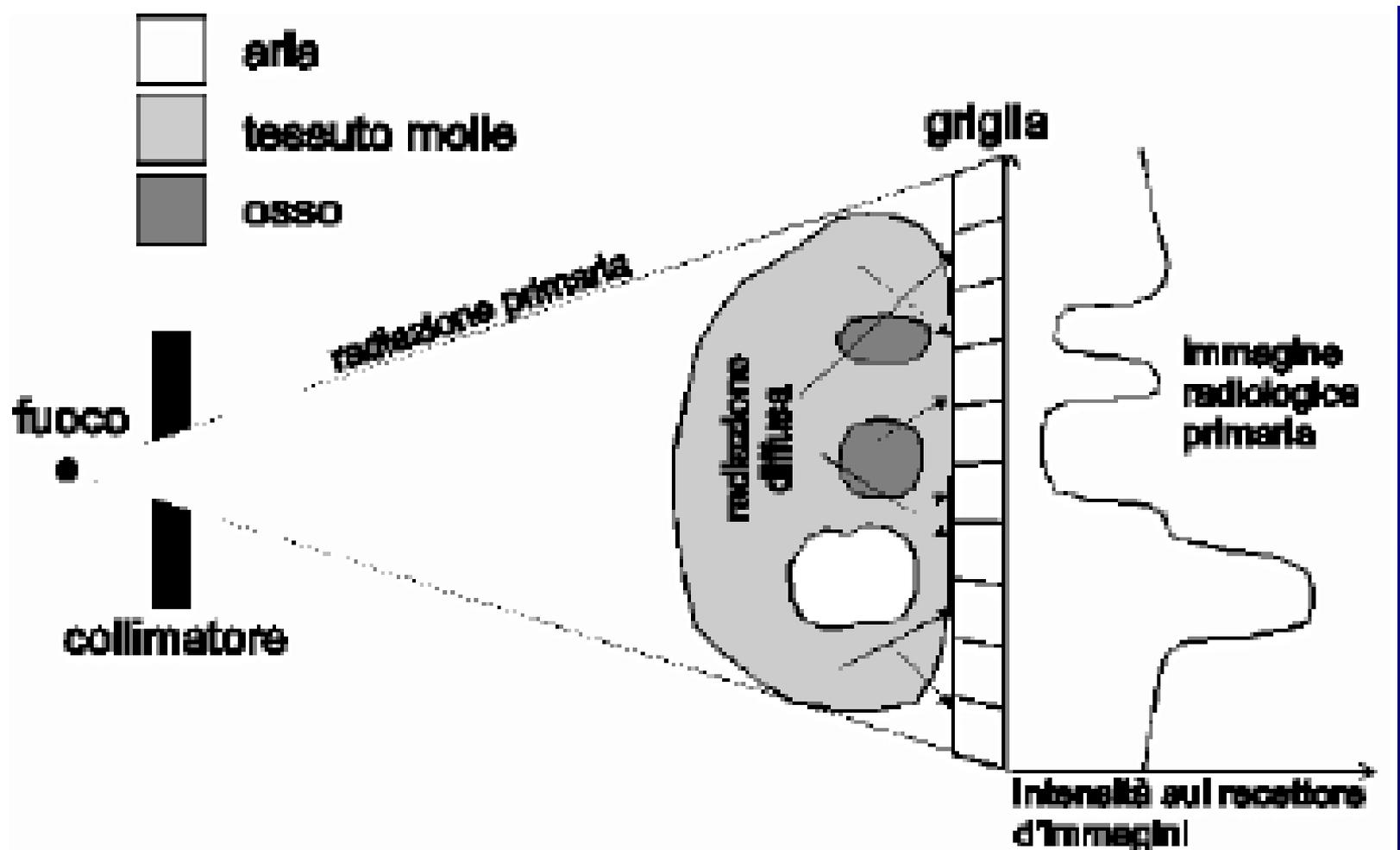
# la scoperta dei raggi X aprì l'era della diagnostica per immagini

prima radiografia della storia!  
Mano di Berta Roentgen



I vari tessuti umani (ossa, tessuti molli, ...) **attenuano in modo diverso i fotoni**.  
La radiazione trasmessa presenta intensità diversa in dipendenza delle regioni del corpo attraversate.

Un sistema di raccolta delle immagini posto a valle del corpo permette di tradurre in immagine il contenuto di informazioni in esso presente.

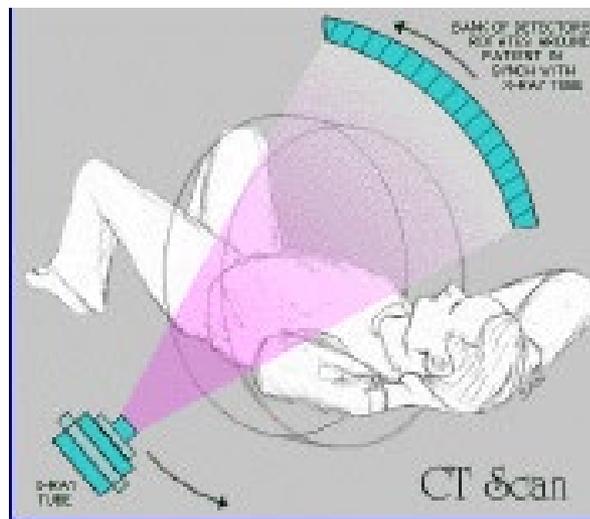
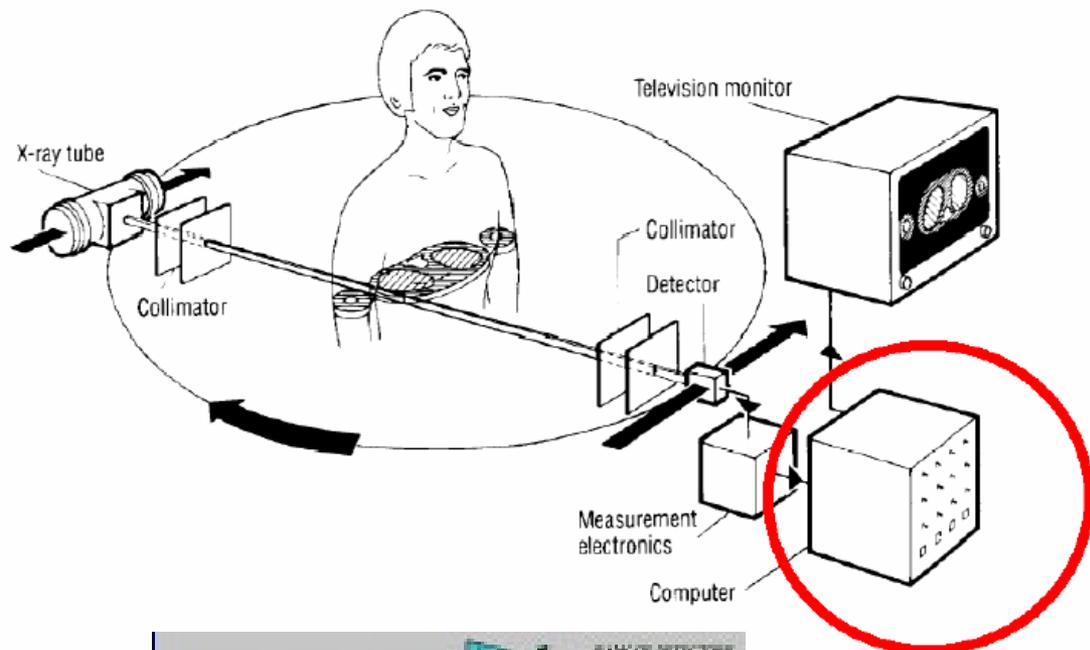


# Principio di funzionamento della Tomografia Assiale Computerizzata – TAC

Una sorgente di raggi X ruota attorno al paziente in modo solidale ad una schiera di rivelatori.

In corrispondenza ad ogni posizione della sorgente (e conseguentemente della schiera di rivelatori) viene registrato un profilo di attenuazione ottenuto in seguito dell'attraversamento del corpo di un fascio sottile di raggi X da essa emesso.

L'elaborazione delle informazioni contenute in ogni profilo permette di ottenere un'immagine digitale in 2 dimensioni della sezione del paziente indagata.





# Sorgenti interne



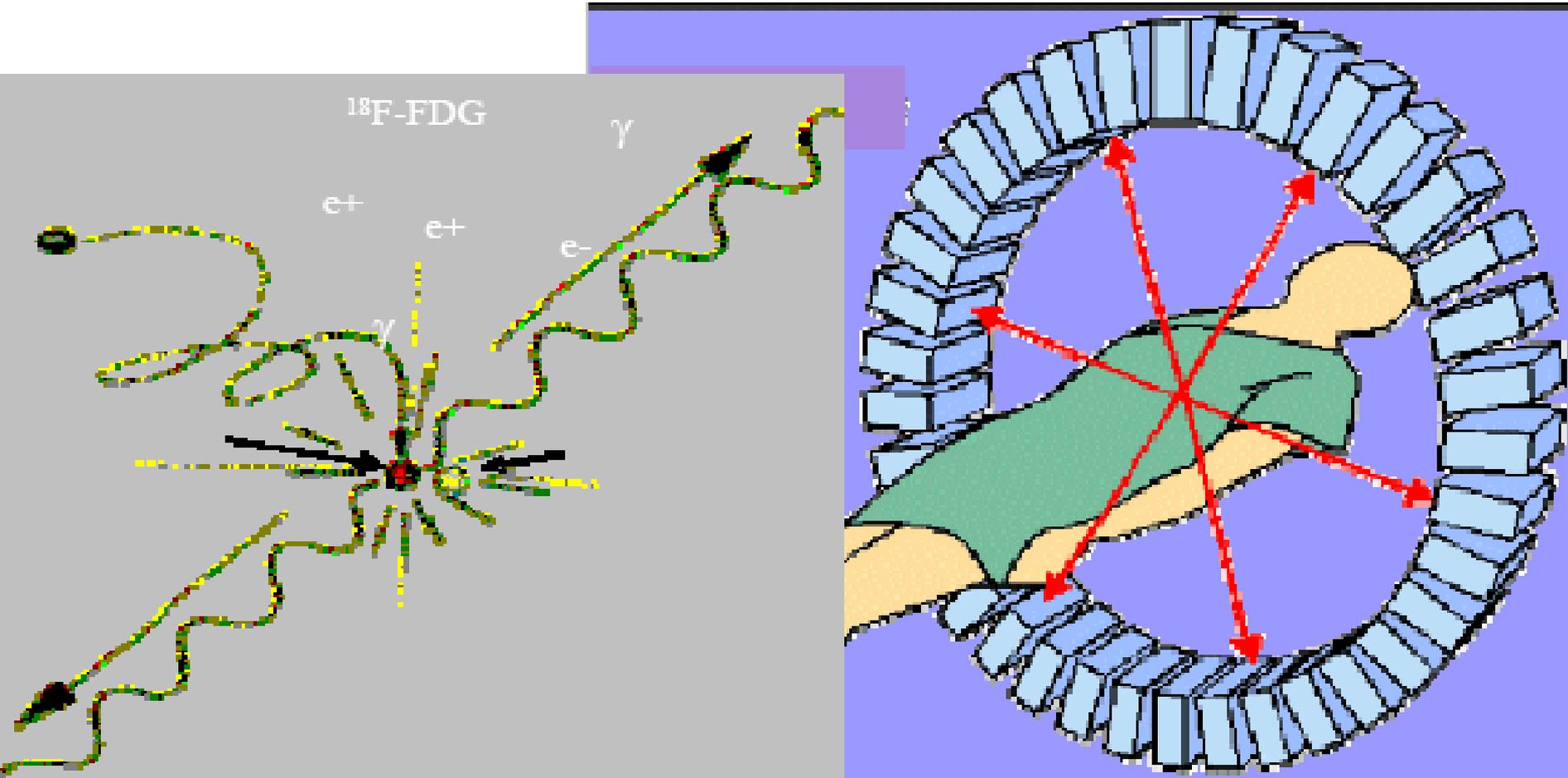
E' il paziente che emette le radiazioni gamma o X che vengono registrate da apposite apparecchiature

Si somministrano ai pazienti dei **composti marcati con radionuclidi (un radionuclide + una molecola)** chiamati **RADIOFARMACI** scelti opportunamente in modo che:

si **concentrino nell'organo** oggetto di studio o che permettano di **seguire nel tempo una particolare funzione biologica** ossia si comportino come traccianti di una particolare funzione metabolica (**biocinetica**).

La distribuzione nell'organismo del radiofarmaco dipende dalla costituzione chimico-fisica dello stesso, dalla via di somministrazione, dalla capacità di attraversare barriere biologiche, dalle condizioni metaboliche del paziente.

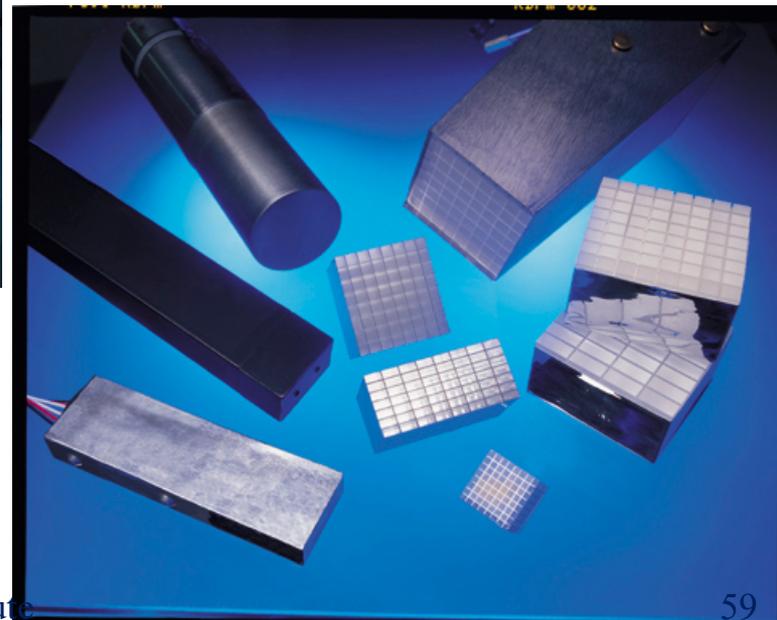
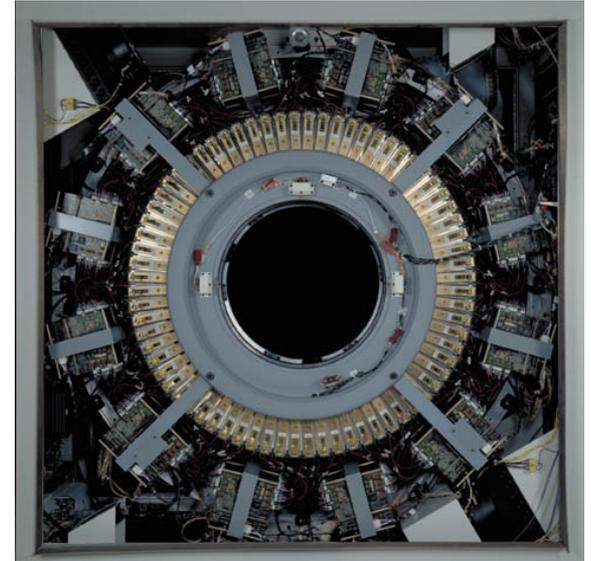
# PET (Positron Emission Tomography)



Si utilizzano radionuclidi emettitori di positroni che interagiscono con gli elettroni dell'organo del paziente.

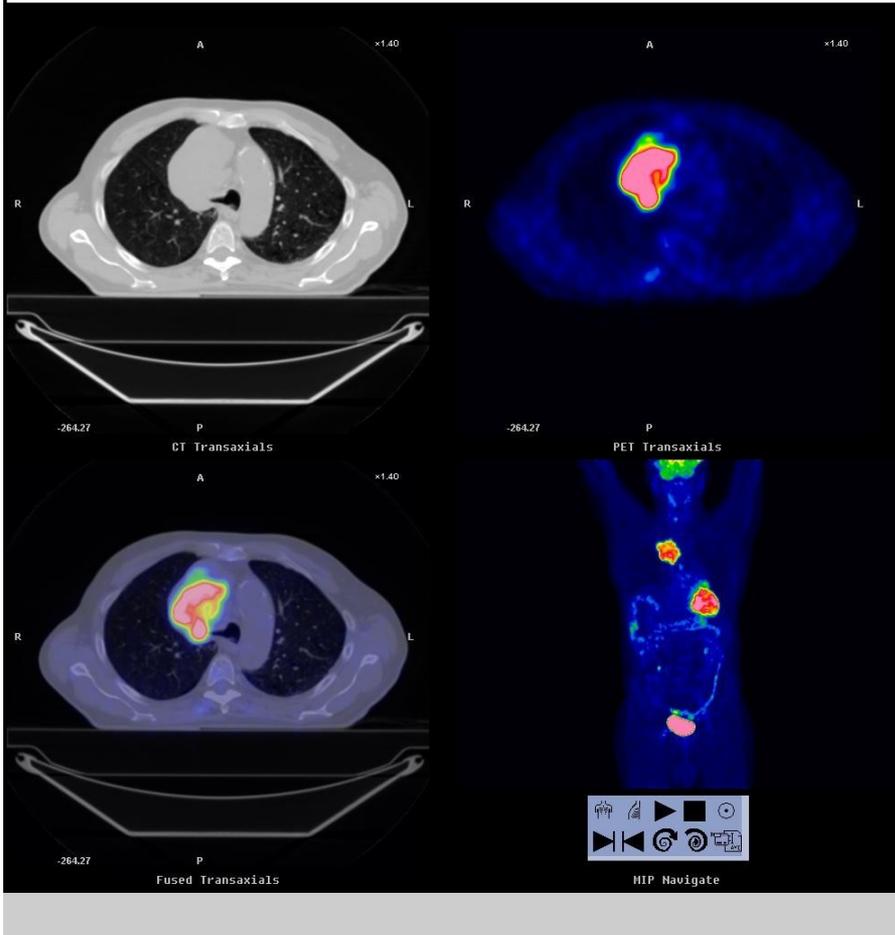
Si ha l'emissione di due fotoni nati dall'annichilazione della coppia positrone-elettrone  
I fotoni vengono rivelati simultaneamente da due rivelatori posti a  $180^\circ$

# PET (Positron Emission Tomography)

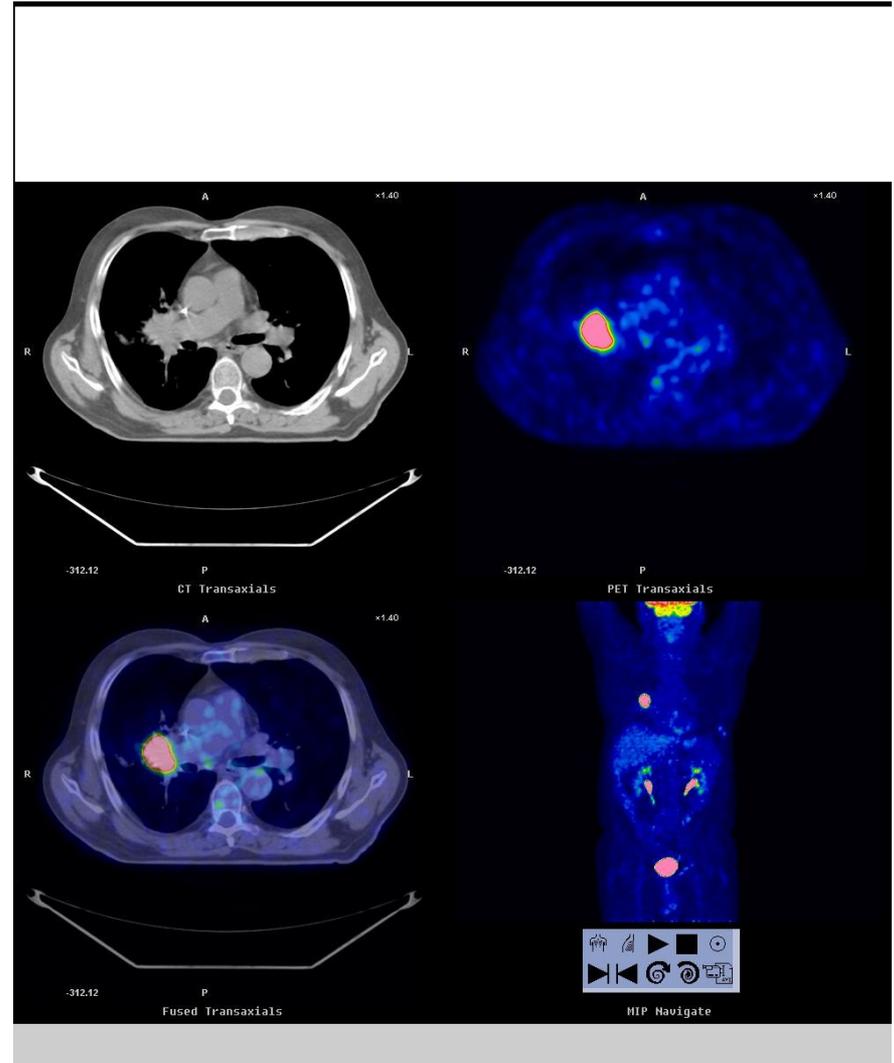


Immagini fornite gentilmente dall'Ospedale San Raffaele (MI)

# TC + PET



Immagini fornite gentilmente  
dall'Ospedale San Raffaele (MI)



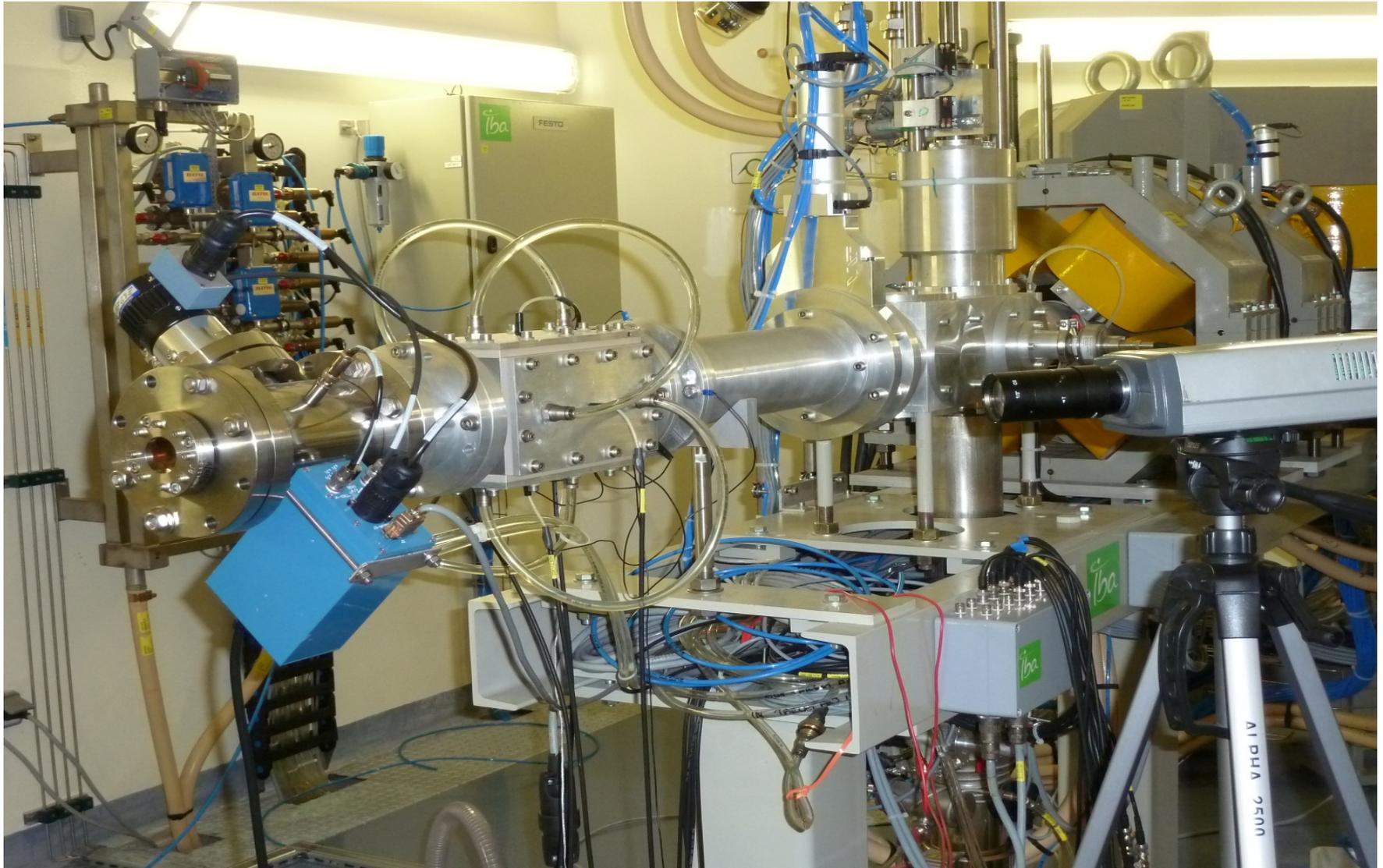
# ARRONAX Cyclotron (Nantes)

☠ Protons 35 – 70 MeV **up to 750 mA**

☠ Deuterons 15 – 35 MeV

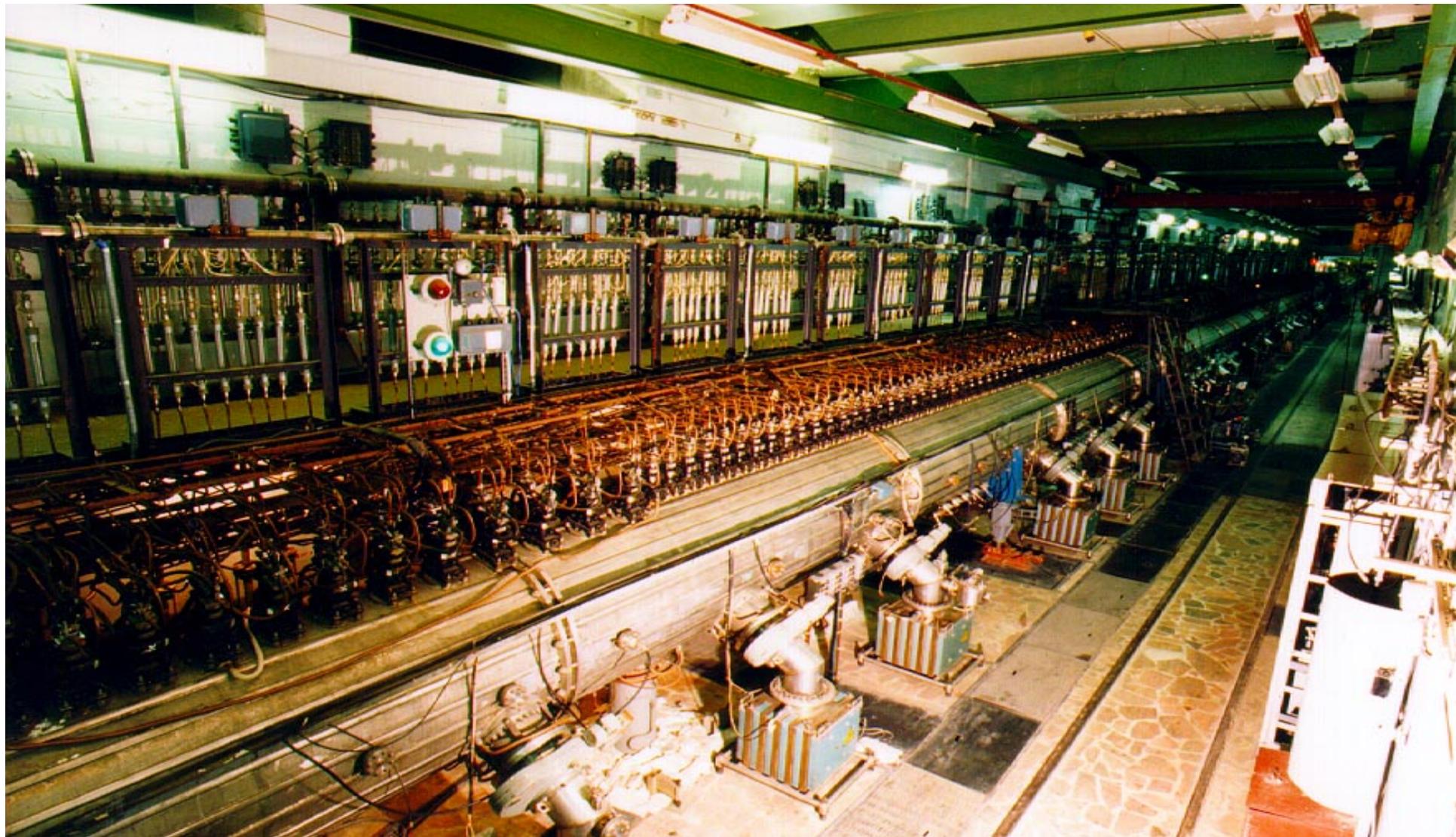
☠ Alpha 70 MeV

Beam particles

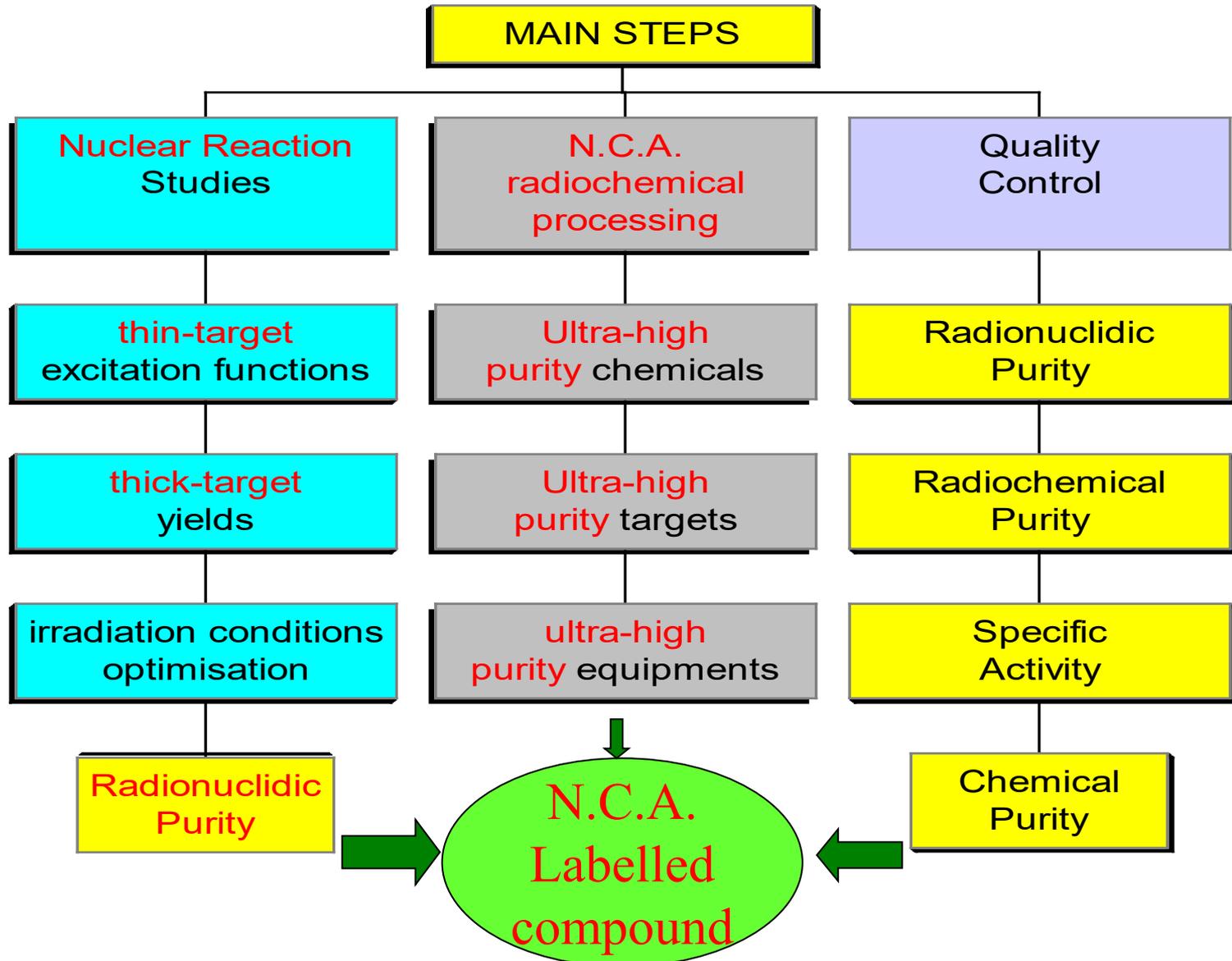


# INR Linear Proton Accelerator

## Troitsk, Moscow Region



# Produzione di radionuclidi in forma **N.C.A.**



# RADIONUCLIDI

## Classici

## Innovativi

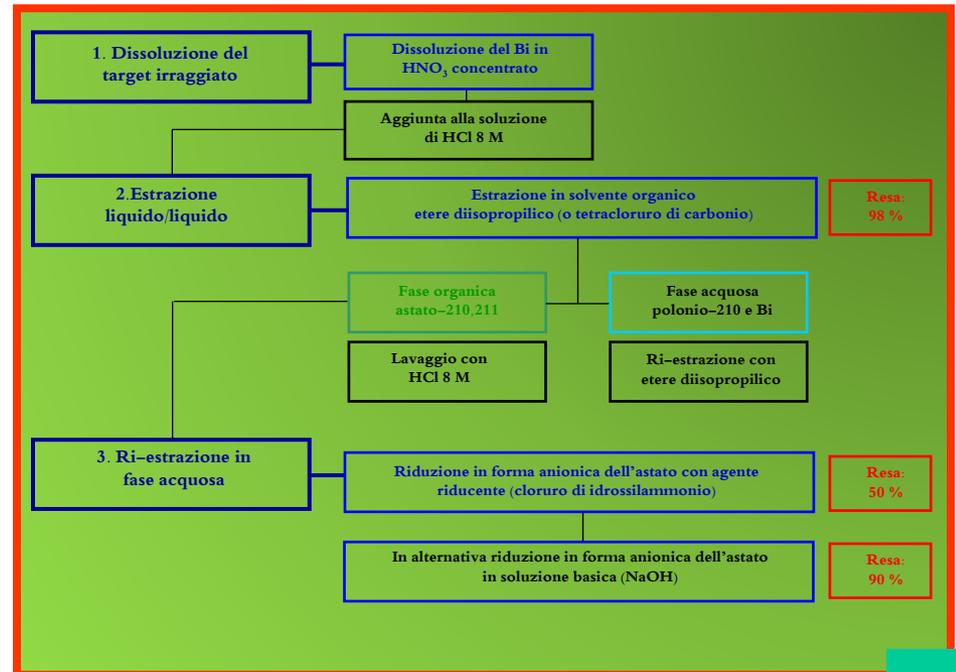
| Nuclide | T <sub>1/2</sub> | Decadimento    | Applicazione |
|---------|------------------|----------------|--------------|
| F-18    | 109.77 m         | β <sup>+</sup> | PET          |
| C-11    | 20.39 m          | β <sup>+</sup> | PET          |
| N-13    | 10 m             | β <sup>+</sup> | PET          |
| O-15    | 122.2 s          | β <sup>+</sup> | PET          |
| Tc-99m  | 6.01 h           | IT             | SPECT        |

| Nuclide     | T <sub>1/2</sub> | Decadimento                     | applicazione  |
|-------------|------------------|---------------------------------|---------------|
| Cu-64       | 12.7 h           | β <sup>+</sup> , β <sup>-</sup> | PET + Terapia |
| Ga-66       | 9.49 h           | β <sup>+</sup>                  | PET           |
| I-124       | 4.176 d          | EC, β <sup>+</sup>              | PET           |
| Y-86        | 14.74 h          | EC, β <sup>+</sup>              | PET           |
| Sr-82/Rb-82 | 6.472 h          | EC, β <sup>+</sup>              | PET           |

C-11, N-13, O-15 e F-18, **radionuclidi detti fisiologici** in quanto isotopi di elementi chimici costituenti la comune materia bio-organica. Essi vengono sostituiti ai relativi nuclidi stabili ottenendo un duplice vantaggio:

1. di marcare il tessuto interessato e
2. contemporaneamente di non modificare le altre caratteristiche chimiche e fisiche e quindi del metabolismo del paziente

A questi ne va aggiunto un numero elevato, tuttora in fase di studio o sperimentazione

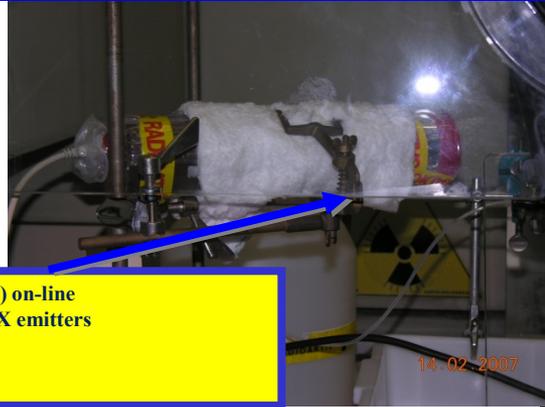


# Typical radiometric equipment, at LASA-Segrate

9 analog and digital HPGe  
gamma spectrometry



NaI(Tl) on-line  
gamma-X emitters



2 Liquid Scintillation Counting Spectrometry  
beta-alpha emitters



2 Si (SB or PIPS)  
for alpha emitters



Cyclone® Plus Storage Phosphor System 2D imaging for gamma-beta emitters



# Nuclear Physics Measurements Laboratory

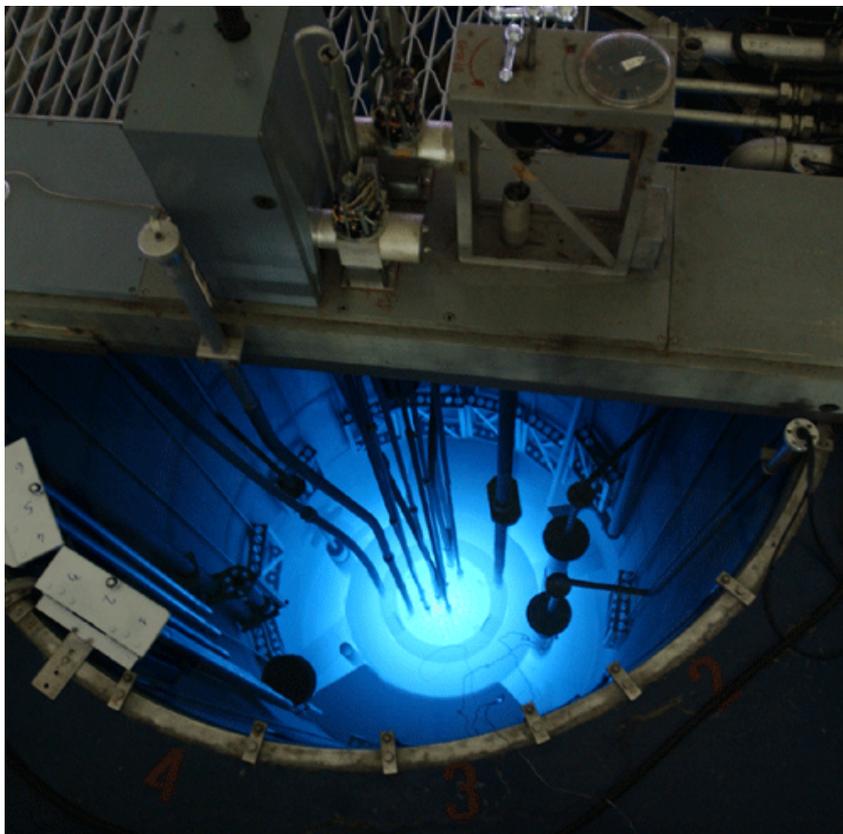
## alpha, beta, gamma spectrometry



# *Hot Radiochemistry Laboratory: ISO Class II; UNICEN 7815*



# TRIGA MARC II of LENA, Pavia, Italy



# RADIOTERAPIA

La Radioterapia impiega le radiazioni ionizzanti per produrre un effetto radiobiologico distruttivo nei tessuti tumorali.

Radioterapia metabolica

Brachiterapia

Boron Neutron Capture (BNCT)

Radioterapia con fasci esterni:

raggi gamma da sorgente di Cobalto, fotoni ed elettroni da acceleratori lineari, fasci di neutroni, fasci di particelle cariche attualmente protoni e ioni carbonio (adroni)

**Radiazione Ionizzante** cede energia al materiale attraversato.

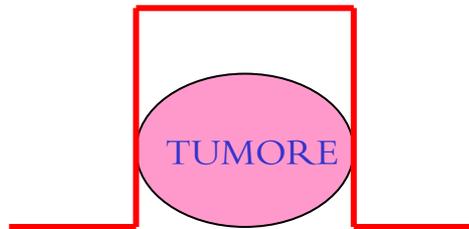
In particolare nei materiali biologici questo determina dei danni a strutture cellulari critiche (DNA) con conseguente morte cellulare.

**Dose assorbita**  $D = \Delta E/m$  (Gy = J/kg)

E' il rapporto tra l'energia rilasciata dalle radiazioni ed assorbita dalla materia in un dato elemento di volume e la massa m di tale volume

**Obiettivo principale della radioterapia è somministrare il massimo di dose al volume bersaglio (cellule tumorali) salvaguardando i tessuti sani circostanti**

Andamento ideale della dose impartita ad un volume bersaglio:



DOSE MASSIMA

DOSE MINIMA

- impiego di radiazioni con elevato potere “distruttivo” nei confronti delle cellule tumorali → ELEVATA EFFICACIA BIOLOGICA

# Radioterapia metabolica

Si somministrano ai pazienti dei radiofarmaci in modo tale che vengano accumulati nelle zone del corpo da sottoporre a terapia.

Tali radiofarmaci devono essere in grado di cedere “tutta” la loro energia all’interno della zona da trattare.

I radionuclidi impiegati sono diversi da quelli usati in diagnostica.

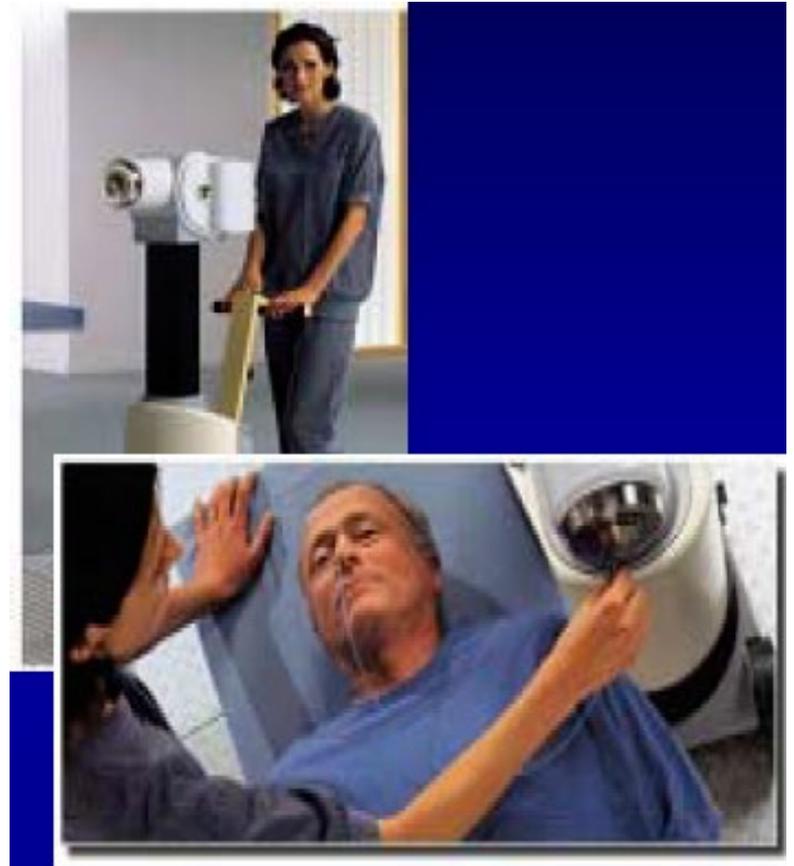
Il radionuclide ideale in terapia dovrebbe **non** avere **emissioni gamma** ma **solo emissioni di particelle beta** (per trattare tumori delle dimensioni del cm) o **radiazioni alfa** (per trattare micrometastasi delle dimensioni del  $\mu\text{m}$ ).

| Nuclide         | $T_{1/2}$ | Decadimento |
|-----------------|-----------|-------------|
| I-123           | 13.27 h   | Auger       |
| In-111          | 2.8 d     | Auger       |
| At-211/ Po-211g | 7.2 h     | $\alpha$    |
| Re-186g         | 90.64 h   | $\beta$ -   |
| Lu-177g         | 6.734 d   | $\beta$ -   |
| Sm-153          | 46.27 h   | $\beta$ -   |

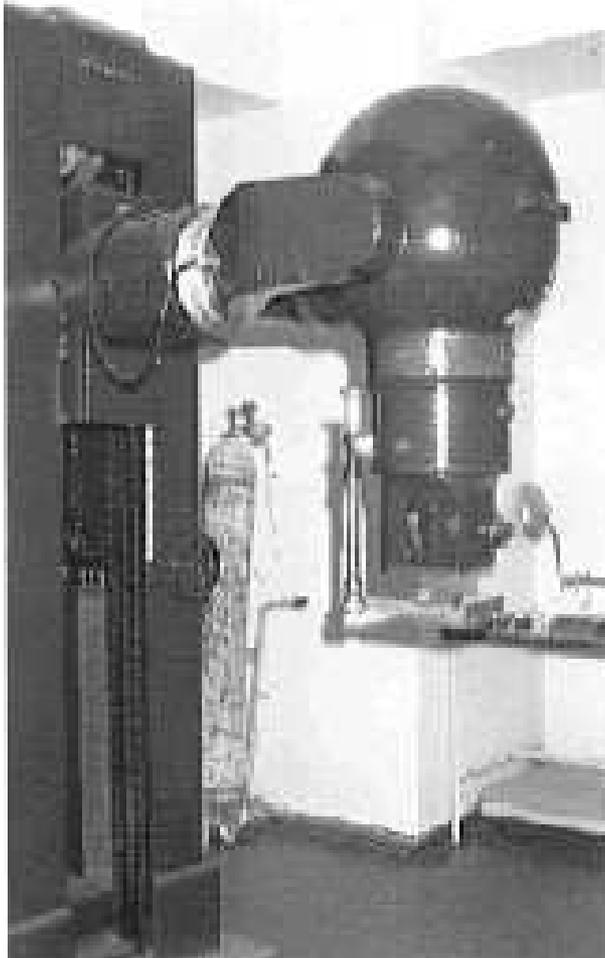
# Brachiterapia

Impiega sorgenti radioattive sigillate di Cs-137, Ir-192, I-125, ... che vengono posizionate a contatto o all'interno di una lesione neoplastica.

E' indicata per il trattamento di tumori con estensione limitata e circoscritta, situati in regioni anatomiche facilmente accessibili



# Radioterapia con fasci esterni, fotoni



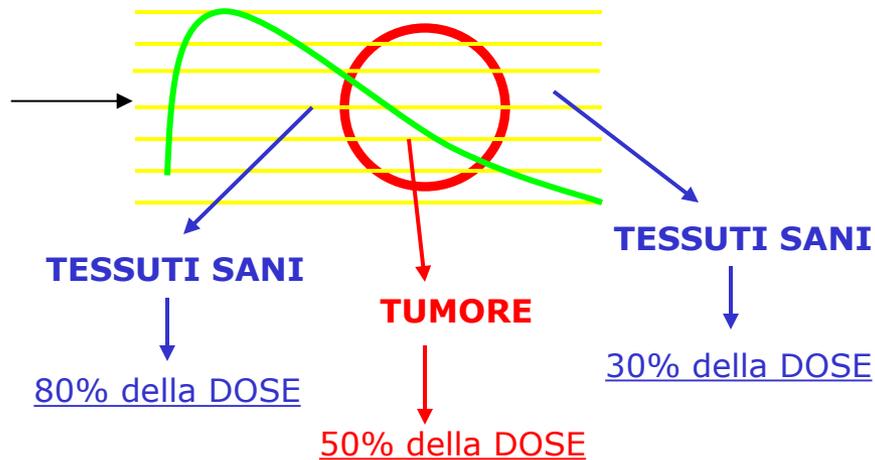
Anni '50-60  
unità di telecobaltoterapia



Anni '60  
Betatrone Siemens da 15 MV

# Radioterapia con fasci esterni, fotoni

UN SOLO fascio terapeutico :



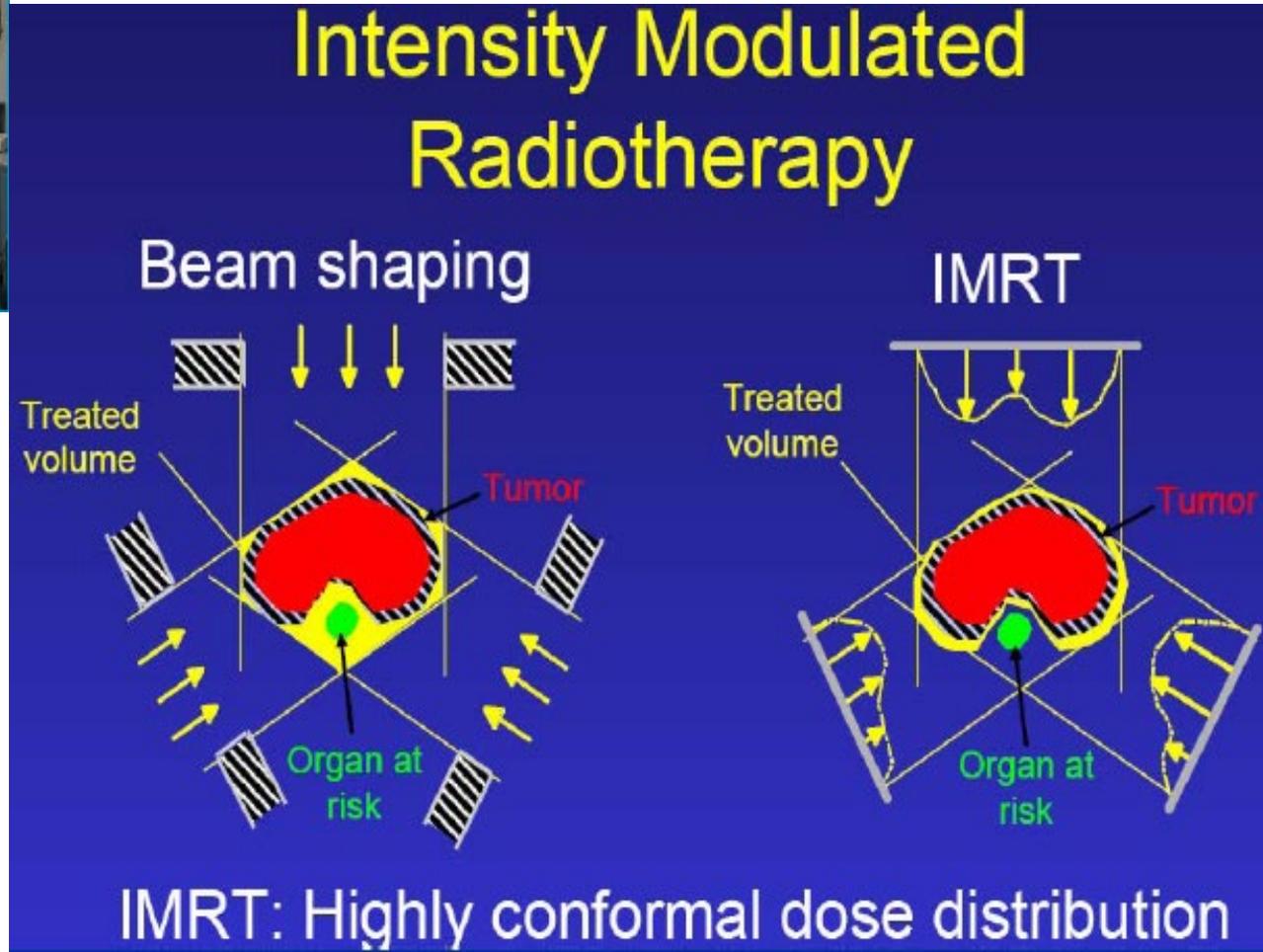
La caratteristica attenuazione di un fascio di fotoni nell'attraversare i materiali determina una distribuzione della dose sfavorevole soprattutto se il tumore si trova in profondità : la maggior parte della dose è assorbita dai tessuti sani !

Recenti sviluppi hanno portato all'utilizzo di piu' fasci contrapposti e all'impiego di tecniche di collimazione particolari in modo da minimizzare la dose nei tessuti sani, e di "conformare" al meglio la distribuzione della dose al volume tumorale (es: IMRT)

# Radioterapia con fasci esterni, fotoni



LINAC



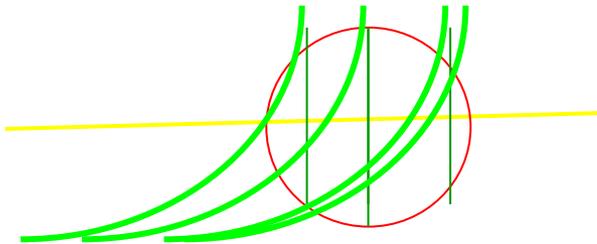
# Radioterapia con fasci esterni, protoni e ioni pesanti (adroni)

## Aspetti fisici :

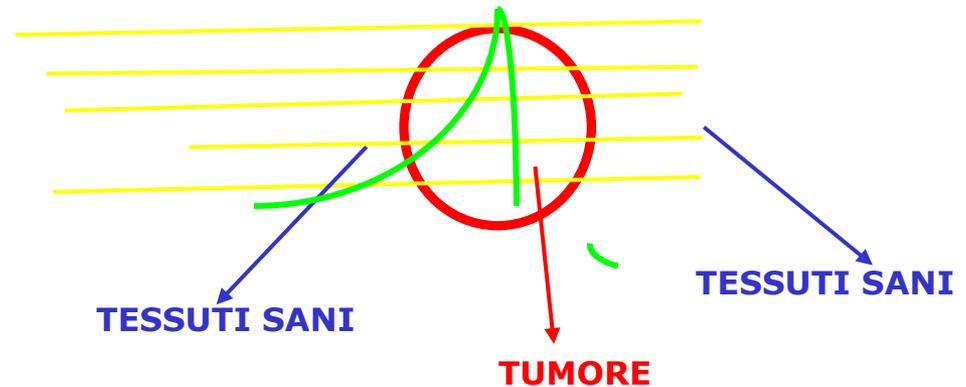
Le particelle cariche (protoni e ioni pesanti) perdono energia nei materiali attraversati in modo diverso dai fotoni:

il massimo rilascio di energia si ha alla fine del loro percorso

**(picco di Bragg)**



## PICCO di BRAGG



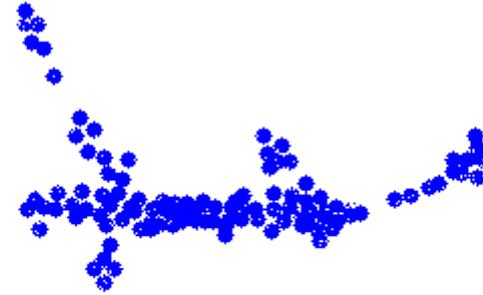
Si calcola l'energia dello ione in modo che il rilascio massimo avvenga nel volume tumorale, ma il picco di Bragg è troppo stretto per coprire tumori di dimensioni di qualche cm!

Si utilizzano pertanto particelle di diversa energia i cui picchi di Bragg coprano l'intero volume tumorale (Fascio a picco di Bragg allargato)

# Radioterapia con fasci esterni, protoni e ioni pesanti (adroni)

## Aspetti radiobiologici

Ioni Carbonio alla fine del loro  
percorso, creano **un'elevata  
densità di ionizzazione,**  
a differenza di quanto avviene  
per i fotoni  
e pertanto producono, **a parità di  
dose un maggior danno biologico.**



Ionizzazioni  
prodotte da uno  
Ione carbonio

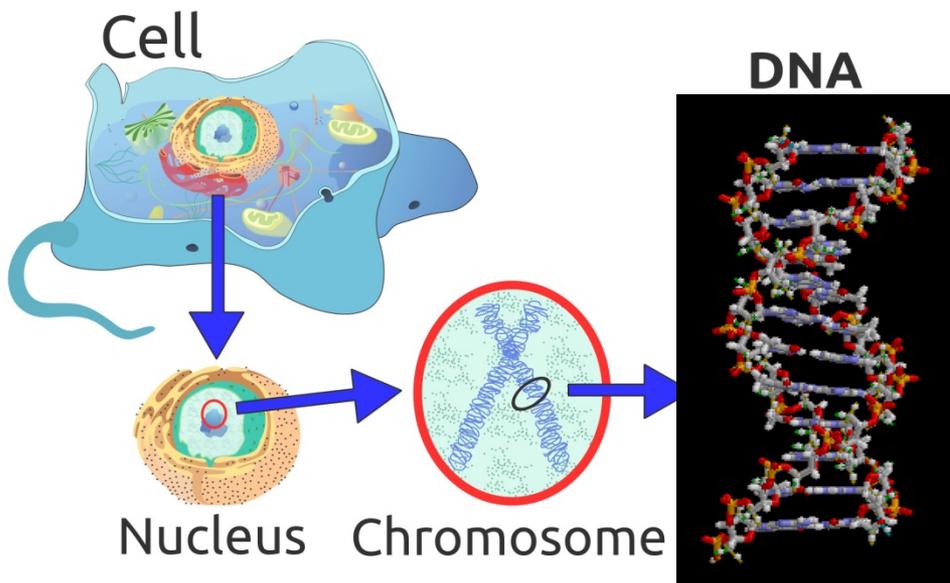
—  
10 nm

Ionizzazioni  
prodotte da un  
fotone



—  
1  $\mu\text{m}$

# Danno biologico prodotto dalle radiazioni ionizzanti



❖ **Il danno da radiazioni** si manifesta attraverso il danneggiamento del materiale genetico (**DNA**) nelle cellule del corpo.

## ❖ I tipi di danni al DNA

1. Singola rottura dell'elica
2. Doppia rottura dell'elica – riparazione praticamente non possibile

## ❖ Tre possibili risultati

1. Dopo il danneggiamento, le cellule vengono completamente riparate e continuano a funzionare normalmente.
2. Le cellule vengono riparate in modo improprio, continuano a convivere con mutazioni che potrebbero sviluppare un cancro in futuro

### 3. **Morte cellulare**

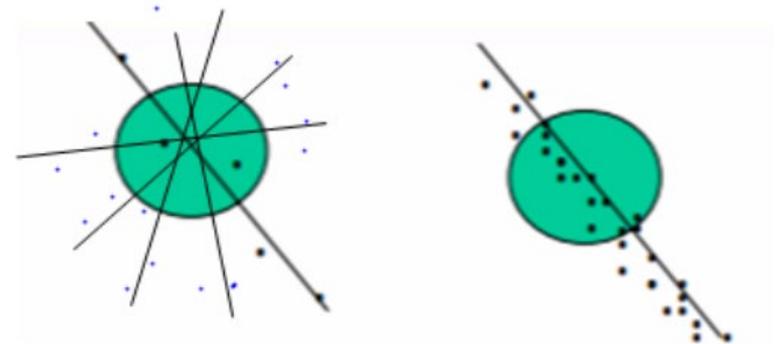
Due ragioni per prendere in considerazione la radioterapia con protoni e adroni:

1. I protoni e gli adroni sono in grado di produrre la doppia rottura dell'elica del DNA, portando alla morte la cellula.
2. Sono in grado di distruggere i tumori radioresistenti.

# RBE - Relative Biological Effectiveness

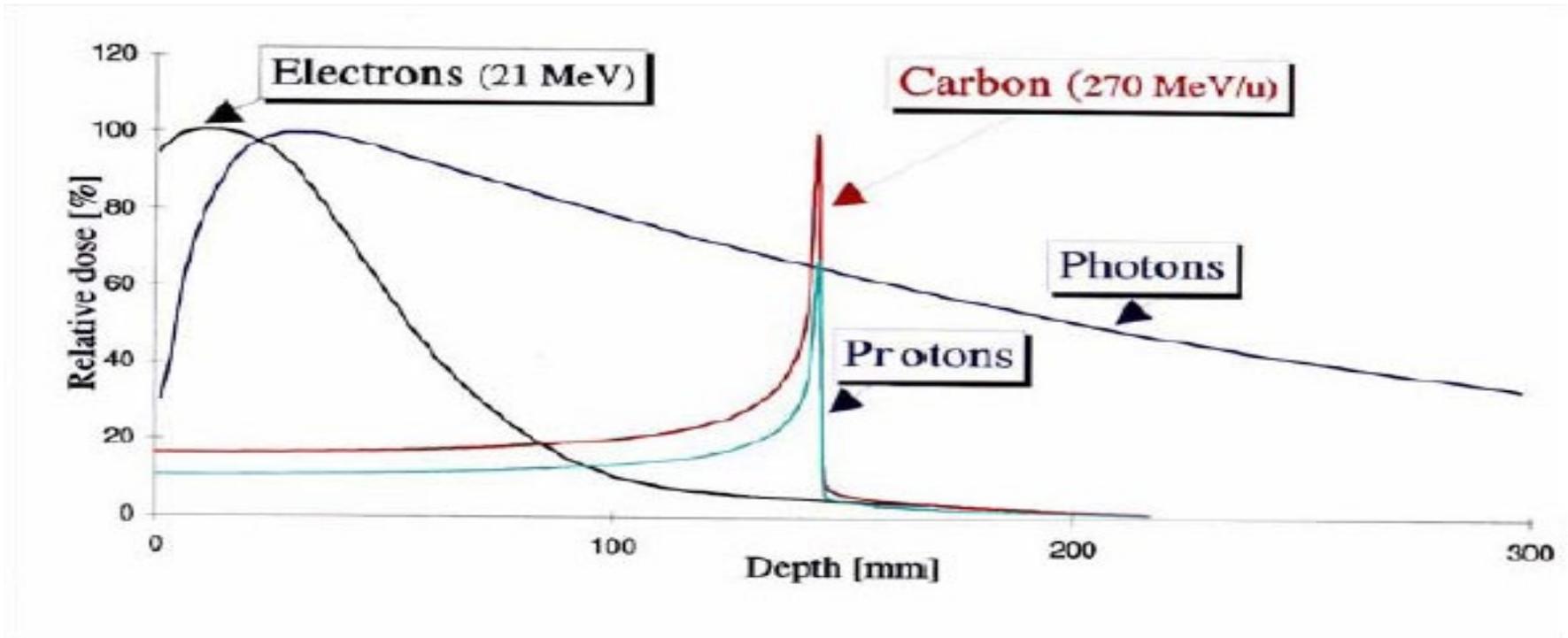
- Tipi di radiazioni rilasciano l'energia nei tessuti biologici in modi diversi, il che influisce sul danno cellulare.
- RBE – **effetto biologico relativo** è il rapporto tra la dose di una radiazione che produce un determinato effetto biologico e la dose di una radiazione di riferimento che produce lo stesso effetto biologico.

$$RBE = \frac{D}{D_X}$$



- La radiazione di riferimento ( $D_X$ ) è di solito raggi X a 220 kVp o fotoni  $\gamma$  del  $^{60}\text{Co}$ .
- RBE è un parametro importante per la stima del rischio derivante dall'esposizione a radiazioni ionizzanti (IR).
- Ci sono radiazioni che sono più densamente ionizzanti e che quindi producono danni più complessi al DNA della cellula e quindi danno luogo a un valore di RBE maggiore.

# Adroterapia - protoni, ioni carbonio



Fotoni

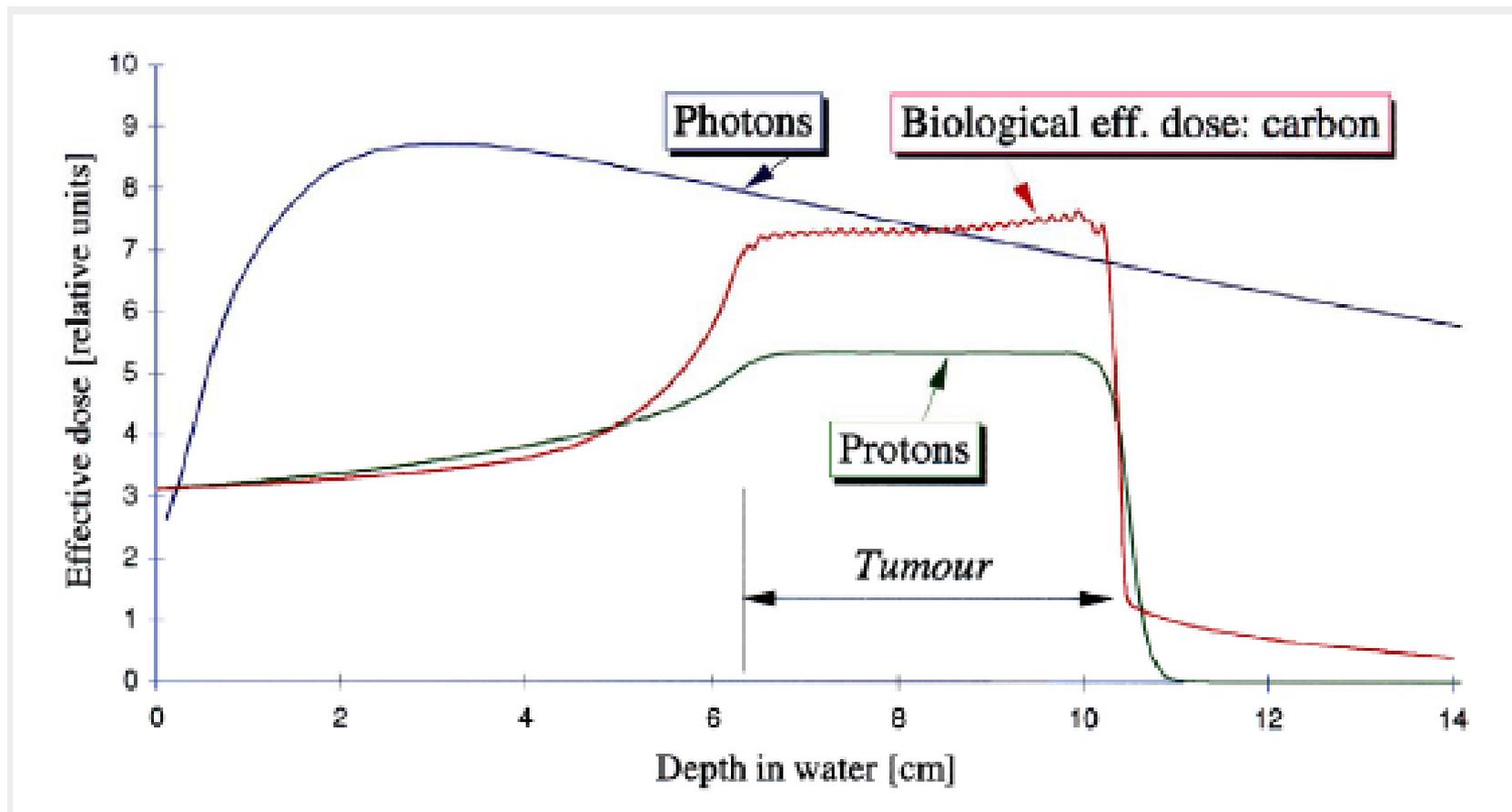
vs.

adroni

- Dose fisica alta vicino alla superficie
- Danno al DNA più facilmente riparabile
- Effetti biologici minori
- L'effetto NON è localizzato

- Dose massima al Picco di Bragg
- Danno al DNA non riparabile
- Effetti biologici alti
- L'effetto è localizzato

# Adroterapia - protoni, ioni carbonio



## Protoni e ioni carbonio

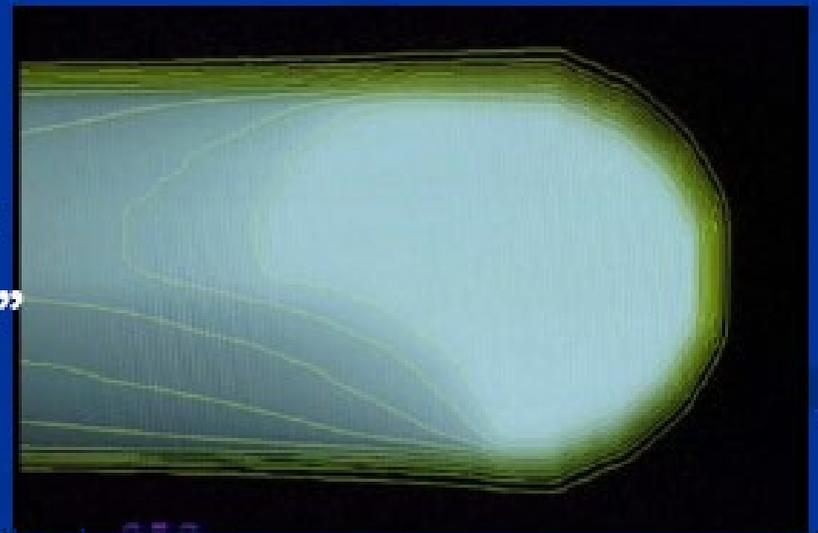
- Tumori posti ad una certa profondità
- Tumori in prossimità di organi critici
- Tumori pediatrici

In particolare gli **ioni carbonio** depositano nelle cellule una quantità di energia 24 volte maggiore rispetto ai protoni, provocando rotture multiple ravvicinate nella catena del DNA, non riparabili. Servono a trattare tumori radioresistenti.

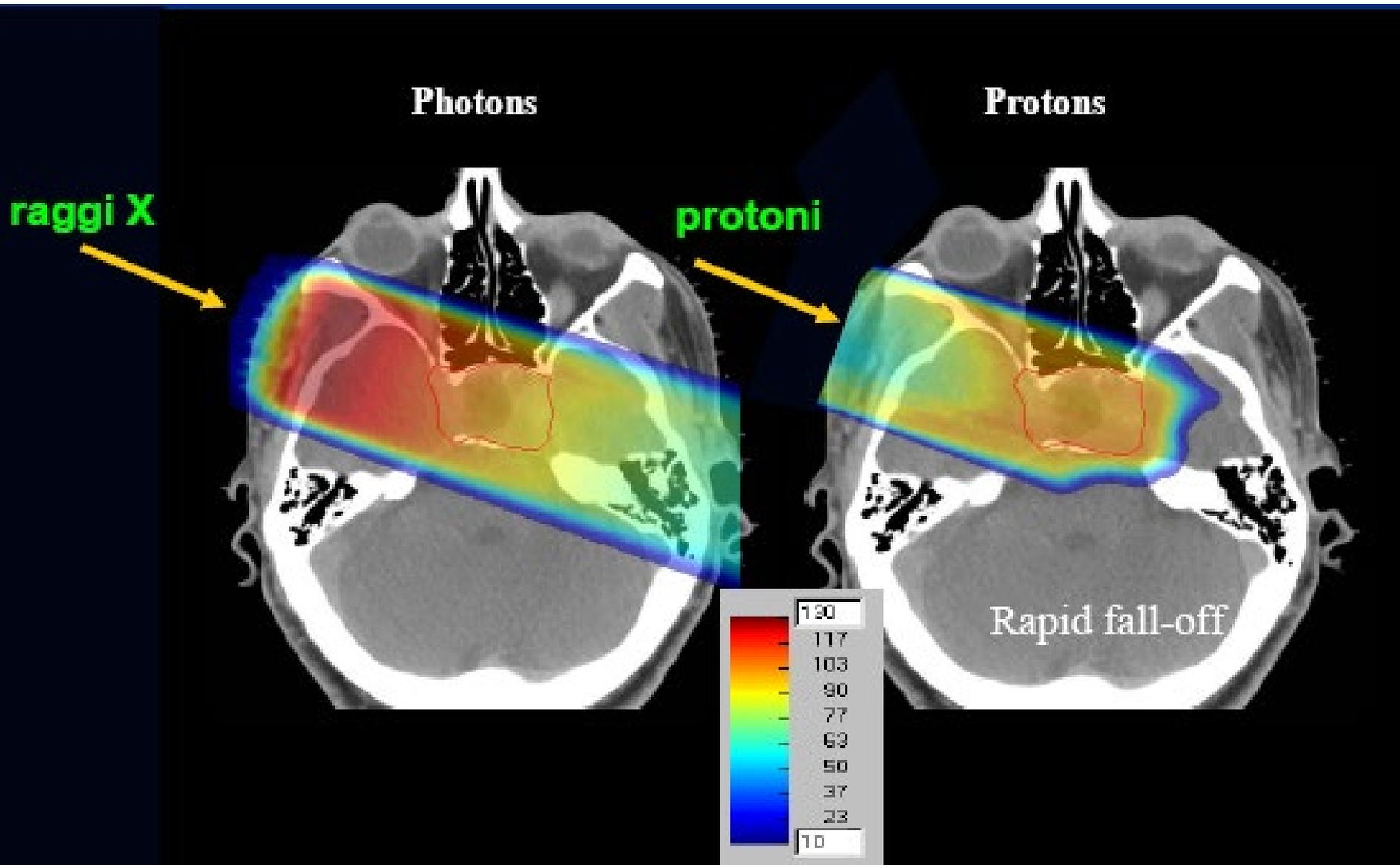
# Adroni nella materia



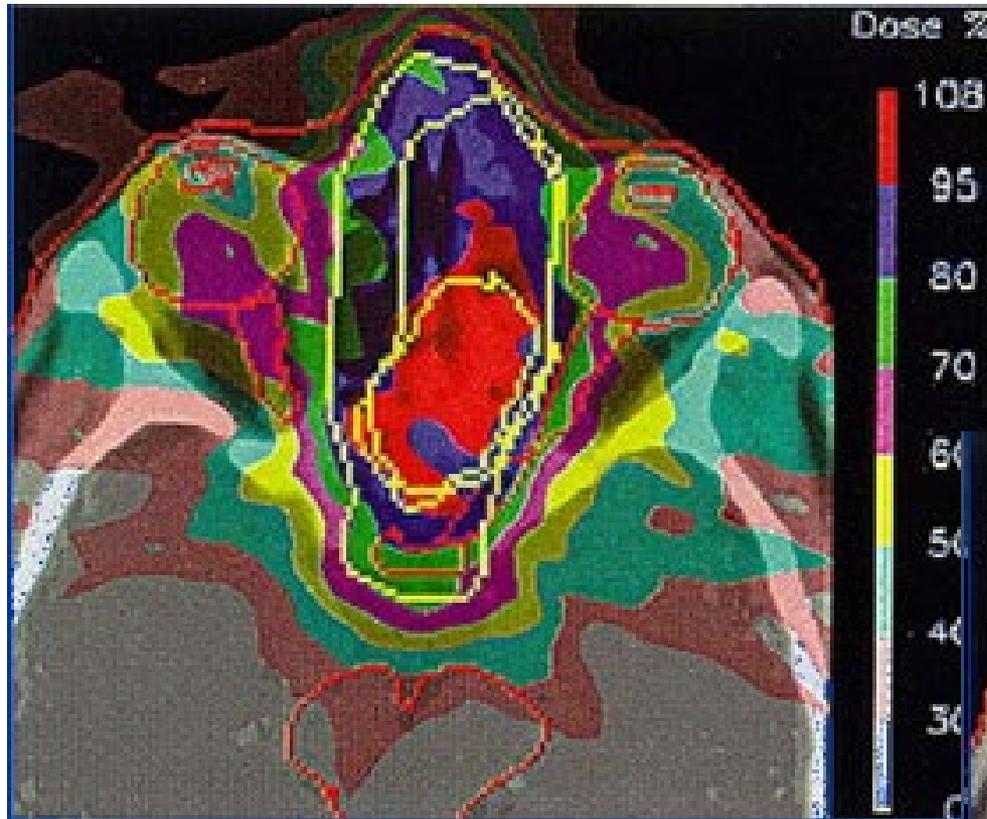
**Muovendo il fascetto si irradia il bersaglio in modo "conforme"**



# Trattamento con fotoni e adroni

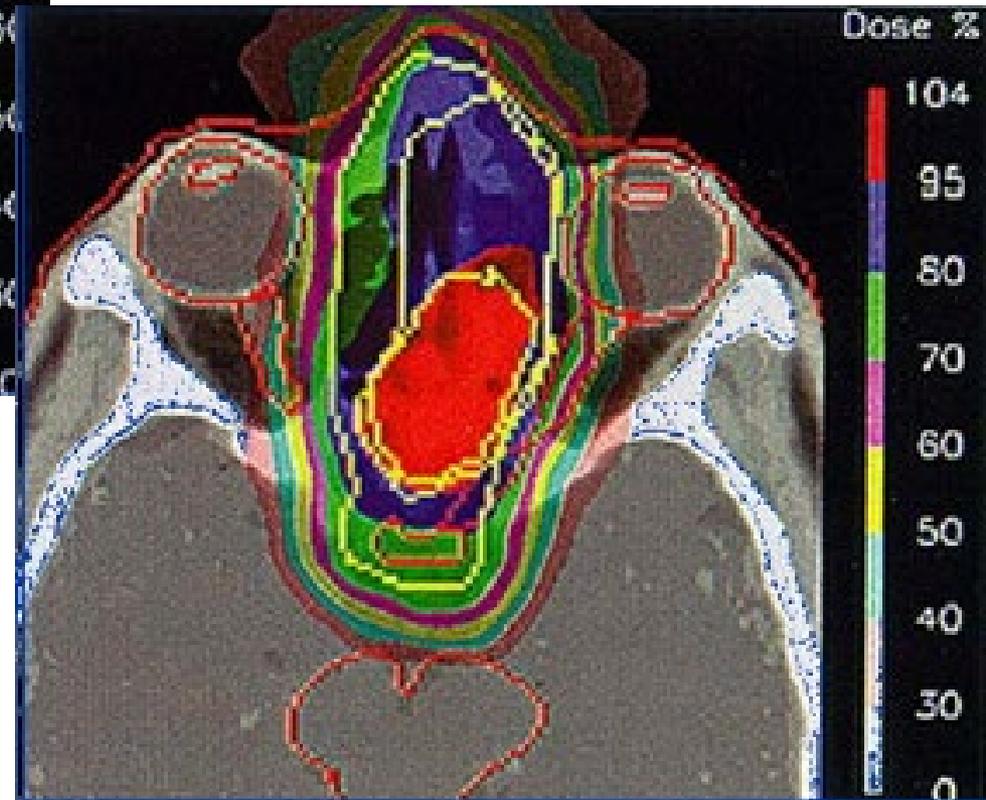


# Trattamento con fotoni e adroni



↑  
**9 fasci di X**

**1 fascio di protoni**



# Produzione di un fascio di adroni



# Proton Therapy Room

Motorized Chair    Final Collimator    Centering Laser    Collimator    Range Shifter and Modulator    Exit Window

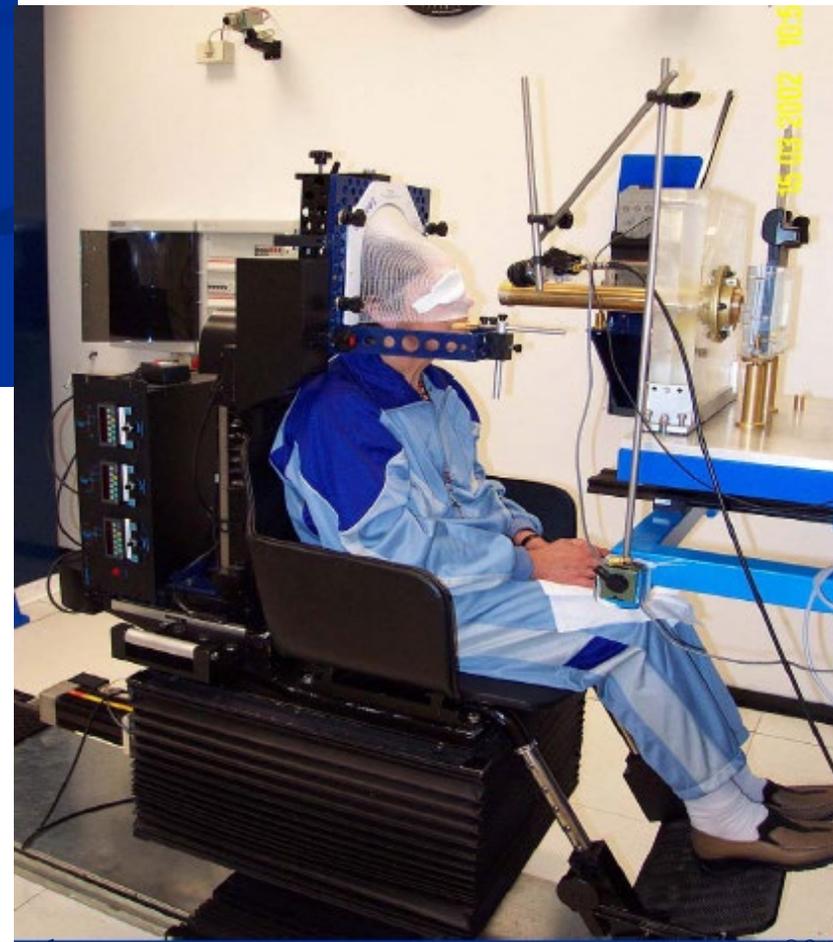


INFN - LNS

**C**entro di **A**dro**T**erapia e  
**A**pplicazioni **N**ucleari  
**A**vanzate  
**C**atania

Attualmente in Italia è attivo un centro per il trattamento dei tumori dell'occhio.

Si utilizzano protoni fino a 60 MeV

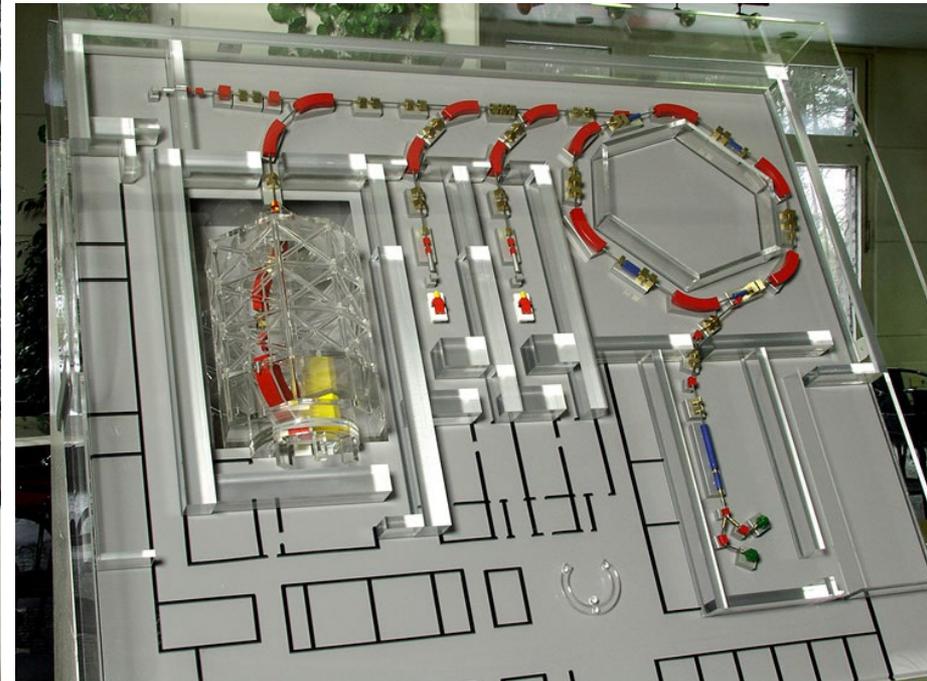


# Per il trattamento di tumori profondi sono attivi in Europa:

**PSI – Villigen, Svizzera**  
**Ciclotrone (solo protoni – 72 MeV)**

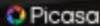
**GSI – Germania**      **Progetto pilota**  
**(Sincrotrone solo ioni carbonio –**  
**sino a 270 MeV/nucleone)**

**Entrato in funzione un centro**  
**dedicato ad Heidelberg**

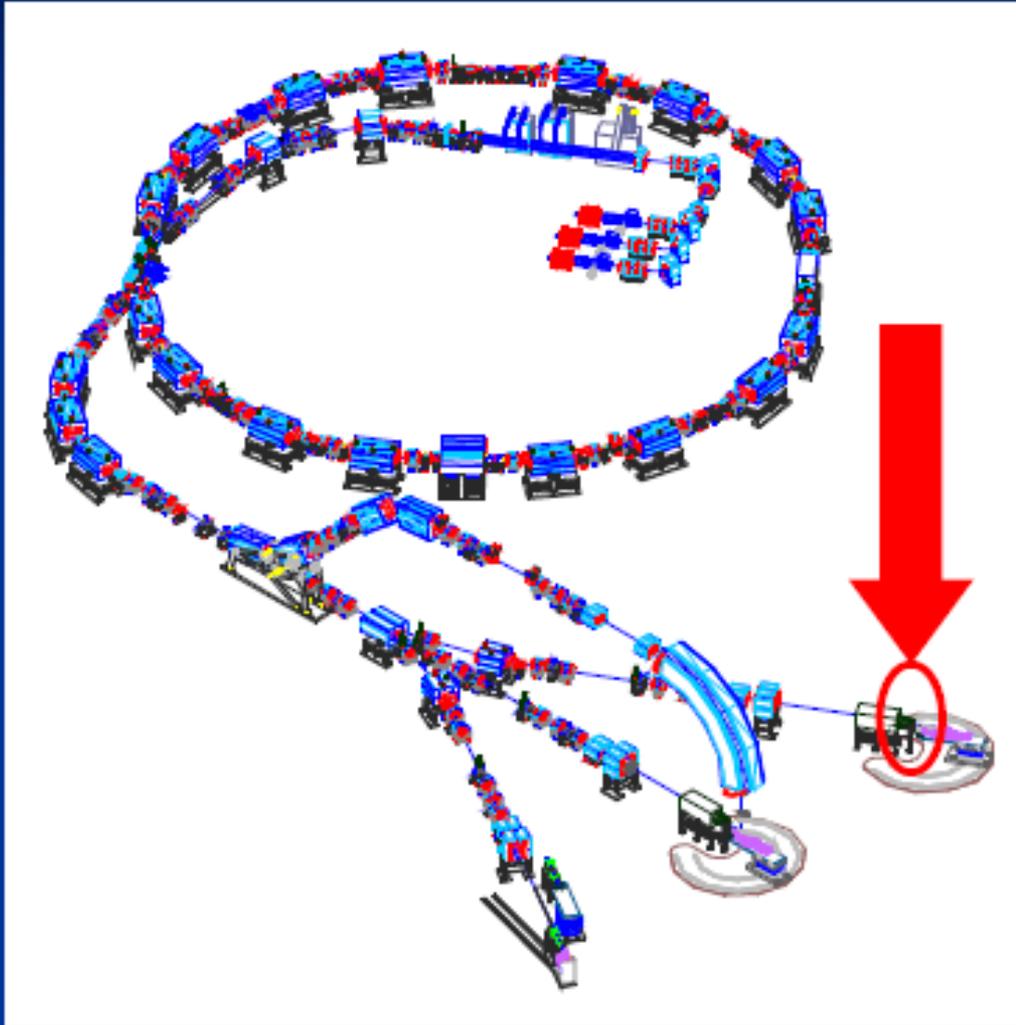


# Centro di Protonterapia di Trento



magini potrebbero essere soggette a copyright.  Termina Privacy

# Il Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica – CNAO a Pavia



Protoni : 60 – 250 MeV  
Ioni carbonio : 120 – 400 MeV/u

Sistema ATTIVO  
di distribuzione di dose

Dimensioni fascio :  
4-10 mm (FWHM)

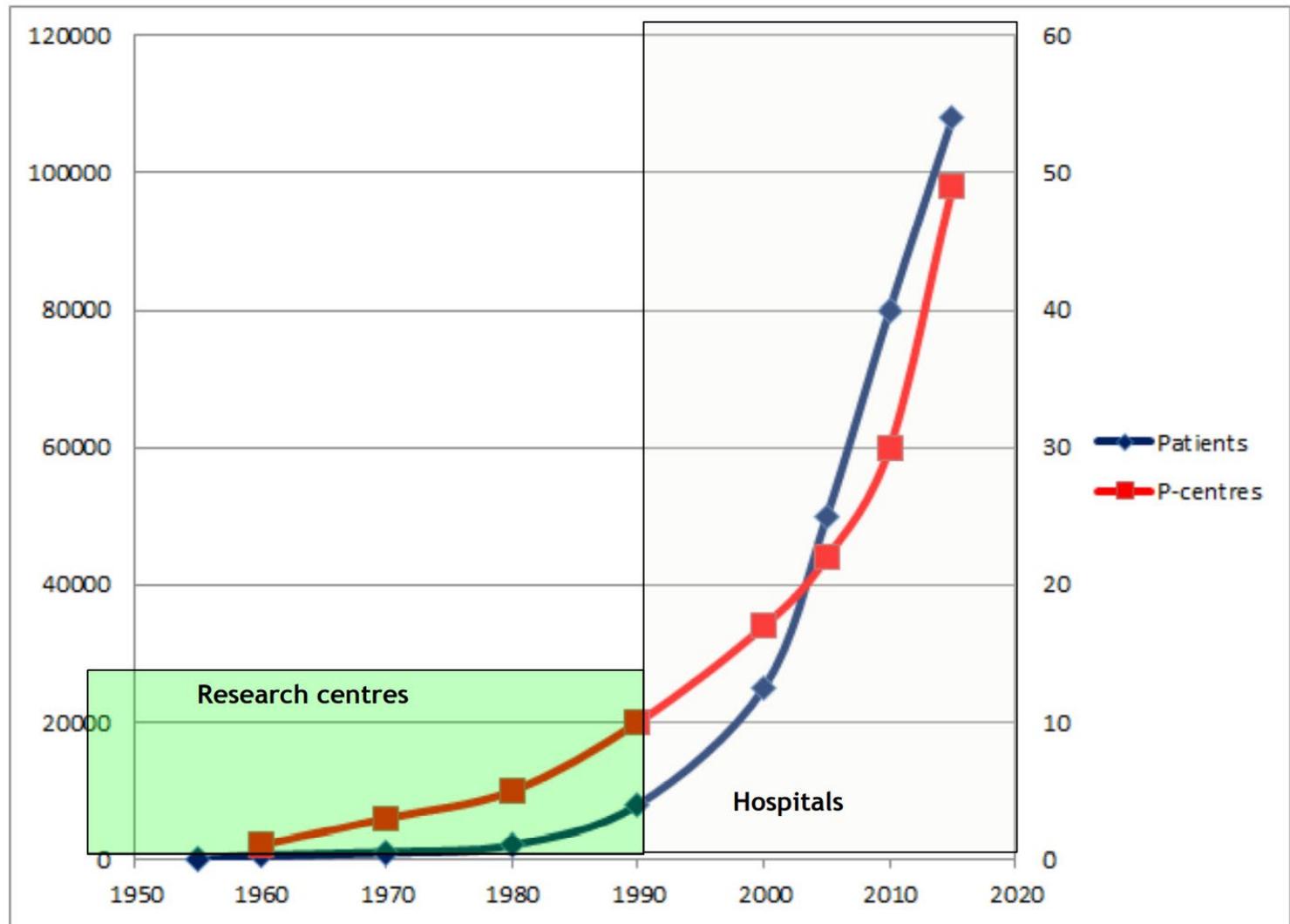
Dimensioni CAMPO :  
20 x 20 cm<sup>2</sup>

3 sale di trattamento :  
3 linee orizzontali  
1 linea verticale

# Facilities in operation in Europe 2002



[Data from [www.ptcog.ch](http://www.ptcog.ch)]



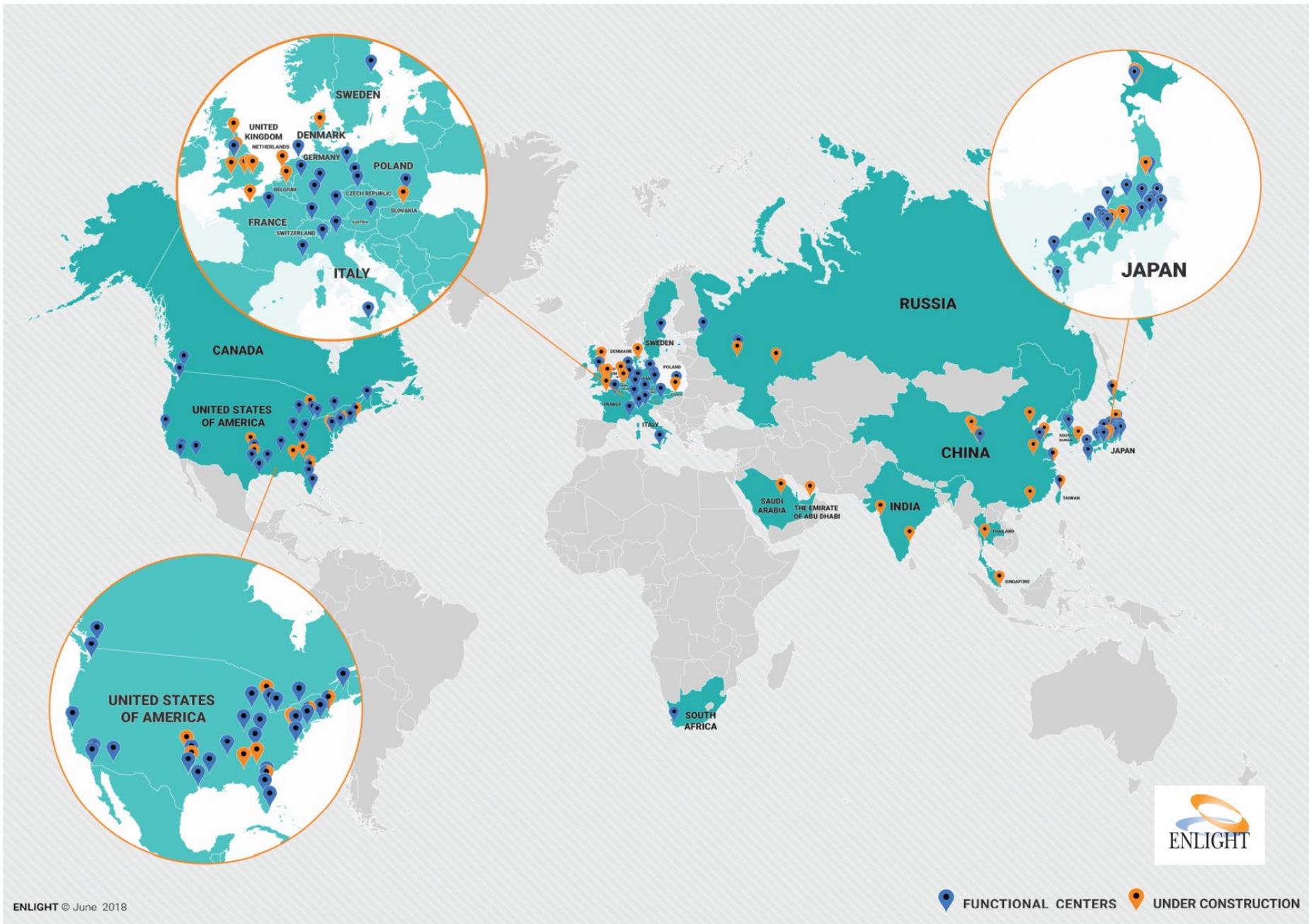
# Facilities in operation in Europe 2020



-  Proton centres
-  C-ion centres



Created with mapchart.net ©



# Conclusioni

**La Fisica applicata in campo medico è una branca della Fisica in grande crescita**

**Le conoscenze della fisica di base e le tecnologie sviluppate in campi apparentemente molto distanti hanno determinato la nascita e lo sviluppo di tecniche che sono entrate diffusamente e in modo irrinunciabile al servizio della salute dell'uomo.**

**Questa disciplina richiede giovani con una ottima conoscenza della Fisica e grande interesse per i suoi legami con le Scienze della Vita**

Ringrazio per la Vostra  
attenzione!